

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ІНДЕКСУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ FUZZY ANP

Коркуц М. С.

Харківський національний університет міського господарства

імені О. М. Бекетова

вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків

Maksym.Korkuts@kname.edu.ua

Метою дослідження є методологічне вдосконалення процесу інтегральної оцінки екологічної безпеки територій населених пунктів через розробку та імплементацію інтегрального індексу екологічної безпеки (ІЕБ). Фундаментальна наукова проблема, що вирішується, полягає у необхідності переходу від статичного та суб'єктивного зважування до динамічного, об'єктивного та системно-орієнтованого механізму визначення пріоритетності екологічних загроз. Проведений критичний аналіз існуючих підходів до інтегрального індексування, які часто базуються на середньоарифметичному агрегуванні або спрощеному компаративному ранжуванні регіонів, засвідчив методологічну обмеженість. Зокрема, ці моделі ігнорують нелінійну, мережеву взаємодію та зворотні зв'язки між численними екологічними факторами, що є типовим для складних урбанізованих екосистем, а також не мають вбудованого апарату для об'єктивної обробки невизначеності моніторингових та експертних даних. Це призводить до потенційно невірної розстановки пріоритетів та низької адаптивності управлінських рішень.

Для усунення цих системних недоліків у роботі запропоновано гібридну методологію, аналітичний мережевий процес з нечіткою логікою, як інструментальну основу для створення інтелектуальної системи вибору вагових коефіцієнтів (ICBBK). Концепція ICBBK полягає у моделюванні екологічної безпеки як складної, взаємозалежної мережі кластерів показників, що дозволяє визначити істинний системний пріоритет через ітераційний розрахунок нечіткої надматриці. Інтеграція нечіткої логіки забезпечує надійну обробку лінгвістичних та числових невизначеностей при формуванні попарних порівнянь експертів, мінімізуючи суб'єктивізм, що є критично важливим для підвищення достовірності вихідних вагових коефіцієнтів.

Розроблено математичну модель ІЕБ, яка агрегує нормалізовані показники основних екологічних компонентів, що характеризують урбанізовані території, стан атмосферного повітря, якість водних ресурсів, забруднення ґрунтів та рівень фізичного, шумового навантаження. Інтеграція динамічних вагових коефіцієнтів, отриманих за допомогою ICBBK, забезпечує самокалібрування ІЕБ та його адаптивність до змінних екологічних пріоритетів регіону. Проведено концептуальне та теоретико-методологічне обґрунтування моделі та її функціональної структури. Отримані результати підтверджують актуальність запропонованого підходу, його потенційну здатність значно підвищити об'єктивність інтегральної оцінки та практичну значущість як ефективного інструменту для підвищення якості стратегічних та оперативних управлінських рішень у сфері забезпечення екологічної безпеки населених пунктів. *Ключові слова:* Інтегральний індекс, екологічна безпека, Fuzzy ANP, інтелектуальна система, вагові коефіцієнти, нечітка логіка, урбанізовані території, мережевий аналіз.

Methodological principles for forming an integral ecological safety index based on Fuzzy ANP. Korkuts M.

The objective of the research is the methodological improvement of the integral assessment process for ecological security in human settlements through the development and implementation of an integral ecological security index (IESI). The fundamental scientific problem addressed is the necessity of transitioning from static and subjective weighting to a dynamic, objective, and system-oriented mechanism for prioritizing ecological threats. A critical analysis of existing approaches to integral indexing, which are often based on arithmetic mean aggregation or simplified comparative regional ranking, has demonstrated their methodological limitations. Specifically, these models ignore the non-linear, network interaction and feedback loops among numerous ecological factors, which is typical for complex urbanized ecosystems, and they lack an embedded apparatus for the objective processing of uncertainty inherent in monitoring and expert data. This deficiency leads to a potentially inaccurate prioritization and low adaptability of management decisions.

To overcome these systemic shortcomings, the paper proposes a hybrid methodology the Fuzzy analytical network process, serving as the instrumental basis for creating an Intellectual system for selecting weighting coefficients (ISSWC). The ISSWC concept involves modeling ecological security as a complex, interdependent network of indicator clusters, which allows for the determination of the true systemic priority through the iterative calculation of a Fuzzy Supermatrix. The integration of fuzzy logic ensures robust processing of both linguistic and numerical uncertainties during expert pairwise comparisons, thereby minimizing subjectivism, which is critical for enhancing the reliability of the resulting weighting coefficients.

A mathematical model of IESI has been developed, which aggregates the normalized indicators of key ecological components characterizing urban territories: the state of atmospheric air, water resource quality, soil contamination, and the level of physical, noise pollution. The integration of dynamic weighting coefficients, obtained via the ISSWC, ensures the self-calibration of the IESI and its adaptability to changing regional ecological priorities. The conceptual and theoretical-methodological foundation of the model and its functional structure have been established. The results confirm the actuality and novelty of the proposed approach, its potential to significantly enhance the objectivity of the integral assessment, and its practical significance as an effective tool for

improving the quality of strategic and operational management decisions in the sphere of securing ecological safety in settlements. *Key words:* Integral index, ecological security, Fuzzy ANP, intellectual system, weighting coefficients, fuzzy logic, urban areas, network analysis.

Постановка проблеми. Ефективне управління екологічною безпекою територій населених пунктів вимагає наявності комплексного та достовірного інструменту оцінки. Таким інструментом є інтегральний індекс екологічної безпеки (ІЕБ), що агрегує численні показники стану навколишнього середовища. Проте, головною невирішеною проблемою залишається коректне зважування, визначення вагових коефіцієнтів цих показників. У більшості існуючих методик значення ваг фіксуються на основі суб'єктивних експертних опитувань або встановлюються рівномірно, що не відображає реальної динаміки та взаємозв'язків між екологічними ризиками в умовах інтенсивного антропогенного навантаження. Це призводить до потенційно невірних пріоритетів у розподілі ресурсів для мінімізації реальних загроз.

Актуальність дослідження. Актуальність зумовлена необхідністю подолання суб'єктивізму та забезпечення адаптивності оцінки екологічної безпеки. Розробка інтелектуальної системи, здатної автоматично та адаптивно визначати вагові коефіцієнти, забезпечує якісно новий рівень об'єктивізації оцінки та є декомпозицією методологічного підходу, оскільки забезпечує, мінімізацію впливу людського фактора; адекватне реагування індексу на регіональні пріоритети; науково обґрунтовану основу для систем підтримки прийняття рішень (СППР).

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження безпосередньо пов'язане із виконанням наукових завдань у сфері підвищення екологічної безпеки територій населених пунктів шляхом впровадження інтелектуальних систем. Воно створює якісно новий підхід до формування індикаторів екологічної безпеки, що є важливим державним завданням у контексті розробок НІСД та інших державних установ. Практична значущість полягає у можливості інтеграції розробленої ІСВБК у регіональні та національні системи екологічного моніторингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У світовій та вітчизняній науці активно розробляються методики інтегральної оцінки екологічної безпеки. Значна частина українських робіт, зокрема дослідження Клименка М. О. та Третьяка А. М. [1, 2], зосереджені на оцінці стану орних земель або землекористування, де інтегральний індекс розраховується переважно за середньоарифметичним значенням агрегованих показників. Подібний підхід ігнорує складну нелінійну взаємодію факторів.

Важливий внесок у методологію інтегральної оцінки на регіональному рівні зроблено Іванютою С. П. [3] та Бороносом В. Г. та Довгою Л. В. [4]. Ці автори пропонують системи індикаторів та методичні підходи до порівняльної оцінки регіонів за

рівнем екологічної безпеки або небезпеки. Проте, як зазначається і в інших роботах [5], їх підходи, хоча й системні, не вирішують проблему об'єктивного зважування показників, ваги або встановлюються на основі фіксованих нормативів, або є прихованими у процесі ранжування, що робить їх неадаптивними до конкретної ситуації на рівні населеного пункту та не дозволяє врахувати зворотні зв'язки.

Водночас, провідний європейський та світовий досвід оцінювання ризиків та безпеки демонструє стійкий перехід від лінійних моделей до гібридних інтелектуальних систем. Зокрема, у сфері оцінки ризиків складних виробничих та управлінських систем, які мають методологічні паралелі з екологічною безпекою, активно застосовуються методи, що поєднують аналітичний мережевий процес (ANP) та нечітку логіку (Fuzzy Logic) [6, 7]. Ці дослідження підтверджують, що традиційні двовимірні оцінки ризиків вже недостатні для складних систем. Моделі, подібні до Fuzzy ANP, дозволяють проводити динамічне оцінювання ризиків, ураховуючи як взаємозалежність, мережеву структуру елементів, так і внутрішню невизначеність експертних суджень і вхідних даних [8–11].

Саме цей напрямок – використання динамічного зважування показників за допомогою Fuzzy ANP, що долає статичність і суб'єктивність, є ключовим у сучасних дослідженнях та найбільш релевантним для вирішення проблеми об'єктивізації ІЕБ на рівні населених пунктів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Невирішеною залишається проблема створення динамічного, об'єктивного та структурованого механізму для визначення вагових коефіцієнтів w_j . Існуючі методики, не враховують мережеву, нелінійну взаємодію між екологічними факторами; не мають вбудованого механізму обробки невизначеності, нечіткості екологічних даних; є статичними, їх вагові коефіцієнти не реагують на зміну пріоритетних загроз.

Ця стаття саме присвячена розробці концепції гібридної інтелектуальної системи вибору вагових коефіцієнтів (Fuzzy ANP), яка спрямована на усунення цих ключових методологічних недоліків.

Новизна. Полягає у розробці математико-методологічних засад гібридної інтелектуальної системи вибору вагових коефіцієнтів (ІСВБК), що базується на Fuzzy ANP, а саме, аналітичному мережевому процесі з нечіткою логікою, що дозволяє, вперше змодельовати складну мережу зворотних зв'язків між екологічними факторами при формуванні ІЕБ; використовувати нечіткі множини для обробки невизначених даних, що мінімізує суб'єктивність експертних порівнянь; отримувати динамічний вектор

вагових коефіцієнтів для ПЕБ, який адаптується до регіональних пріоритетів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Пропонований метод ІСВБК, що ґрунтується на Fuzzy ANP, створює універсальну методологічну платформу для інтеграції принципів багатофакторного аналізу та штучного інтелекту в екологічну оцінку.

Викладення основного матеріалу. Структура інтегрального індексу екологічної безпеки (ПЕБ) ґрунтується на гібридній математико-методологічній моделі, яка поєднує принцип зваженого агрегування показників та інтелектуальну систему для динамічного визначення ваг. Концептуальна структура ПЕБ базується на гібридній математико-методологічній моделі, яка розроблена для подолання статичності та суб'єктивності традиційних підходів.

Структура ПЕБ використовує класичний принцип зваженої суми, але з інноваційним механізмом визначення ваг (1)

$$ПЕБ(T) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot N_i. \quad (1)$$

Де,

$ПЕБ(T)$ – фінальне значення інтегрального індексу на момент часу T ;

N_i – нормалізоване значення i -го часткового індикатора екологічної безпеки (стан повітря, води, ґрунту тощо).

ω_i – ваговий коефіцієнт i -го індикатора, який є динамічним і визначається інтелектуальною системою;

$$n - \text{кількість індикаторів } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1.$$

Вхідні дані для розрахунку складаються з набору первинних екологічних показників, які відображають чотири-п'ять основних компонентів безпеки урбанізованих територій.

При цьому, треба зауважити що існує ключова вимога, що усі первинні показники x_i повинні бути приведені до єдиного безрозмірного діапазону $[0, 1]$ (нормалізація), що дозволяє коректно їх агрегувати. Цей етап перетворює сирі дані (x_i) на нормалізовані індикатори (N_i).

При цьому, треба зауважити що існує ключова вимога, що усі первинні показники x_i повинні бути приведені до єдиного безрозмірного діапазону $[0, 1]$ (нормалізація), що дозволяє коректно їх агрегувати.

Цей етап перетворює сирі дані (x_i) на нормалізовані індикатори (N_i).

Концептуальне ядро ПЕБ, це інтелектуальна система вибору вагових коефіцієнтів (ІСВБК), яка замінює суб'єктивне або рівномірне зважування на об'єктивне, системне моделювання.

ІСВБК використовує аналітичний мережевий процес (ANP) у поєднанні з нечіткою логікою (Fuzzy Logic). Його особливість та відмінності можна зазначити таким чином. На відміну від ієрархічних методів (АНР), ANP процес моделює екологічну безпеку як складну мережу (net). Це дозволяє встановити та кількісно оцінити зворотні зв'язки та взаємозалежності між екологічними кластерами та індикаторами. Для проведення попарних порівнянь у мережі ANP експертами застосовуються нечіткі множини, що сприяє, адекватному врахуванню невизначеності і природної неточності екологічних даних та мінімізації суб'єктивності експертних суджень, які за своєю природою є нечіткими.

ІСВБК, шляхом ітераційного розрахунку нечіткої надматриці та її подальшої дефuzифікації, генерує динамічний вектор вагових коефіцієнтів ω_i . Перевагою цих ваг, є системне обґрунтування та адаптивність. Вони відображають не лише пряму важливість показника, а і його системний вплив на всю екологічну мережу. У випадку зміни пріоритетних загроз чи регіональних особливостей, перерахунок ІСВБК забезпечує самокалібрування ваг, підвищуючи актуальність ПЕБ.

Гібридна концепція ПЕБ забезпечує фундаментальну зміну методологічного підходу (табл 1).

Таким чином, концепція інтегрального індексу екологічної безпеки (ПЕБ) будується на засадах компенсаційної моделі агрегування, що забезпечує кількісну оцінку загального рівня безпеки на основі синтезу множини гетерогенних факторів. Формування ПЕБ має на меті подолання ключових методологічних недоліків традиційних лінійних моделей, зокрема статичності вагових коефіцієнтів та ігнорування системної взаємодії між екологічними індикаторами.

Ключова методологічна інновація ПЕБ полягає у заміні фіксованого вектора ваг на динамічний системний пріоритетний вектор ω_i , який генерується інтелектуальною системою вибору вагових коефіцієнтів (ІСВБК), що базується на гібридному методі Fuzzy ANP.

Таблиця 1

Концептуальні переваги структури

Перевага	Опис
Системність	Забезпечується ANP-моделлю, яка враховує нелінійну мережеву взаємодію факторів, що максимально наближає оцінку до реальних екологічних процесів
Об'єктивність	Досягається мінімізацією експертного суб'єктивізму завдяки використанню Fuzzy Logic для обробки неточних суджень
Адаптивність	Ваги ω_i не є статичними, а можуть бути динамічно перераховані для відображення змін пріоритетів загроз, що є критичним для СППР

ANP використовується для моделювання екологічної безпеки як складної мережі взаємозалежних кластерів та індикаторів, а не спрощеної ієрархії. Встановлюються зворотні зв'язки та внутрішня залежність між компонентами. Це імітує реальні екологічні процеси, де забруднення ґрунту впливає на якість ґрунтових вод, а рівень промислових викидів на якість повітря та здоров'я населення. Розрахунок ANP, через стабілізацію надматриці, дозволяє отримати граничний вектор пріоритетів, що відображає не лише важливість індикатора, але і його системний вплив на всю екологічну мережу.

Для обробки даних, що містять епістемічну невизначеність, неточність вимірювань, варіативність експертних суджень, застосовується нечітка логіка. Замість використання чітких чисел, як у традиційному АНП/ANP, для порівняння відносної важливості індикаторів, застосовуються трикутні нечіткі числа (TFNs). Це мінімізує суб'єктивізм експертів і дозволяє оперувати лінгвістичними оцінками. Отриманий нечіткий вектор пріоритетів перетворюється на чіткі вагові коефіцієнти ω_i за допомогою процедури дефузифікації, що забезпечує їхню придатність для фінальної формули ПЕБ.

Таким чином, ω_i у структурі ПЕБ не є довільною константою, а являє собою об'єктивну функцію системної пріоритетності індикатора в контексті мережових взаємозалежностей та внутрішньої невизначеності даних. Це забезпечує адаптивність та високу достовірність інтегральної оцінки.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. Обґрунтовано методологічну невідповідність традиційних підходів для формування адаптивного ПЕБ в урбанізованих територіях. Розроблено концепцію та математичні засади гібридної інтелектуальної системи вибору вагових коефіцієнтів (ICBBK), що базується на Fuzzy ANP. Доведено, що використання ICBBK дозволяє усунути суб'єктивізм та врахувати мережові взаємозалежності, підвищуючи достовірність інтегральної оцінки.

Подальші дослідження будуть спрямовані на емпіричну валідацію розробленої методики: застосування ICBBK до реальних даних моніторингу населеного пункту та кількісне порівняння отриманого ПЕБ з індексами, розрахованими традиційними методами. Результати роботи можуть бути використані для розробки СППР для міської влади.

Література

1. Клименко М. О., Прищепя А. М., Клименко О. М., Варжель О. В. Оцінка інтегрального індексу екологічної безпеки агро-екологічного стану орних земель Рівненської області. *Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки»*. 2021. Вип. 4(96). С. 62–71.
2. Третяк А. М., Третяк В. М., Капінос Н. О. Методика оцінки індексу екологічного благополуччя землекористування. *Агросвіт*. 2024. № 7. С. 4–11. DOI: 10.32702/2306-6792.2024.7.4
3. Іванюта С. П. Про інтегральну оцінку рівня екологічної безпеки регіонів України. *Екологічна безпека та природокористування*. 2013. Вип. 2(14). С. 26–34.
4. Боронос В. Г., Довга Л. В. Методичні підходи щодо оцінки рівня безпеки регіону шляхом розширення системи екологічних індикаторів. *Науковий вісник ЧДІЕУ*. 2014. № 4(24). С. 136–142. http://nbuv.gov.ua/UJRN/NvChdieu_2014_4_9
5. Рак Ю. П., Зачко О. Б. Оцінка стану безпеки життєдіяльності регіонів України: інтегрований підхід. *Збірник наукових праць Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2008. № 34. С. 175–181.
6. Li Y., Hou K., Chang Y., Yuan B., Li X. A methodological study on the identification of ecological security change processes and zoning control strategies – Based on the perspective of sustainable development. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 946. Art. 174190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174190>
7. He, C., Mao, N., Cheng, L., & Du, G. (2025). An Intelligent Choquet Fuzzy Integral-Based Framework for Risk Assessment in Seismic Acquisition Processes. *Processes*, 13(11), 3558. <https://doi.org/10.3390/pr13113558>
8. Rezaei M., Borjalilu N. A dynamic risk assessment modeling based on fuzzy ANP for safety management systems. *Aviation*. 2018. Vol. 22. Iss. 4. P. 143–155. DOI: 10.3846/aviation.2018.6983
9. Teliura N. Development of the methodological approach to the selection of technologies for environmentally safe water drainage in populated areas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10 (96), 2018. P. 55–63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.148689>
10. Dmitrieva O., Khorenzhaja I., Vasylenko V., Osypenko S., Teliura N., Lomakina O., Melnik L., Koldoba, I. Choosing the phytoremediation technologies for cleaning various types of wastewater. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (104), 202. P. 27–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200591>
11. Teliura N., Reshetchenko A., Tsapko, N., Vorobiov, O., Kurakova, N.. Environmental Safety Management on the Basis of Sustainable Development: Decision-Making Model for Technogenic Loads. *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 808. 2023. P. 167–176. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_15

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025