
ІННОВАЦІЙНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

УДК 504.062:004.8

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.18>

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ: ВІД МОНІТОРИНГУ ДО ПРЕВЕНТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

Валерко Р.А., Герасимчук Л.О., Плотніков Є.О.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
valerko_ruslana@ukr.net, gerasim4uk@ukr.net, epunxx@gmail.com

У статті розглянуто використання технологій штучного інтелекту (ШІ) в екологічному моніторингу та забезпеченні екологічної безпеки, зокрема для прогнозування та оцінки якості повітря, води, ґрунтів, а також зміни клімату і біорізноманіття. Встановлено, що штучний інтелект, зокрема методи машинного навчання, нейронні мережі та комп'ютерний зір, можуть значно підвищити точність і оперативність аналізу екологічних даних, що є необхідним для швидкого реагування на екологічні загрози та стихійні лиха. Завдяки інтеграції ШІ з дистанційним зондуванням Землі (ДЗЗ), геоінформаційними системами (ГІС) та сенсорними мережами, стало можливим створення адаптивних моделей екологічного моніторингу, що здатні до самооновлення та навчання на основі реальних даних.

Дослідження також показало, що використання ШІ сприяє підвищенню ефективності управління природними ресурсами, оптимізації сільськогосподарських практик і боротьбі з ерозією ґрунтів. Моделювання змін клімату та прогнозування екологічних ризиків дозволяють розробляти стратегії пом'якшення наслідків і адаптації до нових екологічних умов. Однак, важливими викликами є необхідність у великих та високоякісних масивах даних для ефективного навчання моделей ШІ, а також упередженість даних, що може призвести до викривлення прогнозів та посилення існуючих соціальних і екологічних нерівностей.

Практичне значення дослідження полягає в можливості створення інтегрованих систем «цифрової екології», які поєднують прогнозування, моделювання та раннє попередження для мінімізації природних і антропогенних загроз. Результати дослідження відкривають перспективи для підвищення ефективності екологічного моніторингу та управління природними ресурсами, сприяючи сталому розвитку та забезпеченню екологічної безпеки в умовах зміни клімату. *Ключові слова:* штучний інтелект, екологічний моніторинг, прогнози екологічних ризиків, екологічна безпека, сталий розвиток, управління природними ресурсами.

Artificial intelligence in environmental safety systems: from monitoring to preventive management. Valerko R., Herasymchuk L., Plotnikov I.

The article examines the use of artificial intelligence (AI) technologies in environmental monitoring and ensuring environmental safety, particularly for forecasting and assessing the quality of air, water, and soil, as well as climate change and biodiversity. It is established that AI methods, including machine learning, neural networks, and computer vision, can significantly improve the accuracy and efficiency of environmental data analysis, which is essential for rapid response to environmental threats and natural disasters. The integration of AI with Earth remote sensing (ERS), geographic information systems (GIS), and sensor networks has enabled the development of adaptive environmental monitoring models capable of self-updating and learning based on real-time data.

The study also demonstrates that the use of AI enhances the efficiency of natural resource management, optimizes agricultural practices, and supports soil erosion control. Climate change modeling and environmental risk forecasting make it possible to develop strategies for mitigation and adaptation to new environmental conditions. However, key challenges remain, including the need for large and high-quality datasets for effective AI training, as well as data bias, which can lead to distorted predictions and exacerbate existing social and environmental inequalities.

The practical significance of the study lies in the potential to create integrated “digital ecology” systems that combine forecasting, modeling, and early warning to minimize natural and anthropogenic threats. The results of the research open up prospects for improving the effectiveness of environmental monitoring and natural resource management, contributing to sustainable development and environmental safety under conditions of climate change. *Key words:* artificial intelligence, environmental monitoring, environmental risk forecasting, environmental safety, sustainable development, natural resource management.

Постановка проблеми. Сучасні глобальні екологічні виклики, такі як: зміна клімату, деградація ґрунтів, забруднення водних ресурсів, урбанізаційний тиск та наслідки воєнних дій потребують принципово нових підходів до моніторингу, оцінювання та управління станом довкілля. Традиційні методи екологічного аналізу, засновані на періодичних вимі-

рюваннях і статистичних оцінках, все частіше виявляються недостатніми для своєчасного реагування на динамічні екосистемні зміни. У цьому контексті штучний інтелект (ШІ) постає як стратегічний інструмент підвищення ефективності систем екологічної безпеки, що здатний забезпечити оперативне опрацювання великих обсягів даних, виявлення при-

хованих закономірностей і побудову прогнозів екологічних ризиків у реальному часі.

Актуальність дослідження. Технології машинного навчання, нейронних мереж, комп'ютерного зору та інтелектуальної аналітики відкривають можливості для створення «розумних» систем екологічного моніторингу – від автоматичного розпізнавання джерел забруднення на супутникових знімках до прогнозування наслідків промислових аварій, лісових пожеж або техногенних катастроф. Наприклад, інтеграція ШІ з дистанційним зондуванням Землі (ДЗЗ) та IoT-системами вже реалізується для моніторингу забруднення ґрунтів, води та повітря [1]. Інтеграція ШІ з геоінформаційними системами (ГІС), дистанційним зондуванням Землі і сенсорними мережами дає змогу формувати адаптивні екологічні моделі, здатні до самооновлення та навчання на основі потоку реальних даних [2].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю формування нової парадигми екологічної безпеки, орієнтованої на превентивне управління ризиками та сталий розвиток. Використання штучного інтелекту може стати основою для побудови інтегрованих систем «цифрової екології», що поєднують технології прогнозування, моделювання та раннього попередження з метою мінімізації антропогенних і природних загроз. Метою дослідження є визначення науково-практичних перспектив застосування технологій штучного інтелекту у сфері забезпечення екологічної безпеки, аналіз основних напрямів їх розвитку, потенційних ризиків та можливостей для удосконалення систем моніторингу, прогнозування і прийняття екологічних рішень.

Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями. Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із реалізацією державних пріоритетів у сфері екологічної безпеки, цифровізації та сталого розвитку України. Дослідження відповідає стратегічним положенням Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», Національної економічної стратегії-2030, Стратегії цифрової трансформації довікільєвого управління, а також цілям Європейського зеленого курсу (European Green Deal) та Цілям сталого розвитку ООН.

Практичне значення дослідження полягає у створенні основ для інтелектуалізації національної системи екологічної безпеки, що забезпечує перехід від реактивного до превентивного управління екологічними ризиками. Використання алгоритмів штучного інтелекту дозволяє інтегрувати великі масиви екологічних, кліматичних і соціально-економічних даних у єдині аналітичні платформи, підвищуючи точність прогнозів і оперативність реагування на потенційні загрози довікілью.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні роки характеризуються зростанням кілько-

сті міждисциплінарних досліджень, у яких технології штучного інтелекту поєднуються з дистанційним зондуванням Землі, геоінформаційними системами (ГІС) та сенсорними мережами для підвищення ефективності екологічного моніторингу. Систематичні огляди підтверджують, що алгоритми машинного та глибокого навчання забезпечують точне виявлення джерел забруднення, аналіз тенденцій і короткострокове прогнозування екологічних ризиків [3, 4].

Дослідження у сфері водних і повітряних екосистем демонструють ефективність нейронних мереж і ансамблевих методів для моніторингу якості води, виявлення нафтових плям і прогнозування концентрацій забруднювачів повітря [1]. Гібридні підходи, що поєднують фізичне моделювання та ШІ, довели свою ефективність у прогнозуванні паводків, пожеж і розповсюдження контамінантів.

Поряд із технологічними перевагами, у сучасних публікаціях зростає увага до питань етичності, прозорості та енергоефективності моделей ШІ, зокрема до управління невизначеністю й забезпечення достовірності екологічних даних [5, 6].

Отже, сучасні дослідження підтверджують значний потенціал штучного інтелекту у сфері екологічної безпеки, особливо для побудови інтегрованих систем прогнозування, які забезпечують перехід від реактивного до превентивного управління станом довкілля.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна. Попри значний прогрес у застосуванні штучного інтелекту у сфері екологічного моніторингу, низка ключових аспектів залишається недостатньо розробленою. Сучасні дослідження здебільшого зосереджуються на окремих задачах, а саме: виявленні джерел забруднення, прогнозуванні якості повітря або моделюванні лісових пожеж без формування інтегрованої системи екологічної безпеки, яка б поєднувала моніторинг, аналіз, прогнозування та управлінські рішення в єдиному інтелектуальному контурі.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення даного дослідження полягає в розробці та вдосконаленні підходів до використання штучного інтелекту для екологічного моніторингу та управління природними ресурсами.

Виклад основного матеріалу. Використання штучного інтелекту у сфері екологічного моніторингу та забезпечення екологічної безпеки останнім часом зазнало значного зростання та диверсифікації. Ці технології були впроваджені у різних сферах для вирішення критичних екологічних проблем, демонструючи універсальність та ефективність.

Моніторинг якості повітря

Методи штучного інтелекту та машинного навчання використовуються для прогнозування та моніторингу рівнів якості повітря. Наприклад, моделі машинного навчання можуть аналізувати

історичні дані про забруднення повітря та метеорологічні змінні для прогнозування майбутніх рівнів забруднення, що має вирішальне значення для планування та розробки політики в галузі охорони здоров'я. Дослідження показали, що нейронні мережі та методи ансамблевого навчання можуть досягати високої точності в прогнозуванні якості повітря [7, 8].

Системи ШІ можуть збирати та аналізувати дані найбільш точно порівняно з традиційними підходами, тим самим зменшуючи ймовірність помилок та невідповідностей у даних про якість повітря. Крім того, алгоритми ШІ можуть пропонувати індивідуальні рішення для різних джерел забруднення та регіонів. Аналізуючи дані з певних місць та джерел, ШІ може пропонувати індивідуальні рішення щодо забруднення повітря, такі як регулювання транспортного потоку, оптимізація промислових процесів або зміна міського планування [9]. Оцінюючи дані про якість повітря та стан здоров'я, алгоритми ШІ можуть виявляти групи ризику та створювати індивідуальні втручання для зміцнення громадського здоров'я [10].

Моніторинг якості води

Моделі на основі штучного інтелекту використовуються для оцінки та прогнозування параметрів якості води, таких як рН, розчинений кисень та рівень забруднюючих речовин. Такі моделі можуть обробляти дані з сенсорних мереж та технологій дистанційного зондування, забезпечуючи оцінювання у режимі реального часу, необхідне для управління водними ресурсами та забезпечення чистішої води [11, 12].

Використання ШІ для оцінки якості води має ряд переваг порівняно з традиційними методами. Системи на основі ШІ можуть безперервно та миттєво контролювати якість води, що може зменшити небезпеку для здоров'я населення та навколишнього середовища [13]. Алгоритми штучного інтелекту можуть створювати цільові втручання, такі як плани очищення або методи запобігання забрудненню, для зниження ризиків та наслідків цих проблем шляхом аналізу даних з конкретних регіонів та типів проблем із якістю води, а також створювати спеціалізовані рішення для контролю забруднення та захисту середовища існування для збереження водних екосистем та біорізноманіття [14].

Моніторинг ґрунту

Застосування ШІ для моніторингу ґрунту є значним прогресом в управлінні сільським господарством, охороні навколишнього середовища та плануванні землекористування [15]. Точність алгоритмів ШІ значно зменшує людські помилки, що призводить до точніших прогнозів властивостей ґрунту. Масштабованість рішень на основі ШІ дозволяє проводити комплексні оцінки стану ґрунту на великих сільськогосподарських площах [16]. Прогнозовані дані моделей штучного інтелекту дозволяють про-

водити проактивне управління ґрунтом, таке як коригування графіків поливу, оптимізація внесення добрив [17] та впровадження заходів боротьби з ерозією, підвищуючи стійкість та продуктивність сільськогосподарських практик [18].

Загалом, впровадження ШІ у моніторинг ґрунту ілюструє, як передові технології можуть трансформувати традиційні сільськогосподарські та екологічні практики. Розвиток технологій дає змогу більшого розуміння та ефективності, сприяючи більш сталим та продуктивним практикам управління земельними ресурсами [19].

Моделювання зміни клімату

Алгоритми машинного навчання відіграють важливу роль у моделюванні клімату, де вони використовуються для моделювання та прогнозування кліматичних моделей на основі великомасштабних екологічних даних. Ці моделі допомагають зрозуміти наслідки зміни клімату та розробити стратегії пом'якшення наслідків та адаптації [20].

Моніторинг біорізноманіття та екосистем

Методи штучного інтелекту, зокрема ті, що включають розпізнавання та обробку зображень, використовуються для моніторингу біорізноманіття та оцінки стану екосистем. Наприклад, автоматизовані системи, що використовують глибоке навчання, можуть ідентифікувати та класифікувати види за зображеннями з фотопасток, допомагаючи відстежувати популяції диких тварин та зміни біорізноманіття з часом [21].

Управління стихійними лихами

Штучний інтелект та машинне навчання мають вирішальне значення в управлінні стихійними лихами та реагуванні на них [22]. Прогнозні моделі можуть передбачати стихійні лиха, такі як повені, урагани та лісові пожежі, що дозволяє своєчасно втручатися та розподіляти ресурси. Крім того, ШІ може допомогти в аналізі даних соціальних мереж для оцінки впливу стихійних лих та координації зусиль реагування [23]. Прогнозування стихійних лих з використанням ШІ базується на використанні різних джерел, а саме: супутникових знімків, метеорологічних та історичних даних, що дає змогу виявити закономірності і тренди, які вказують на наближення катастрофи [3].

Проте, не дивлячись на переваги прогнозування стихійних лих на основі ШІ, для забезпечення його успішного використання необхідно вирішити низку проблем. Якість даних, що використовуються для аналізу, є однією із основних перешкод. Низька якість даних може призвести до викривлення результатів прогнозування, що, у свою чергу, негативно позначається на рівні суспільної безпеки [24].

Епідеміологічні дослідження забруднювачів навколишнього середовища

Застосування ШІ в епідеміологічних дослідженнях, пов'язаних із забруднювачами навколишнього середовища, показало надзвичайно перспективні

результати, пропонуючи точні, своєчасні та практичні дані про вплив забруднювачів на здоров'я людини [25]. Моделі на базі ШІ відіграють важливу роль у прогнозуванні спалахів захворювань, пов'язаних із забрудненням навколишнього середовища, шляхом аналізу великих наборів даних, що включають вимірювання якості повітря та води, метеорологічні дані та медичні записи [26]. Інтегруючи історичні дані про рівні забруднення, результати здоров'я та демографічну інформацію, моделі штучного інтелекту можуть генерувати різні сценарії та прогнозувати майбутні тенденції у сфері охорони здоров'я [27].

Отже, застосування штучного інтелекту для моніторингу навколишнього середовища продемонструвало значний потенціал, однак для повного використання його переваг необхідно подолати кілька ключових обмежень. Одним із таких є залежність від великих і високоякісних наборів даних. Моделі штучного інтелекту вимагають обсягу точних та репрезентативних даних для ефективного навчання, що може стати серйозним обмеженням, якщо такі дані відсутні. Крім того, упередженість у даних може призвести до спотворення прогнозів і посилення наявних нерівностей, що підкреслює важливість ретельного керування та попередньої обробки даних.

Висновки. Застосування штучного інтелекту в екологічному моніторингу та забезпеченні екологічної безпеки відкриває нові можливості для ефективного управління навколишнім середовищем. Інтеграція таких технологій у різні сфери, зокрема в моніторинг якості повітря, води, ґрунту, зміни клімату, біорізноманіття та управління стихійними лихами, значно підвищує точність прогнозів і швидкість реагування на екологічні загрози. ШІ здатен надавати детальні, своєчасні дані, що є критично важливим для прийняття ефективних управлінських

рішень та планування стратегій адаптації до зміни клімату.

Проте, для досягнення максимальних результатів, необхідно подолати кілька важливих обмежень. Зокрема, залежність від великих і високоякісних масивів даних залишається суттєвим викликом для ефективного застосування ШІ. Відсутність точних та репрезентативних даних може обмежити потенціал таких технологій. Крім того, упередженість даних може призвести до спотворених прогнозів та поглиблення існуючих соціальних та екологічних нерівностей, що підкреслює важливість належної обробки та керування даних.

Попри ці виклики, штучний інтелект демонструє значний потенціал у вирішенні критичних екологічних проблем. Успішна інтеграція цих технологій у повсякденну практику моніторингу та управління екологічними ресурсами сприятиме сталому розвитку та покращенню якості життя, створюючи нові можливості для ефективного реагування на екологічні загрози і запобігання їх негативним наслідкам.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження відкривають перспективи для покращення екологічного моніторингу за допомогою штучного інтелекту, зокрема для точнішого прогнозування якості повітря, води та ґрунтів, а також для оцінки змін клімату і біорізноманіття. Це дозволить значно підвищити ефективність реагування на екологічні загрози та кризові ситуації, такі як стихійні лиха та забруднення.

Використання ШІ також сприятиме розробці індивідуальних стратегій управління природними ресурсами, оптимізації сільськогосподарських практик та покращенню управління біорізноманіттям. Застосування цих технологій у національних і міжнародних програмах охорони навколишнього середовища дозволить адаптуватися до змін клімату та забезпечити сталий розвиток.

Література

1. Popescu S. M., Mansoor S., Wani O. A. та ін. Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. Vol. 12, Article 1336088. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1336088.
2. Alotaibi E., Nassif N. Artificial intelligence in environmental monitoring: in-depth analysis. *Discover Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 4, Article 84. DOI: 10.1007/s44163-024-00198-1.
3. Olawade D. B., Wada O. Z., Ige A. O., Egbewole B. I., Olojo A., Oladapo B. I. Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*. 2024. Vol. 12, Article 100114. DOI: 10.1016/j.heha.2024.100114.
4. Toderas M. Artificial Intelligence for Sustainability: A Systematic Review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 17. P. 8049. DOI: 10.3390/su17178049.
5. McGovern A., Ebert-Uphoff I., Gagne D. J. II, Bostrom A. The need for ethical, responsible, and trustworthy artificial intelligence for environmental sciences. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2112.08453. URL: <https://arxiv.org/abs/2112.08453>.
6. Pachot A., Patissier C. Towards Sustainable Artificial Intelligence: An Overview of Environmental Protection Uses and Issues. *arXiv preprint*. 2022. arXiv:2212.11738. URL: <https://arxiv.org/abs/2212.11738>.
7. Grange S. K., Lewis A. C., Carslaw D. C. Source apportionment advances using polar plots of bivariate correlation and regression statistics. *Atmos Environ*. 2016. 145:128–34. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2016.09.016>.
8. Haridasan A., Thomas J., Raj E. D. Deep learning system for paddy plant disease detection and classification. *Environ Monit Assess*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10656-x>.
9. Ortega-Fernández A., Martín-Rojas R., García-Morales V. J. Artificial Intelligence in the Urban Environment: Smart Cities as Models for Developing Innovation and Sustainability. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 19. P. 7860. DOI: 10.3390/su12197860.

10. Subramaniam S., Raju N., Ganesan A., Rajavel N. та ін. Artificial Intelligence Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 16. P. 9951. DOI: 10.3390/su14169951.
11. Chen K., Chen H., Zhou C. та ін. Comparative analysis of surface water quality prediction performance and identification of key water parameters using different machine learning models based on big data. *Water Research*. 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115454.
12. Li X., Su J., Wang H. та ін. Bibliometric analysis of artificial intelligence in wastewater treatment: current status, research progress, and future prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 4, Article 113152. DOI: 10.1016/j.jece.2024.113152.
13. Chen Y., Song L., Liu Y., Yang L., Li D. A Review of the Artificial Neural Network Models for Water Quality Prediction. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 17. P. 5776. DOI: 10.3390/app10175776.
14. Zhu M., Wang J., Yang X., Zhang Y., Zhang L., Ren H., Wu B., Ye L. A review of the application of machine learning in water quality evaluation. *EcoEnvironment & Health*. 2022. Vol. 1, Is. 2. P. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.06.001>.
15. Abdulraheem M. I., Zhang W., Li S., Moshayedi A. J., Farooque A. A., Hu J. Advancement of Remote Sensing for Soil Measurements and Applications: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 21. P. 15444. DOI: 10.3390/su152115444.
16. Chaterji S., DeLay N., Evans J., Mosier N., Engel B., Buckmaster D., Chandra R. Artificial Intelligence for Digital Agriculture at Scale: Techniques, Policies, and Challenges. *arXiv preprint*, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2001.09786.
17. Elshaikh A., Elsiddig Elsheikh, Jamal Mabrouki. Applications of Artificial Intelligence in Precision Irrigation. *Journal of Environmental & Earth Sciences*. 2024. Vol. 6, No. 2. P. 176–186. DOI: 10.30564/jees.v6i2.6679.
18. Sachithra V., Subhashini L.D.C.S. How artificial intelligence uses to achieve the agriculture sustainability: Systematic review. Artificial Intelligence in Agriculture. 2023. Vol. 8, P. 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2023.04.002>.
19. Nishant R., Kennedy M., Corbett J. Artificial intelligence for sustainability: Challenges, opportunities, and a research agenda. *International Journal of Information Management*. 2020. Vol. 53. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102104>.
20. Reichstein M., Camps-Valls G., Stevens B., Jung M., Denzler J., Carvalhais N., Prabhat N. Deep learning and process understanding for datadriven Earth system science. *Nature*. 2019. 566(7743):195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>.
21. Norouzzadeh M.S., Nguyen A., Kosmala M., Swanson A., Palmer M.S., Packer C., Clune J. Automatically identifying, counting, and describing wild animals in camera-trap images with deep learning. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2018. 115(25):E5716–25. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1719367115>.
22. Guo Q., Ren M., Wu S., Sun Y., Wang J., Wang Q., Ma Y., Song X., Chen Y. Applications of artificial intelligence in the field of air pollution: A bibliometric analysis. *Front. Public Health*. 2022. 10:933665. doi: 10.3389/fpubh.2022.933665.
23. Linardos V., Drakaki M., Tzionas P., Karnavas Y. L. Machine learning in disaster management: recent developments in methods and applications. *Mach Learn Knowl Extract*. 2022. 4(2):446–73. <https://doi.org/10.3390/MAKE4020020>.
24. Cortés U., Sánchez-Marré M., Ceccaroni L. et al. Artificial Intelligence and Environmental Decision Support Systems. *Applied Intelligence* 2000. 13, 77–91. <https://doi.org/10.1023/A:1008331413864>.
25. Rane N., Choudhary S., Rane J. Enhancing water and air pollution monitoring and control through ChatGPT and similar generative artificial intelligence implementation. *SSRN Electronic Journal*, 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4681733.
26. Adefemi A., Ukpoju E. A., Adekoya O., Abatan A., Adegbite A. O. Artificial intelligence in environmental health and public safety: a comprehensive review of USA strategies. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2023. Vol. 20, No. 3. P. 1420–1434.
27. Masood A., Ahmad K. A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 322, Article 129072. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129072.

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025