

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-39-06>

УДК 504.054:628.4.038

**В. Л. БЕЗСОННИЙ**, канд. техн. наук, доц.,  
доцент кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти  
e-mail: [bezsonny@gmail.com](mailto:bezsonny@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна 61022

## МЕТОД АНАЛІЗУ ВРАЗЛИВОСТІ ВОДНИХ РЕСУРСІВ У НЕСТАБІЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ НА ОСНОВІ ЕНТРОПІЙНОГО ПІДХОДУ

**Мета.** Синтез методу аналізу вразливості водних ресурсів на основі ентропії зв'язку на підставі визначення факторів водної системи, розглядаючи у взаємозв'язку антропогенну соціально-економічну систему та систему «людина-довкілля» та аналізу процесів трансформації водної системи в мінливому середовищі.

**Результати.** Проаналізовано механізм вразливості водних ресурсів у мінливому середовищі. Встановлено структуру вразливості водних ресурсів на основі чутливості, природної стійкості та штучної адаптації шляхом аналізу чотирьох станів водної системи: чутливий стан, пошкоджений стан, стан відновлення та стан рівноваги та супутніх процесів трансформації. Запропоновано метод аналізу вразливості водних ресурсів на основі ентропії зв'язку, що розширює концепцію контактної ентропії. Ступінь вразливості водних ресурсів щодо мінливого середовища можна розділити на п'ять рівнів з 11 індексами: низький (I), незначний (II), помірний (III), високий (IV) і екстремальний (V). Розрахунок контактної ентропії показує приблизне значення контактної ентропії  $S$  із діапазоном  $(-1,314; 1,314)$ . Цей інтервал ділиться на п'ять частин:  $[0,877; 1,314)$ ,  $[0,292; 0,877)$ ,  $[-0,292; 0,292)$ ,  $[-0,877; -0,292)$ ,  $(-1,314; -0,877)$ , позначаючи низький (I), незначний (II), помірний (III), високий (IV) та надмірний (V) ступені вразливості водних ресурсів відповідно.

**Висновки.** Стан водної системи зазвичай змінюється від пошкодженого до відновлення через природні чинники, після чого відбувається перехід від стану відновлення до стану рівноваги переважно через штучні фактори. Перше визначається як природна стійкість, а друге – як штучне пристосування. Результати цього механізму пропонують необхідне розуміння вразливості водних ресурсів у мінливому середовищі, механізм процесу трансформації між чотирма станами є центром подальших досліджень.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** вразливість водних ресурсів, ентропія зв'язку, зміна середовища, парний аналіз множини

**Як цитувати:** Безсонний В. Л. Метод аналізу вразливості водних ресурсів у нестабільному середовищі на основі ентропійного підходу. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2023. Вип. 39. С. 65 - 76. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-39-06>

**In cites:** Bezsonnyi, V. L. (2023). Method for analyzing the vulnerability of water resources in an unstable environment based on the entropy approach. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (39), 65 - 76. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-39-06> (In Ukrainian)

### Вступ

Концепція вразливості сягає своїм корінням у географію та дослідження природних небезпек, більше того — це ступінь ймовірності пошкодження системи через вплив небезпеки [1, 2]. На сьогодні вразливість вважається центральною концепцією в багатьох інших дослідницьких контекстах,

включаючи антропологію, соціологію, економіку, аерографію, екологію, управління та науку про сталий розвиток [3]. Існують дві ключові точки зору на вразливість водних ресурсів.

Перша полягає у дослідженні вразливості водних об'єктів певних типів, таких як

поверхневі води, підземні води, джерел питної води тощо. Так представлено глобальний аналіз вразливості міського водопостачання в 70 містах [4], що мають водопостачання з поверхневих джерел, у базовому стані (2010 р.) та майбутньому сценарії (2040 р.), який враховував збільшення попиту внаслідок зростання міського населення та прогнозованого сільськогосподарського попиту за нормальних кліматичних умов, але не враховував зміни клімату. Оцінено вразливість підземних вод [5] до забруднення внаслідок антропогенної діяльності та вторгнення морської води на основі більш надійного «індексу глобального ризику», а параметричні методи DRASTIC і GALDIT потім були пов'язані з новим індексом землекористування. Також визначено внутрішню вразливість підземних вод від забруднення за допомогою платформи ГІС і застосовано модель DRASTIC для району Ахмедабад в Гуджараті (Індія) [6], що також сприяє підтвердженню існування більш високих концентрацій забруднюючих речовин/індикаторів щодо статусу вразливості підземних вод району дослідження. Просторово нанесено на карту та проаналізовано водний слід Флагстаффа (Аризона, США) [7], використовуючи базу даних гідроелектрики США на рівні округу, яка може надати міським службам можливість операціоналізувати інформацію про водний слід міста для зменшення вразливості і підвищення стійкості. Оцінено потенційні наслідки зміни клімату та вразливість джерел води для підтримки прийняття обґрунтованих рішень у Мехіко [8]. Представлено кількісну національну оцінку доступності та вразливості води в містах для 225 міст США з населенням понад 100000 осіб [9]. Розроблений індекс вразливості водних ресурсів, представлений в роботі [10], стосується ринку водокористувачів та включає в себе показники вразливості обумовлені попитом і пропозицією.

Інша точка зору стосується дослідження вразливості та факторів, що впливають на водні системи. Розглядається також соціально-еколого-економічна система у взаємозв'язку «людина-довкілля». Основна мета цієї точки зору полягає в оцінці ступеню того, наскільки система сприйнятлива чи ні до несприятливих наслідків зміни клімату. Це включає мінливість клімату та екстремальні явища, враховані Міжурядовою

групою експертів зі зміни клімату (ІРСС) [11]. Крім того, зазначено, що вразливість до зміни клімату залежить від характеру, величини та швидкості кліматичних змін, яким піддається система, її здатності реагувати та адаптуватися. Індекс вразливості до зміни клімату як функцію фізичної вразливості, чутливості та здатності до адаптації представлено в роботі [12], а також обговорено його взаємозв'язок із підтримкою політики пом'якшення наслідків зміни клімату. А в роботі [13] встановлено структуру вразливості шляхом оцінки вразливості ( $V$ ) як функції впливу ( $E$ ), чутливості ( $S$ ) і адаптаційної здатності ( $AC$ ), де вплив на  $V$  за допомогою  $E$  і  $S$  можна узагальнити як зовнішні впливи ( $EI$ ). Результат оцінки вказує на різницю між поточною ситуацією та обраним сценарієм змін. Також представлено багатофункціональну систему індикаторів ієрархії [14], засновану на чутливості та адаптивності, і створено модель оцінки, модель аналітичного ієрархічного процесу, що об'єднує парний аналіз (АНПСА). Модель АНПСА використана для оцінки вразливості водних ресурсів Пекіна (Китай). Розроблено узагальнену методологічну основу оцінки вразливості для підтримки механізму спільного прийняття рішень у галузі управління водними ресурсами [15], приділяючи особливу увагу адаптації до зміни клімату. Це на додаток до полегшення роботи тих, хто активно працює в галузі управління водними ресурсами в країнах, що розвиваються, шляхом переходу до оперативних рішень. Також представлено контури формальної структури вразливості до зміни клімату, розробленої на основі граматичного дослідження [16], яке впливає з повсякденного значення вразливості до технічного споживання в контексті зміни клімату. Розроблено індекс вразливості водних ресурсів країни, який є сукупністю соціально-економічних і природних компонентів [17]. Цей підхід об'єднує позицію на рівні країни, враховуючи при цьому пов'язані з цим проблеми з енергією та продовольством, які можуть зменшити вразливість водних ресурсів. Проаналізовано стан вразливості системи водних ресурсів у Равалпінді та Ісламабаді (Пакистан) за допомогою аналітичного процесу ієрархії [18], маючи на увазі складний, інтегрований, комплексний та ієрархічний характер оцінки вразливості водних ресурсів. Концептуальну основу та

термінологію вразливості представлено в [3], що дає змогу розробити стислу характеристику будь-якої концепції вразливості та ключові відмінності між різними концепціями. Таким чином, подолано розрив між різними традиціями дослідження вразливості.

Мета роботи – синтез двох розглянутих вище дослідницьких поглядів. Для цього необхідно: визначити фактори водної системи, розглядаючи у взаємозв'язку антропогенну соціально-економічну систему та систему «людина-довкілля»; проаналізувати чотири процеси трансформації водної системи

в мінливому середовищі: чутливий стан, пошкоджений стан, стан відновлення та стан рівноваги.

Ключовий вплив природних факторів визначено як природна стійкість, яка пов'язана з переходом від пошкодженого стану до стану відновлення. Основна дія штучних факторів визначається як штучна адаптація, спрямована на перехід від стану відновлення до стану рівноваги. Також проведені дослідження вразливості водних ресурсів за чутливістю до синтезу ( $S$ ), природної стійкості ( $R$ ) та штучної адаптації ( $A$ ).

### *Механізм вразливості водних ресурсів у мінливому середовищі.*

Дослідження вразливості приділяють значну увагу реакції та стійкості антропогенної соціально-економічної системи у відповідь на небезпечні ситуації. Відповідно, поняття вразливості повинно включати вплив, чутливість, адаптацію та стійкість, коли система порушена, зруйнована або зазнала впливу. Розглянемо концепцію вразливості водних ресурсів, яка є станом системи водних ресурсів, у якій нормальна структура та функція порушуються мінливим середовищем. Вразливість також включає в себе чутливість і адаптацію до порушень і руйнування в мінливому середовищі, здатність переносити і справлятися з такими змінами, а також рівень стійкості до пошкоджень [12-14, 19].

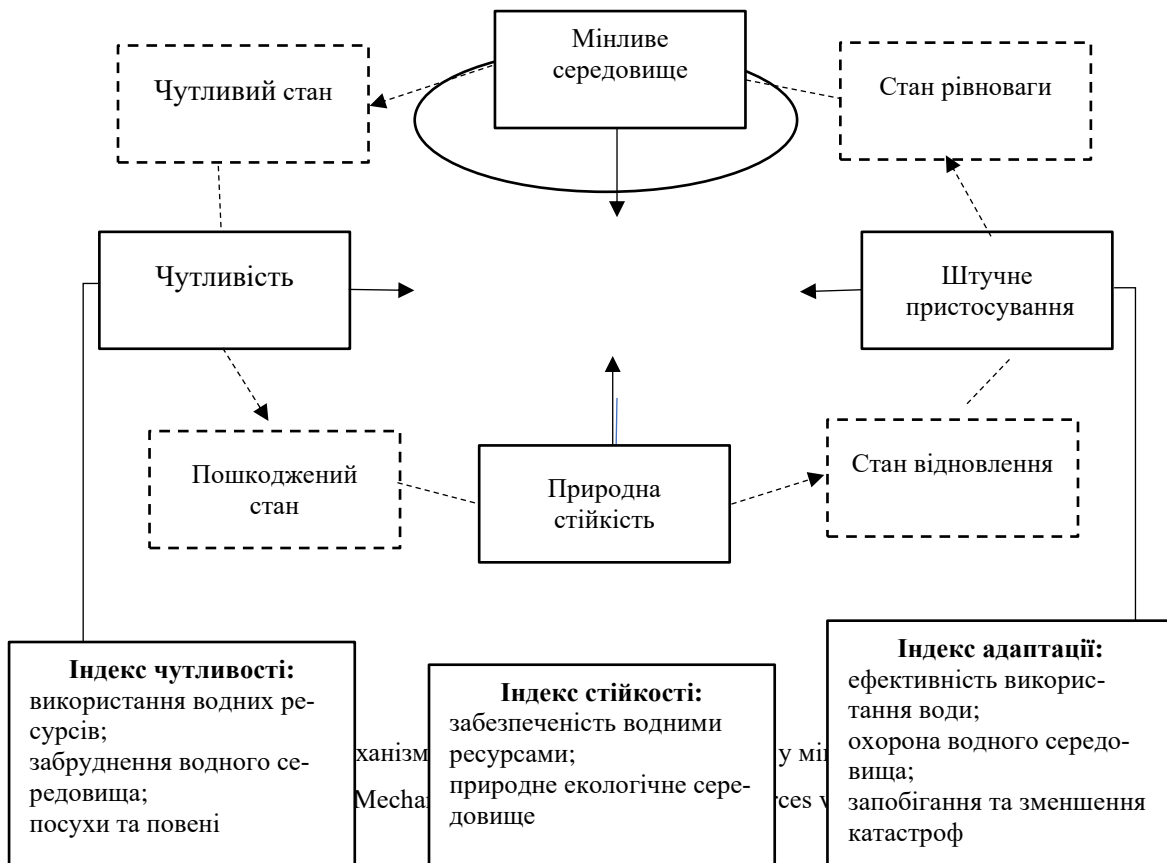
У механізмі трансформації водна система може перебувати в чотирьох станах: чутливий стан, пошкоджений стан, стан відновлення та стан рівноваги. Водна система зазнає змін через втручання та руйнування мінливого навколишнього середовища, на додаток до впливу факторів зміни навколишнього середовища. Таким чином, можна сказати, що система водопостачання знаходиться в чутливому стані. Ступінь зміни чутливого стану є результатом чутливості водних ресурсів [20], вираженою чутливими факторами. Можна сказати, що водна система перебуває в пошкодженому стані внаслідок втручання та руйнування навколишнього середовища. У цьому сценарії водна система здатна саморегулюватися та відновлюватися через системні фактори, наприклад, такими як забезпеченість водними ресурсами та природне екологічне середовище. Ця здатність до саморегулювання та відновлення називається природною стійкістю, яка є адаптацією у відповідь на вплив середовища [20].

Природна стійкість – це потужність водної системи, хоча вона має відносну слабкість. Система здатна до самовідновлення, коли ступінь пошкодження слабкий, але, перебуваючи в пошкодженому стані, вона не може відповідати вимогам соціально-економічного розвитку та екологічного середовища, якщо пошкодження перевищує природну здатність відновлення. Саме з цієї причини ми повинні зменшити потребу у воді разом із соціально-економічним розвитком та екологічним середовищем шляхом коригування людської поведінки та режиму соціально-економічного розвитку. Це робиться за допомогою поліпшення, наприклад, екологічного середовища для адаптації до пошкодженого стану, що визначається як штучна або соціальна адаптація. Штучна адаптація – це здатність водних систем, людей, соціальної економіки та довкілля пристосовуватися до потенційної шкоди, використовувати можливості або реагувати на наслідки [21]. Ступінь пошкодження водної системи постійно зменшується шляхом спільної дії природного відновлення та штучної адаптації, крім того, що система є системою відносної рівноваги. Цей стан рівноваги є динамічним, коли система перебуває в мінливому середовищі. Найкращим станом для відновлення пошкодженої водної системи є стан до зміни навколишнього середовища. Загалом, досягти оптимального стану досить важко, тому може бути легшою справою сформулювати нову водну систему в мінливому середовищі. Механізм вразливості водних ресурсів у мінливому середовищі представлений на рис. 1.

**Чутливість.** Водні системи зазнають впливу навколишнього середовища та

руйнування. До таких факторів впливу на-самперед належать використання водних ре-сурсів, забруднення водного середовища, по-сухи та повені. Чутливість водних ресурсів визначається і виражається індексом чутли-вості, який розглядає рівень використання води (тобто співвідношення споживання води до наявності водних ресурсів),

інтенсивність викидів промислових стічних вод (скидання промислових стічних вод до ВВП), скидання стічних вод на душу насе-лення (скидання побутових стічних вод на загальну кількість населення), а також част-ка економічних втрат від водних лих у ВВП (економічні збитки від посух і повеней у ВВП), табл. 1.



Індекс чутливості водних ресурсів

Таблиця 1

Sensitivity Index of water resources

Table 1

Фактор чутливості	Індекс чутливості
Використання водних ресурсів ( $x_1$ )	Рівень використання води (%)
Забруднення водного середовища ( $x_2, x_3$ )	Інтенсивність викидів промислових стічних вод ( $t/10^4$ ) Скидання стічних вод на душу населення ( $t/особу$ )
Посуха і повені ( $x_4$ )	Частка економічних збитків від водних катастроф у ВВП (%)

Запропоновано функцію чутливості водних ресурсів  $S(x)$  для кількісного визна-чення чутливості, яка виражається наступ-ним чином:

$$S(x) = S(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (1)$$

де  $S(x)$  – чутливість водних ресурсів,

$x_1$  – коефіцієнт використання води;  
 $x_2$  – інтенсивність викидів промислових сті-чних вод;  
 $x_3$  – скид стічних вод на душу населення;  
 $x_4$  – частка економічних втрат від водних лих до ВВП.

**Природна стійкість.** Водна система переходить у пошкоджений стан через втручання та руйнування навколишнього середовища. Пошкоджена водна система здатна саморегулюватися та відновлюватися за допомогою запасу водних ресурсів, екологічної якості води, якості екологічного середовища та інших факторів, спрямованих на відновлення пошкодженої водної системи. Ця здатність до саморегулювання та відновлення

пошкодженої водної системи обумовлена та виражається індексом стійкості, який розглядає одиницю площі доступних водних ресурсів (тобто співвідношення наявних водних ресурсів до національної територіальної площі), якість поверхневих вод навколишнього середовища (тобто коефіцієнт обводнення ділянки моніторингу) та лісистість (табл. 2).

Індекс стійкості водних ресурсів  
Sustainability Index of of water resources

Таблиця 2

Table 2

Фактор стійкості	Індекс стійкості
Забезпеченість водними ресурсами ( $x_5$ )	Доступна кількість водних ресурсів на одиницю площі ( $10^4 \cdot \text{м}^3/\text{км}^2$ )
Екологічна якість води ( $x_6$ )	Якість поверхневих вод (%)
Екологічна якість довкілля ( $x_7$ )	Лісистість (%)

Для кількісної оцінки природної стійкості пропонується функція природної стійкості водних ресурсів  $R(x)$ , яка виглядає таким чином:

$$R(x) = R(x_5, x_6, x_7) \quad (2)$$

де  $x_5$  — доступна вода на одиницю площі ресурсів;

$x_6$  — якість середовища поверхневих вод;

$x_7$  — лісистість.

**Штучна адаптація.** Природна стійкість водних ресурсів обмежена. Водна система залишається в пошкодженому стані, коли збиток перевищує природну здатність відновлення. У цій ситуації необхідно вживати заходів, щодо адаптації до змін навколишнього середовища, наприклад, підвищуючи ефективність використання води, посилюючи захист водного середовища, запобігаючи стихійним лихам і зменшуючи їх з метою адаптації до пошкодженого стану. Ця штучна адаптація обумовлена і виражається адаптивним індексом, який включає в себе

споживання води на одиницю ВВП (відношення споживання води до ВВП), рівень відповідності промислових стічних вод і ступінь очищення міських стічних вод (стандарт скиду промислових стічних вод) та міські стічні води, а також економічні вигоди від контролю за повеннями та боротьби з посухами (економічні вигоди від запобігання та пом'якшення наслідків стихійних лих) табл. 3.

Запропоновано функцію штучної адаптації водних ресурсів  $A(x)$  для кількісної оцінки штучної адаптації, яка представлена рівнянням:

$$A(x) = A(x_8, x_9, x_{10}, x_{11}) \quad (3)$$

де  $x_8$  — споживання води на одиницю ВВП;

$x_9$  — рівень відповідності промислових стічних вод;

$x_{10}$  — швидкість очищення міських стічних вод;

$x_{11}$  — економічні вигоди від повеней контроль і боротьба з посухою.

Адаптивний індекс водних ресурсів

Таблиця 3

Adaptive index of water resources

Table 2

Адаптивний фактор	Адаптивний індекс
Ефективність використання води ( $x_8$ )	На одиницю ВВП споживання води ( $\text{м}^3/10^4$ )
Охорона водного середовища ( $x_9, x_{10}$ )	Рівень відповідності промислових стічних вод (%) Рівень очищення міських стічних вод (%)
Запобігання та зменшення катастроф ( $x_{11}$ )	Економічні переваги боротьби з повеннями та посухою ( $10^8$ )

**Вразливість водних ресурсів у мінливому середовищі.** Вразливість водних ресурсів у мінливому середовищі ( $V$ ) є синтетичним ефектом трьох елементів, а саме чутливості водних ресурсів ( $S$ ), природної стійкості ( $R$ ) та штучної адаптації ( $A$ ), і виглядає таким чином:

$$V(x) = f[S(x), R(x), A(x)] \quad (4)$$

де  $V$  – вразливість водних ресурсів у мінливому середовищі;

$S(x)$  – чутливість;

$R(x)$  – природна стійкість;

$A(x)$  – штучна адаптація.

### Методологія ентропійного підходу

**Ентропія** — це поняття, яке широко використовується в природничих і соціальних науках. Воно було розроблено і вдосконалено у цих галузях, незважаючи на те, що є простим описом термодинамічної концепції, яка бере свій початок у фізичних дослідженнях. Еволюція ентропії є, по суті, розширенням «стану», який є «функцією стану» в термодинаміці. Ентропія необхідна для того, щоб охарактеризувати атрибути функції всього стану з використанням методу «математичної аналогії». Визначення ентропії зв'язку також пропонується методом «математичних аналогій».

Поняття ентропії було введено в термодинаміку Клаузіусом у 1854 році. Спочатку він використовував термін «значення еквівалентності» для визначення цього поняття. З погляду статистичної механіки ентропія системи дорівнює логарифму числа  $W$  доступних мікростанів, що відповідають макроскопічному стану цієї системи:

$$S = k \ln W \quad (5)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;

$W$  – кількість мікростанів, що відповідають заданому рівноважному макростану.

Використання інтуїтивно зрозумілої логарифмічної міри для інформації вперше введено Хартлі [22], ним висунуто припущення, що самоінформативність події зростає зі зростанням її невизначеності, це додатково означає, що ймовірність появи цієї події зменшується. У цьому відношенні  $S$  називають мірою невизначеності.

Шредінгер [23] висунув припущення щодо локального зменшення ентропії для живих систем, коли ( $1/D$ ) представляє собою стани, які перешкоджають випадковому розподілу:

$$-S = k \ln(1/D) \quad (6)$$

де  $D$  – кількість можливих енергетичних станів у системі, які можуть бути випадковим чином заповнені енергією.

Крім того,  $D$  вказує на міру безладу, а його зворотне значення  $1/D$  можна розглядати як пряму міру порядку.

У 1948 році Шеннон [24] опублікував свою відому статтю під назвою «Математична теорія комунікації», в якій він ввів ентропію дискретного розподілу ймовірностей ( $p_1, p_2, \dots, p_n$ ), подаючи функцію  $H$  такого вигляду:

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (7)$$

де  $K$  – додатна константа, що, відіграє центральну функцію в теорії інформації як міри інформації, вибору та невизначеності [24].

У 1972 році дослідники [25] знову оприлюднили концепцію ентропії для скінченних нечітких множин, подібну до ентропії Шеннона, хоча й концептуально зовсім іншу, де діапазон є набором невід'ємних дійсних чисел.

У 1992 році [26] запропоновано концепції ідентичної ентропії, ентропії розбіжності, ентропії протилежності та ентропії зв'язку на основі визначення традиційної ентропії для вимірювання ідентичності, різноманітності, протилежностей та асоціативності систем, які містять  $n$  пар множин.

**Ентропія зв'язку.** Аналіз пар множин (АПМ) – це новий підхід до системного аналізу, запропонований [1]. АПМ розглядає як визначеність, так і невизначеність як систему з метою проведення аналізу ідентичних розбіжностей і протилежностей, а також подальшого кількісного математичного аналізу з використанням кількості зв'язків. Завдяки своєму реалістичному підходу до роботи з невизначеністю АПМ знайшов широке застосування в соціології, економіці, інженерних технологіях та менеджменті, і приніс численні результати досліджень [14, 27-30].

У випадку окремих питань було проведено аналіз ідентичності, розбіжності та протилежності пар наборів “ $H$ ” для заданих умов, які описують зв’язок між визначеністю та невизначеністю. Вираз відносно пари множин “ $H$ ” представлено таким чином [1]:

$$u = a + bI + cJ \quad (8)$$

де  $a, b, c \in [0, 1]$  і  $a + b + c = 1$ ;  
 $a$  – ідентичний ступінь пари множин  $H$ ;  
 $b$  – ступінь невідповідності;  
 $c$  – зворотний ступінь;  
 $I$  – коефіцієнт невідповідності,  $I \in [-1, 1]$ ;  
 $J$  – коефіцієнт зворотності, який дорівнює  $-1$ , іноді його можна розглядати лише як знак протилежності.

У цьому випадку досягається  $n$  ступенів зв’язку:  $u_1 = a_1 + b_1I_1 + c_1J_1$ ,  $u_2 = a_2 + b_2I_2 + c_2J_2$ , ..., та  $u_n = a_n + b_nI_n + c_nJ_n$  шляхом аналізу  $n$  пар множин.

Ідентична ентропія визначається наступним чином:  $S_s = \sum_{i=1}^n a_i \ln a_i$ , ентропія невідповідності так:  $S_f = \sum_{i=1}^n b_i \ln b_i \times I$ , зворотна ентропія:  $S_p = \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i \times J$ , а ентропія зв’язку наступним чином [1]:

$$S = S_s + S_f + S_p = \sum_{i=1}^n a_i \ln a_i + \sum_{i=1}^n b_i \ln b_i \times I + \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i \times J \quad (9)$$

Ентропія — це «функція стану» системи, яка вважається мірою випадковості або безладу. Варіація термодинамічної ентропії розглядалася як міра варіації недоступної енергії. Статистична ентропія характеризуватиме (відносно макростану, відповідно до наданого закону ймовірності) нашу невизначеність щодо набору всіх мікроскопічних експериментів, які можуть бути задумані.

### Метод аналізу вразливості водних ресурсів на основі ентропії зв’язку

Як представлено в рівнянні (8), число зв’язків встановлюється на основі відмінностей: ідентичності, невідповідності і зворотності, що називають числом зв’язків ідентичності-невідповідності-зворотності.

На практиці недостатньо розділити описаний об’єкт на три компоненти, тому важливо розширити базовий вираз контактного числа (рівняння (8)), щоб включити більше вимірів, які називають пластичністю з’єднання. Число, що розширює число зв’язків визначається [31]:

Інформація про ентропію Шеннона є мірою невизначеності або інформацією про випадкові події. Точніше, це міра невизначеності результатів тесту до тесту рандомізації або обсягу інформації в події, що слідує після події. Нечітка ентропія є мірою нечіткості системи.

Таким же чином, ідентична ентропія є мірою безладу. Крім того, ентропія невідповідності є мірою порядку, а зворотна ентропія є хаотичною мірою невизначених систем [23]. Невідповідність включає тотожні та протилежні ступені зв’язку, тому ентропія невідповідності є комплексною ентропією, яка містить ідентичну ентропію та зворотну ентропію. Різницю можна відокремити за допомогою пластичності ступеня зв’язку. Таким чином, ентропія поділяється на ідентичну ентропію, ентропія невідповідності та зворотну ентропію.

Досить важливо покращити кореляційну ентропію, як це визначено в [1], оскільки логарифмічна функція не має смислу, якщо  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , дорівнюють нулю у ступені зв’язку. Загальний вираз покращення ентропії зв’язку наводиться наступним чином:

$$S = \sum_{i=1}^n a_i \ln(a_i + e) + \sum_{i=1}^n b_i \ln(b_i + e) \times I + \sum_{i=1}^n c_i \ln(c_i + e) \times J \quad (10)$$

де  $S_s = \sum_{i=1}^n a_i \ln(a_i + e)$  – ідентична ентропію;

$S_f = \sum_{i=1}^n b_i \ln(b_i + e) \times I$  – ентропія невідповідності;

$S_p = \sum_{i=1}^n c_i \ln(c_i + e) \times J$  – зворотна ентропія.

$$u = (a_1 + a_2 + \dots + a_r) + (b_1I_1 + b_2I_2 + \dots + b_sI_s) + (c_1J_1 + c_2J_2 + \dots + c_tJ_t) \quad (11)$$

де  $a_x, b_y, c_z$  – компоненти зв’язку,  $a_x, b_y, c_z \in [0, 1]$ ;

$\sum a_x + \sum b_y + \sum c_z = 1$ ;

$I_1, I_2, \dots, I_s$  – коефіцієнти невідповідності,  $I_1, I_2, \dots, I_s \in [-1, 1]$ ;

$J_1, J_2, \dots, J_t$  – коефіцієнти зворотних ступенів, що дорівнюють мінус одиниці.

На основі рівняння (11) число зв'язків та побудова ієрархічної структури числа зв'язків ідентичності-невідповідності-зворотності можна виразити таким чином:

$$u = a_1 + a_2 + b_1 I_1 + b_2 I_2 + b_3 I_3 + c_1 J_1 + c_2 J_2 \quad (12)$$

де  $a_1$  і  $a_2$  представляють ідентичний ступінь і частковий диференціал ідентичного ступеню, відповідно, і їх коефіцієнти можна вважати одиничними.

$b_1 I_1, b_2 I_2$  та  $b_3 I_3$  вказують частково подібні, середні та частково протилежні ступені невідповідності, відповідно, а їх коефіцієнти  $I_1 \in [-1, 0], I_2 \in [-0,5, 0,5],$  та  $I_3 \in [0, 1];$

$c_1 J_1$  та  $c_2 J_2$  – частковий диференціал зворотного ступеню і зворотний ступінь відповідно, а  $J_1, J_2$  є їхніми коефіцієнтами, які регулюються таким чином, щоб бути рівними мінус одиниці.

Вразливість водних ресурсів зазвичай поділяється на п'ять рівнів [14, 19], і припускаючи, що  $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$  позначає індексну вибірку, а  $s_{kj} (k = 0, 1, 2, \dots, 5)$  порогове значення стандарту, число зв'язків методу ієрархії ідентичності-невідповідності-зворотності описується таким чином [31]:

$$\begin{cases} \frac{x_{ij}-s_{1j}}{2(s_{0j}-s_{1j})} + 0.5 + \frac{x_{0j}-s_{1j}}{2(s_{0j}-s_{1j})} I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 0J_1 + 0J_2, & x_{ij} \in \text{рівень I} \\ 0 + \frac{x_{ij}-s_{2j}}{2(s_{1j}-s_{2j})} + 0.5I_1 + \frac{x_{1j}-s_{2j}}{2(s_{1j}-s_{2j})} I_2 + 0I_3 + 0J_1 + 0J_2, & x_{ij} \in \text{рівень II} \\ 0 + 0 + \frac{x_{ij}-s_{3j}}{2(s_{2j}-s_{3j})} I_1 + 0.5I_2 + \frac{x_{2j}-s_{3j}}{2(s_{2j}-s_{3j})} I_3 + 0J_1 + 0J_2, & x_{ij} \in \text{рівень III} \\ 0 + 0 + 0I_1 + \frac{x_{ij}-s_{4j}}{2(s_{3j}-s_{4j})} I_2 + 0.5I_3 + \frac{x_{3j}-s_{4j}}{2(s_{3j}-s_{4j})} 0J_1 + 0J_2, & x_{ij} \in \text{рівень IV} \\ 0 + 0 + 0I_1 + 0I_2 + \frac{x_{ij}-s_{5j}}{2(s_{4j}-s_{5j})} I_3 + 0.5J_1 + \frac{x_{4j}-s_{5j}}{2(s_{4j}-s_{5j})} 0J_2, & x_{ij} \in \text{рівень V} \end{cases} \quad (13)$$

де  $x_{ij}$  – значення  $i$ -ї вибірки в  $j$ - му індексі;  
 $s_{kj} (k = 0, 1, 2, \dots, 5)$   $k$ -й стандарт значення вузла в тому самому індексі;  
 $I_1, I_2, I_3, J_1, J_2$  – теж саме, що у рівнянні (12).

**Ентропія зв'язку індексу вразливості.** Індекс вразливості водних ресурсів розглядається як множина  $A = \{x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)\}$ , а пороги ступеня вразливості розглядаються як множина  $B_k = \{s_{kj} (k = 0, 1, 2, \dots, 5)\}$ ; після цього два набори складають пару  $H_k = (A, B_k)$ .

Число зв'язків індексу вразливості за рівнянням (13), а потім і ентропія зв'язку індексу вразливості описані таким чином:

$$\begin{aligned} S_{ij} = & a_{1ij} \ln(a_{1ij} + e) + a_{2ij} \ln(a_{2ij} + e) + \\ & + b_{1ij} \ln(b_{1ij} + e) \times I_1 + b_{2ij} \ln(b_{2ij} + e) \times I_2 + \\ & + b_{3ij} \ln(b_{3ij} + e) \times I_3 + \\ & + c_{1ij} \ln(c_{1ij} + e) \times J_1 + \\ & + c_{2ij} \ln(c_{2ij} + e) \times J_2 \end{aligned} \quad (14)$$

де  $S_{s1} = a_{1ij} \ln(a_{1ij} + e)$  – ідентична ентропія;  
 $S_{s2} = a_{2ij} \ln(a_{2ij} + e)$  – критична ідентична ентропія;

$S_{f1} = b_{1ij} \ln(b_{1ij} + e) \times I_1$  – верхня ентропія невідповідності;

$S_{f2} = b_{2ij} \ln(b_{2ij} + e) \times I_2$  – передбачає середня ентропія невідповідності;

$S_{f3} = b_{3ij} \ln(b_{3ij} + e) \times I_3$  – нижня ентропію невідповідності;

$S_{p1} = c_{1ij} \ln(c_{1ij} + e) \times J_1$  є – критична зворотна ентропію;

$S_{p2} = c_{2ij} \ln(c_{2ij} + e) \times J_2$  – зворотна ентропія.

**Синтез зв'язку ентропії вразливості водних ресурсів.** Загалом, відповідно до значущості індексу вразливості, надаються відповідні ваги для інтегрованої вразливості. Отже, використовуючи переваги адитивно-зваженого методу синтезу (методу середнього), мультиплікативно-зваженого методу синтезу (методу геометричного середнього) або адитивно-мультиплікативно-зваженого методу синтезу [32–35], ентропія зв'язку одного індексу помножується з метою генерації інтегрованого зв'язку ентропії  $S_i$ . Це виражається як:

$$S_i = \prod_{j=1}^m w_j \times S_{ij} \quad (15)$$

де  $\Pi$  – метод синтезу системи;  
 $w_j$  – вага  $j$ - го індексу вразливості.



**Критерій прийняття рішення щодо вразливості водних ресурсів.** Ступінь вразливості водних ресурсів щодо мінливого середовища можна розділити на п'ять рівнів з 11 індексами: низький (I), незначний (II), помірний (III), високий (IV) і екстремальний (V). Розрахунок контактної ентропії за допомогою рівняння (14) показує приблизне

значення контактної ентропії  $S$  із діапазоном  $(-1,314; 1,314)$ . Цей інтервал ділиться на п'ять частин:  $[0,877; 1,314)$ ,  $[0,292; 0,877)$ ,  $[-0,292; 0,292)$ ,  $[-0,877; -0,292)$ ,  $(-1,314; -0,877)$ , позначаючи низький (I), незначний (II), помірний (III), високий (IV) та надмірний (V) ступені вразливості водних ресурсів, відповідно.

### Висновки

Розглянуто механізм вразливості водних ресурсів у мінливому середовищі. Увагу зосереджено на аналізі чотирьох ключових станів водної системи: чутливий стан, пошкоджений стан, стан відновлення та стан рівноваги. Стан водної системи зазвичай змінюється від пошкодженого до відновлення через природні чинники, після чого відбувається перехід від стану відновлення до стану

рівноваги переважно через штучні фактори. Перше визначається як природна стійкість, а друге – як штучне пристосування. Результати цього механізму пропонують необхідне розуміння вразливості водних ресурсів у мінливому середовищі, механізм процесу трансформації між чотирма станами є центром майбутніх досліджень.

### Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

### Список використаної літератури

1. Zhao K.Q. Set Pair Analysis and Preliminary Application; *China Science Technology Press*: Hangzhou, China, 2000.
2. Turner B.L., II; Kasperson R.E.; Matson P.A.; McCarthy J.J.; Corell R.W.; Christensen L.; Eckley, N.; Kasperson J.X.; Luers A.; Martello M.L.; et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2003. Vol. 100. P. 8074–8079. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
3. Fussler H.M. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Glob. Environ. Chang.* 2007. Vol. 17. P. 155–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002>
4. Padowski J.C.; Gorelick S.M. Global analysis of urban surface water supply vulnerability. *Environ. Res. Lett.* 2014. Vol. 9. 104004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104004>
5. Allouchea N.; Maanab M.; Gontaraa M.; Rollob N.; Jmala I.; Bouria S. A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. *Environ. Model. Softw.* 2017. Vol. 88. P. 168–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.023>
6. Khakhar M.; Ruparelia J.P.; Vyas A. Assessing groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC model for Ahmedabad district, India. *Environ. Earth Sci.* 2017. Vol. 76. P. 440. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6761-z>
7. Rushforth R.R.; Ruddell B.L. The vulnerability and resilience of a city's water footprint: The case of Flagstaff, Arizona, USA. *Water Resour. Res.* 2016. Vol. 52. P. 2698–2714. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015WR018006>
8. Martinez S.; Kralisch S.; Escolero O.; Perevochtchikova M. Vulnerability of Mexico City's water supply sources in the context of climate change. *J. Water Clim. Chang.* 2015. Vol. 6. P. 518–533. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.083>
9. Padowski J.C.; Jawitz J.W. Water availability and vulnerability of 225 large cities in the United States. *Water Resour. Res.* 2012. Vol. 48. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012WR012335>
10. Sullivan C.A. Quantifying water vulnerability: A multi-dimensional approach. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 2011. Vol. 25. P. 627–640. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0426-8>
11. McCarthy J.J.; Canziani O.F.; Leary N.A.; Dokken D.J.; White K.S. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2001.
12. Safi A.S.; Smith W.J.; Liu Z. Vulnerability to climate change and the desire for mitigation. *J. Environ. Stud. Sci.* 2016. Vol. 6. P. 503–514. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13412-016-0384-7>

13. Liersch S.; Cools J.; Kone B.; Koch H.; Diallo M.; Reinhardt J.; Fournet S.; Aich V.; Hattermann F.F. Vulnerability of rice production in the Inner Niger Delta to water resources management under climate variability and change. *Environ. Sci. Policy* 2013. Vol. 34. 18–33. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.10.014>
14. Yang X.H.; Sun B.Y.; Zhang J.; Li M.S.; He J.; Wei Y.M.; Li Y.Q. Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China. *Nat. Hazards*. 2016. Vol. 84. P. 63–76. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1932-2>
15. Gain A.K.; Giupponi C.; Renaud F.G. Climate Change Adaptation and Vulnerability Assessment of Water Resources Systems in Developing Countries: A Generalized Framework and a Feasibility Study in Bangladesh. *Water*. 2012. Vol. 4. P. 345–366. DOI: <https://doi.org/10.3390/w4020345>
16. Ionescu C.; Klein R.J.T.; Hinkel J.; Kumar K.S.K.; Klein R. Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change. *Environ. Model. Assess.* 2009. Vol. 14. P. 1–16. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10666-008-9179-x>
17. Al-Saïdi M.; Birnbaum D.; Buriti R.; Diek E.; Hasselbring C.; Jimenez A.; Woinowski D. Water Resources Vulnerability Assessment of MENA Countries Considering Energy and Virtual Water. *Procedia Eng.* 2016. Vol. 145. P. 900–907. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.117>
18. Shabbir R.; Ahmad S.S. Water resource vulnerability assessment in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan using Analytic Hierarchy Process (AHP). *J. King Saud Univ. Sci.* 2016. Vol. 28. P. 293–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.09.007>
19. Pan Z.; Jin J.; Wu K.; Res K.D. Earch on the Indexes and Decision Method of Regional Water Environmental System Vulnerability. *Resour. Environ. Yangtze Basin*. 2014. Vol. 23. P. 518–525. DOI:<http://dx.doi.org/10.11870/cjlyzyyhj201404011>
20. Field C.B.; Barros V.R.; Dokken D.J.; Mavh K.J.; Mastrabrea M.D.; Bili, T.E.; Chatterjee M.; Ebi K.L.; Estrada Y.O.; Genova R.C.; et al. (Eds.) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2014.
21. Hassan R.; Scholes R.; Ash N. (Eds.) Appendix D: Glossary. In *Ecosystems and Human Well-being: Current States and Trends*; Island Press: Washington, DC, USA. 2005. Vol. 1. P. 893–900.
22. Hartley R.V. Transmission of Information. *Bell Syst. Tech. J.* 1928. Vol. 7. P. 535–563. DOI:<http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1928.tb01236.x>
23. Schrödinger E. *What Is Life? The Physical Aspects of Living Cell*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1944.
24. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.* 1948. Vol. 27. 379–423. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
25. De Luca A.; Termini S. A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets. *Inf. Control*. 1972. Vol. 20. P. 301–312. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(72\)90199-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(72)90199-4)
26. Zhao K. Study on set pair analysis and entropy. *J. Zhejiang Univ.* 1992. Vol. 6, 65–72.
27. Su M.R.; Yang Z.F.; Chen B. Set pair analysis for urban ecosystem health assessment. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. Vol. 14. 1773–1780. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.07.019>
28. Wang W.; Jin J.; Ding J.; Li Y. A new approach to water resources system assessment—Set pair analysis method. *Sci. China Ser. E Technol. Sci.* 2009. Vol. 52. P. 3017–3023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11431-009-0099-z>
29. Kumar K.; Garg H. TOPSIS method based on the connection number of set pair analysis under interval-valued intuitionistic fuzzy set environment. *Comput. Appl. Math.* 2016. P. 1–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40314-016-0402-0>
30. Pan Z.; Wang Y.; Jin J.; Liu X. Set pair analysis method for coordination evaluation in water resources utilizing conflict. *Phys. Chem. Earth* 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2017.05.009>
31. Pan Z.; Wu C.; Jin J. *Set Pair Analysis Methods for Water Resource System Evaluation and Prediction*; Science Press: Beijing, China, 2016.
32. Jin J.; Wei Y. *Generalized Intelligent Evaluation Method for Complex System and Its Application*; Science Press: Beijing, China, 2008.
33. Безсонний В. Л. Третьяков О.В., Пляцук Л.Д., Некос А.Н. Ентропійний підхід до оцінки екологічного стану водотоку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2022. Вип. 27. С. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01>
34. Безсонний В., Третьяков О., Шерстюк М., Некос А. Термодинамічні аспекти системного підходу в екології. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2022. № 57. С. 268–281. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>
35. Безсонний В.Л. Методика оцінки екологічного стану водойми на основі ентропійно зваженого індексу якості води. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*, 2023. № 2(47). С. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.7>

Стаття надійшла до редакції 04.05.2023

Стаття рекомендована до друку 11.06.2023

V. L. BEZSONNYI, PhD (Technical),

Associate Professor of the Department of Environmental Safety and Environmental Education

e-mail: [bezsonny@gmail.com](mailto:bezsonny@gmail.com), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>

V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

## METHOD FOR ANALYZING THE VULNERABILITY OF WATER RESOURCES IN AN UNSTABLE ENVIRONMENT BASED ON THE ENTROPY APPROACH

**Purpose.** The synthesis of the method of analyzing the vulnerability of water resources based on the entropy of the connection based on the determination of the factors of the water system, considering the relationship between the anthropogenic socio-economic system and the "man-environment" system and the analysis of the transformation processes of the water system in a changing environment.

**Results.** The mechanism of vulnerability of water resources in a changing environment is analyzed. The structure of the vulnerability of water resources is established based on sensitivity, natural resistance and artificial adaptation by analyzing the four states of the water system: the sensitive state, the impaired state, the recovery state and the equilibrium state, and accompanying transformation processes. A method for analyzing the vulnerability of water resources based on contact entropy is proposed, which extends the concept of contact entropy. The degree of vulnerability of water resources to the changing environment can be divided into five levels with 11 indices: low (I), insignificant (II), moderate (III), high (IV) and extreme (V). Calculation of the contact entropy shows an approximate value of the contact entropy  $S$  with a range of  $(-1.314; 1.314)$ . This interval is divided into five parts:  $[0.877; 1.314)$ ,  $[0.292; 0.877)$ ,  $[-0.292; 0.292)$ ,  $[-0.877; -0.292)$ ,  $(-1.314; -0.877)$ , indicating low (I), insignificant (II), moderate (III), high (IV) and excessive (V) degrees of vulnerability of water resources, respectively.

**Conclusions.** The state of a water system usually changes from impaired to restored due to natural factors, followed by a transition from a state of restoration to a state of equilibrium mainly due to artificial factors. The first is defined as natural resilience, and the second as artificial adaptation. The results of this mechanism offer a necessary understanding of the vulnerability of water resources in a changing environment, the mechanism of the transformation process between the four states is the focus of further research.

**KEYWORDS:** *vulnerability of water resources, connection entropy, change of environment, pairwise set analysis*

### References

1. Zhao, K.Q. (2000). Set Pair Analysis and Preliminary Application; *China Science Technology Press*: Hangzhou, China.
2. Turner, B.L., II; Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 100, 8074–8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
3. Füssel, H.M. (2007). Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Glob. Environ. Chang.*, 17, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002>
4. Padowski, J.C., & Gorelick, S.M. (2014). Global analysis of urban surface water supply vulnerability. *Environ. Res. Lett.*, 9, 104004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104004>
5. Allouchea, N., Maanab, M., Gontaraa, M., Rollob, N., Jmala, I., & Bouria, S. (2017). A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. *Environ. Model. Softw.*, 88, 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.023>
6. Khakhar, M., Ruparelia, J.P., & Vyas, A. (2017). Assessing groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC model for Ahmedabad district, India. *Environ. Earth Sci.*, 76, 440. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6761-z>
7. Rushforth, R.R., & Ruddell, B.L. (2016). The vulnerability and resilience of a city's water footprint: The case of Flagstaff, Arizona, USA. *Water Resour. Res.*, 52, 2698–2714. <https://doi.org/10.1002/2015WR018006>
8. Martinez, S., Kralisch, S., Escolero, O., & Perevochtchikova, M. (2015). Vulnerability of Mexico City's water supply sources in the context of climate change. *J. Water Clim. Chang.*, 6, 518–533. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.083>
9. Padowski, J.C., & Jawitz, J.W. (2012). Water availability and vulnerability of 225 large cities in the United States. *Water Resour. Res.*, 48. <https://doi.org/10.1029/2012WR012335>
10. Sullivan, C.A. (2011). Quantifying water vulnerability: A multi-dimensional approach. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 25, 627–640. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0426-8>
11. McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., & White, K.S. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press: Cambridge, UK.
12. Safi, A.S., Smith, W.J., & Liu, Z. (2016). Vulnerability to climate change and the desire for mitigation. *J. Environ. Stud. Sci.*, 6, 503–514. <https://doi.org/10.1007/s13412-016-0384-7>

13. Liersch, S., Cools, J., Kone, B., Koch, H., Diallo, M., Reinhardt, J., Fournet, S., Aich, V., & Hattermann, F.F. (2013). Vulnerability of rice production in the Inner Niger Delta to water resources management under climate variability and change. *Environ. Sci. Policy*, 34, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.10.014>
14. Yang, X.H., Sun, B.Y., Zhang, J., Li, M.S., He, J., Wei, Y.M., & Li, Y.Q. (2016). Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China. *Nat. Hazards*, 84, 63–76. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1932-2>
15. Gain, A.K., Giupponi, C., & Renaud, F.G. (2012). Climate Change Adaptation and Vulnerability Assessment of Water Resources Systems in Developing Countries: A Generalized Framework and a Feasibility Study in Bangladesh. *Water*, 4, 345–366. <https://doi.org/10.3390/w4020345>
16. Ionescu, C., Klein, R.J.T., Hinkel, J., Kumar, K.S.K., & Klein, R. (2009). Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change. *Environ. Model. Assess.*, 14, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10666-008-9179-x>
17. Al-Saidi, M., Birnbaum, D., Buriti, R., Diek, E., Hasselbring, C., Jimenez, A., & Woinowski, D. (2016). Water Resources Vulnerability Assessment of MENA Countries Considering Energy and Virtual Water. *Procedia Eng.*, 145, 900–907. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.117>
18. Shabbir, R., & Ahmad, S.S. (2016). Water resource vulnerability assessment in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan using Analytic Hierarchy Process (AHP). *J. King Saud Univ. Sci.*, 28, 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.09.007>
19. Pan, Z., Jin, J., Wu, K., & Res, K.D. (2014). Earch on the Indexes and Decision Method of Regional Water Environmental System Vulnerability. *Resour. Environ. Yangtze Basin*, 23, 518–525. <http://dx.doi.org/10.11870/cjlyzyyhj201404011>
20. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mavh, K.J., Mastrabrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., et al. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.
21. Hassan, R., Scholes, R., & Ash, N. (2005). Appendix D: Glossary. In *Ecosystems and Human Well-being: Current States and Trends*, Island Press: Washington, DC, USA, 1, pp. 893–900.
22. Hartley, R.V. (1928) Transmission of Information. *Bell Syst. Tech. J.*, 7, 535–563. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1928.tb01236.x>
23. Schrödinger, E. (1944). *What Is Life? The Physical Aspects of Living Cell*, Cambridge University Press: Cambridge, UK.
24. Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, 27, 379–423. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
25. De Luca, A., & Termini, S. (1972). A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets. *Inf. Control.*, 20, 301–312. [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(72\)90199-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(72)90199-4)
26. Zhao, K. (1992) Study on set pair analysis and entropy. *J. Zhejiang Univ.*, 6, 65–72.
27. Su, M.R., Yang, Z.F., & Chen, B. (2009). Set pair analysis for urban ecosystem health assessment. *Commun. Non-linear Sci. Numer. Simul.*, 14, 1773–1780. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.07.019>
28. Wang, W., Jin, J., Ding, J., & Li, Y. (2009). A new approach to water resources system assessment—Set pair analysis method. *Sci. China Ser. E Technol. Sci.*, 52, 3017–3023. <http://dx.doi.org/10.1007/s11431-009-0099-z>
29. Kumar, K., & Garg, H. (2016). TOPSIS method based on the connection number of set pair analysis under interval-valued intuitionistic fuzzy set environment. *Comput. Appl. Math.*, 1–11. <http://dx.doi.org/10.1007/s40314-016-0402-0>
30. Pan, Z., Wang, Y., Jin, J., & Liu, X. (2017). Set pair analysis method for coordination evaluation in water resources utilizing conflict. *Phys. Chem. Earth*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2017.05.009>
31. Pan, Z., Wu, C., & Jin, J. (2016). *Set Pair Analysis Methods for Water Resource System Evaluation and Prediction*, Science Press: Beijing, China.
32. Jin, J., & Wei, Y. (2008). *Generalized Intelligent Evaluation Method for Complex System and Its Application*, Science Press: Beijing, China.
33. Bezsonnyi, V. L., Tretyakov, O. V., Plyatsuk, L. D., & Nekos, A. N. (2022). Entropy approach to assessment of the ecological state of a water course. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology»*, (27), 6–19. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01>
34. Bezsonnyi, V., Tretyakov, O., Sherstyuk, M., & Nekos, A. (2022). Thermodynamic aspects of the systems approach in ecology. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”*, (57), 268–281. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>
35. Bezsonnyi, V.L. (2023). Methods of assessment of the ecological status of a water body based on the entropy-weighted index of water quality. *Ecological Sciences: a scientific and practical journal*. 2(47), 44–48. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.7>

The article was received by the editors 04.05.2023

The article is recommended for printing 11.06.2023