

**Тінтурін С.Г.**

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

## ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У МОНІТОРИНГОВИХ СИСТЕМАХ ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

*Штучний інтелект є одним з найбільш перспективних новітніх напрямів технологій, що стрімко розвиваються впродовж останніх двадцяти років. За останні десять років алгоритми штучного інтелекту змогли значно вплинути на всі сфери людського життя, включаючи сферу моніторингу стану навколишнього середовища з метою охорони довкілля. Під час моніторингу стану навколишнього середовища системи штучного інтелекту аналізують величезні обсяги даних із різних джерел, таких як супутники, датчики та дрони, щоб у режимі реального часу давати актуальну інформацію для спеціалістів у сфері охорони довкілля. У цій статті проведено огляд питання застосування моделей штучного інтелекту у моніторингових системах охорони навколишнього середовища, який допоміг краще зрозуміти принципи їх роботи та недоліки, які вони мають. Для цього було проаналізовано праці українських та іноземних дослідників, які підтвердили актуальність обраної теми. Результати поточного дослідження виявили, що інтеграція алгоритмів штучного інтелекту в процес моніторингу навколишнього середовища забезпечує трансформаційні переваги в різних областях, включаючи відстеження якості ґрунту, води та повітря, управління дорожнім рухом і відстеження вуглецевого сліду. Все це робить значний внесок в охорону навколишнього середовища, захист здоров'я населення та сталий розвиток суспільства. Для майбутніх досліджень в цьому напрямі існує критична потреба зосередитися на етичних наслідках і кількісній оцінці впливу технологій штучного інтелекту на довкілля. Розробка стандартизованих методів оцінки екологічного сліду систем моніторингу на основі штучного інтелекту та дослідження етичних аспектів їх запровадження сприятимуть відповідальному та безпечному використанню цих технологій, підвищуючи їх популярність і ефективність у галузі моніторингу довкілля.*

**Ключові слова:** штучний інтелект, екосистема, обмеженість природних ресурсів, системи моніторингу, зміни клімату.

**Постановка проблеми.** Процес моніторингу стану навколишнього середовища полягає у систематичному спостереженні за його компонентами, вимірюванні основних показників та комплексній оцінці складових. Головною метою цього процесу є контроль поточного стану та своєчасне виявлення змін, що можуть загрожувати екосистемам та здоров'ю населення. До традиційних методів моніторингу належать статистичний і лабораторний аналіз, а також ручний відбір проб [1]. Проте ці методи мають певні обмеження: висока вартість, тривалість процедур та низька точність результатів.

Значні витрати на ручний відбір проб та лабораторні аналізи часто є невиправдано високими, оскільки включають оплату праці кваліфікованих фахівців, а також вартість обладнання та хімічних реагентів [2]. Це спричиняє вузьку спрямованість багатьох програм моніторингу, оскільки вони використовують невеликі вибірки, що не дає повного уявлення про стан довкілля.

Забезпечення регулярного моніторингу навколишнього середовища стає надзвичайно складним завданням, особливо у регіонах з обмеженими

ресурсами, зокрема там, де бракує технологічної інфраструктури та досвіду [3].

Штучний інтелект є надзвичайно важливим елементом сучасного процесу моніторингу навколишнього середовища, оскільки підвищує об'єктивність результатів та полегшує доступ до регіонів, що страждають від дефіциту ресурсів. В екологічних моніторингових системах штучний інтелект застосовується для прогнозування стихійних лих, контролю якості повітря і води, а також виявлення забруднювачів [4].

Все вищеприписане підкреслює актуальність і необхідність подальших досліджень щодо застосування штучного інтелекту в системах охорони навколишнього середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Застосування штучного інтелекту у моніторингових системах екологічного нагляду розглянуто значною кількістю вітчизняних і зарубіжних дослідників, що підтверджує актуальність теми. У даній роботі проаналізовано лише найактуальніші з наукових праць, присвячених цьому напрямку.

Дослідженням технологічних рішень у сфері екології, зокрема із застосуванням технологій штучного інтелекту, присвячені роботи В. Скиби, М. Ганчука та Е. Аюбової, де зокрема виділено модель моніторингу та прогнозування кліматичних змін DeepMind [5].

Значний внесок у вивчення автоматизації виробничих процесів і моніторингу через IoT-технології, які базуються на алгоритмах штучного інтелекту, зробив С. Шабетя. Він зазначає, що такі підходи сприяють мінімізації шкідливих викидів і відходів, що є важливим аспектом для збереження довкілля [6].

У роботі М. Фабрикатора та П. Яганова наведено результати досліджень щодо використання технологій штучного інтелекту у телекомунікаційних системах для моніторингу стану навколишнього середовища. Крім того, ними розроблено технічне рішення, яке дозволяє створювати додаткові системи моніторингу [7].

Застосування сучасних інформаційних систем, базованих на алгоритмах штучного інтелекту, сприяє зниженню негативного впливу на навколишнє середовище, що було виявлено у дослідженнях В. Данкевича, С. Данкевича та С. Лутковської [8].

Питанням використання штучного інтелекту в управлінні екосистемами, зокрема для моніторингу дикої природи, оцінки стану середовища існування, аналізу біорізноманіття та прогнозування стихійних лих, присвячені дослідження О. Chisom, Р. Biu, А. Umoh, В. Obaedo, А. Adegbite та А. Abatan [9].

На думку М. Ncube та Р. Ngulube, удосконалення систем моніторингу та управління довкіллям досягається завдяки інтеграції інструментів аналізу даних на основі алгоритмів штучного інтелекту, що вважається важливим напрямом розвитку [10].

Прогрес у сенсорних технологіях, IoT та методах машинного навчання, як підкреслили S. Ullo та G. Sinha, значно посилює ефективність інтелектуальних систем екологічного моніторингу [11].

Аналіз сучасних наукових джерел свідчить про високу актуальність застосування штучного інтелекту в моніторингових системах охорони довкілля, що викликає значний інтерес серед наукової спільноти як в Україні, так і за кордоном. Водночас ця тематика потребує поглиблених досліджень у зв'язку зі зростанням екологічних ризиків та швидкими темпами розвитку технологій штучного інтелекту.

**Постановка завдання.** Метою цього дослідження є здійснення огляду застосування штуч-

ного інтелекту в системах моніторингу навколишнього середовища.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі дослідницькі завдання:

- здійснити аналіз моделей моніторингу довкілля, що функціонують на основі принципів штучного інтелекту;
- дослідити основні концептуальні засади, що лежать в основі моделей моніторингу довкілля;
- ідентифікувати та описати недоліки існуючих моделей моніторингу довкілля.

**Виклад основного матеріалу.** Штучний інтелект відкриває нові можливості для моніторингу навколишнього середовища, пропонуючи інструменти для ефективного аналізу даних та прогнозування екологічних показників. Під час вибору системи на основі штучного інтелекту для моніторингу навколишнього середовища важливо враховувати такі аспекти, як доступність даних, обчислювальні ресурси та наявний досвід. Деякі моделі штучного інтелекту потребують значних обсягів даних і потужних обчислювальних ресурсів для навчання, тоді як інші здатні працювати на менш об'ємних наборах даних із меншими обчислювальними витратами [12]. Машини опорних векторів (SVM) є ефективними для аналізу високовимірних даних та вивчення складних взаємозв'язків між змінними. Цю технологію можна застосовувати до різних типів даних, зокрема зображень і тексту. Наприклад, SVM було успішно використано для класифікації зображень, таких як виявлення вирубки лісів та ідентифікація видів тварин [13].

Для розв'язання задач регресії в екологічному моніторингу застосовують підтримуючу векторну регресію (SVR), що є варіантом SVM і забезпечує ефективне прогнозування параметрів стану довкілля.

Дерева рішень є відносно простими для навчання й інтерпретації, що робить їх зручними для роботи з різними типами даних. Вони часто використовуються для завдань, пов'язаних з виявленням і моніторингом процесів вирубки лісів, контролем якості повітря та води. Проте ці моделі можуть бути схильними до перенавчання, особливо під час обробки складних та зашумлених даних, і можуть демонструвати обмежені можливості при виконанні завдань з розпізнавання зображень чи обробки природної мови.

Однією з моделей штучного інтелекту, що знайшла широке застосування в екологічному моніторингу, є випадковий ліс (Random Forest, RF). Ця модель характеризується підвищеною стійкістю

до перенавчання в порівнянні з індивідуальними деревами рішень і здатна обробляти різні формати даних, включно з візуальними зображеннями та текстовою інформацією. Випадковий ліс демонструє високу ефективність у завданнях класифікації зображень, аналізу природної мови та прогнозування часових рядів. Водночас, попри свою надійність і гнучкість, RF вимагає значних обсягів оперативної пам'яті та потужностей обчислень, що може обмежувати його застосування у високонавантажених екосистемах.

Згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) є найбільш оптимальними для аналізу зображень і просторових даних завдяки здатності автоматично виділяти складні шаблони без необхідності ручного програмування. Це робить CNN придатними для моніторингу процесів, таких як вирубка лісів та ідентифікація фауни, що є важливими екологічними завданнями. Однак навчання CNN є ресурсомістким, потребує великих обсягів анотованих даних, і часто ускладнюється відсутністю адекватних наборів даних для візуального розпізнавання. Попереднє навчання CNN на даних із суміжних доменів дозволяє частково вирішити цю проблему, забезпечуючи адаптацію моделей до нових середовищ [14].

Повторювані нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN) є ключовими для опрацювання послідовних даних, що дозволяє їм з високою точністю прогнозувати часові ряди та виконувати аналіз природної мови. RNN забезпечують ефективне моделювання довгострокових залежностей у даних, що робить їх цінним інструментом для передбачення екстремальних погодних явищ і аналізу великих обсягів екологічних звітів [15].

Така диференціація методів штучного інтелекту демонструє їх адаптивний потенціал для розв'язання різних завдань у сфері моніторингу навколишнього середовища, підвищуючи точність та ефективність процесів аналізу екологічних показників.

Проте процес навчання повторюваних нейронних мереж (RNN) потребує значних обчислювальних ресурсів і великих обсягів даних. Для підвищення точності кліматичних прогнозів та моделювання змін у підземних водах були розроблені модифіковані моделі, такі як Convolutional Deep Long Short-Term Memory (CDLSTM).

Гібридні моделі, що поєднують переваги алгоритмів машинного й глибокого навчання, забезпечують високу точність та надійність у моніторингу навколишнього середовища. Завдяки їм можливо враховувати складні нелінійні зв'язки

між вхідними та вихідними змінними, що є важливим для детального аналізу екологічних процесів. Хоча гібридні моделі потребують більше часу на навчання та є складними для інтерпретації, їх продуктивність значно перевищує інші підходи при вирішенні складних завдань екологічного моніторингу.

Перспективним напрямом є розробка методу синтетичної надлишкової вибірки меншості, заснованої на глибоких нейронних мережах (SMOTEDNN), для прогнозування забруднення повітря, що додатково підтверджує високий потенціал штучного інтелекту в цій галузі.

Різні моделі штучного інтелекту, що застосовуються для моніторингу стану довкілля, характеризуються своїми сильними сторонами та обмеженнями, що узагальнено у таблиці 1.

Отже, моделі SVM і SVR демонструють високу ефективність при роботі з великовимірними даними та виконанні регресійних завдань, хоча їх застосування потребує значних обчислювальних ресурсів. Древа рішень вирізняються простотою та легкістю інтерпретації, однак мають тенденцію до перенавчання. Випадкові ліси забезпечують універсальність і надійність, водночас їхнє використання вимагає значної обчислювальної потужності. Згорткові нейронні мережі (CNN) оптимально підходять для завдань, пов'язаних із аналізом зображень, проте вони залежать від великих обсягів даних та потужних обчислювальних ресурсів. Повторювані нейронні мережі (RNN) ефективно опрацьовують послідовні дані, хоча також потребують значних ресурсів і застосування вдосконалених моделей, таких як CDLSTM, для розв'язання складних завдань прогнозування. Гібридні моделі забезпечують найвищу точність та надійність, однак їх навчання й інтерпретація є досить складними.

**Висновки.** Таким чином, інтеграція алгоритмів штучного інтелекту в процес моніторингу навколишнього середовища забезпечує трансформаційні переваги в багатьох областях, включаючи такі, як відстеження якості ґрунту, води та повітря, управління дорожнім рухом і моніторинг вуглецевого сліду. Ця інтеграція робить значний внесок в охорону навколишнього середовища в цілому, захист здоров'я населення та сталий розвиток суспільства. Системи моніторингу навколишнього середовища, створені на основі моделей штучного інтелекту є надзвичайно актуальними для держав, які відчувають обмеженість природних ресурсів, оскільки вони можуть допомогти ефективно управляти наявними запасами ресур-

**Специфіка використання моделей штучного інтелекту для моніторингу навколишнього середовища, їх переваги та обмеження**

Назва моделі	Специфіка використання моделі	Сильна сторона	Обмеження
SVM	Прогнозування шкідливого цвітіння водоростей в озерах та моніторинг якості повітря	Ця модель здатна обробляти великі обсяги даних, аналізувати складні взаємозв'язки між змінними та адаптується до різних типів даних, зокрема зображень і тексту, що дозволяє ідентифікувати обмеженість природних ресурсів.	Класифікація екосистем, обробка природної мови та прогнозування екстремальних явищ
Дерево рішень	Використовується для прогнозування та оцінки якості води у річкових системах	Легкість навчання та інтерпретації; здатність працювати з різними типами даних	Обмежена ефективність у складних завданнях моніторингу, таких як виявлення вирубки лісів та оцінка якості повітря
Випадковий ліс (RF)	Моделювання індексу якості повітря в міських районах та прогнозування лісових пожеж	Стійкий до перенавчання; поєднує прогнози кількох дерев, що дозволяє виявляти кліматичні зміни	Класифікація екосистем, обробка природної мови та прогнозування екстремальних явищ може вимагати додаткових обчислювальних ресурсів
Згортовка нейронна мережа (CNN)	Моніторинг стану коралових рифів та ерозії узбережжя	Здатність вивчати складні шаблони із зображень без явного програмування; оптимальна для класифікації зображень та аналізу просторових даних	Може мати обмеження у завданнях з виявлення вирубки лісів та ідентифікації видів тварин без додаткових анованих даних
Повторювана нейронна мережа (RNN)	Прогнозування повеней на основі даних про опади та моніторинг рівнів річкового стоку	Підходить для роботи з послідовними даними, такими як часові ряди та обробка природної мови; виявляє довгострокові залежності в даних	Обмежена точність у прогнозуванні екстремальних явищ без додаткового налаштування для складних даних
Гібридна модель	Комбінація CNN та RNN для точного прогнозування рівнів забруднення повітря та аналізу ефекту «міського теплового острова»	Поєднує сильні сторони CNN та RNN, що забезпечує вищу точність та надійність у прогнозуванні	Потребує значних обчислювальних ресурсів і є складною для навчання та інтерпретації при високих вимогах до точності моніторингу

Джерело: розроблено на основі [16]

сів. Для майбутніх досліджень в цьому напрямі існує критична потреба зосередитися на етичних наслідках і кількісній оцінці впливу технологій штучного інтелекту на довкілля. Розробка стандартизованих методів оцінки екологічного сліду

систем моніторингу на основі штучного інтелекту та вивчення етичних аспектів їхнього розгортання забезпечить відповідальне та безпечне використання цих систем, що зробить їх ще популярнішими в процесі захисту довкілля.

**Список літератури:**

1. Zhang C. Fundamentals of environmental sampling and analysis. John Wiley & Sons, 2024. p. 576. URL: <http://surl.li/biibtw>
2. Artificial intelligence and automated monitoring for assisting conservation of marine ecosystems: A perspective / E. M. Diritia et al. *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.918104> (date of access: 13.11.2024).
3. Application of the Artificial Neural Network and Support Vector Machines in Forest Fire Prediction in the Guangxi Autonomous Region, China / Y. Li et al. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2020. Vol. 2020. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/5612650> (date of access: 13.11.2024)
4. Artificial Intelligence Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review / S. Subramaniam et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 16. P. 9951. URL: <https://doi.org/10.3390/su14169951> (date of access: 13.11.2024).

5. Скиба В. П., Ганчук М. М., Аюбова Е. М. Перспективи використання штучного інтелекту в галузі екології: освітній, науковій та практичній діяльності. *Інформаційні технології у сфері захисту довкілля* : колективна монографія; за загальною редакцією Маєвського В., Приймака В., Ткачука Р.; за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 16-17 травня 2024 р.). Львів : ННБК «АТБ», 2024. С. 118-127. URL: [http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/17676/3/monograph\\_tep\\_%d0%a8%d0%86%2024\\_.pdf](http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/17676/3/monograph_tep_%d0%a8%d0%86%2024_.pdf)
6. Шабетя С. Смарт-виробництво: поєднання автоматизації, екології та кібербезпеки. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. Вип. 11. №. 39. С. 1121-1131. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-11\(39\)-1121-1131](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-11(39)-1121-1131) (дата звернення: 14.11.2024).
7. Фабрикатор М., Яганов П. Інтелектуальні технології телекомунікацій для систем моніторингу та оперативного інформування. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Вип. 339. №. 4. С. 97-101. DOI: [10.31891/2307-5732-2024-339-4-15](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-15) (дата звернення: 14.11.2024).
8. Данкевич В. Є., Данкевич Є. М., Лутковська С. М. Вплив інновацій та інтернету речей на підвищення економічної ефективності управління земельними ресурсами аграрних підприємств. *Актуальні проблеми економіки*. 2024. Вип. 5 №. 275. С. 41-49. DOI: [10.32752/1993-6788-2024-1-275-41-49](https://doi.org/10.32752/1993-6788-2024-1-275-41-49) (дата звернення: 14.11.2024).
9. Reviewing the role of AI in environmental monitoring and conservation: A data-driven revolution for our planet / Onyebuchi Nneamaka Chisom et al. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 21, no. 1. P. 161–171. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.2720> (date of access: 13.11.2024)
10. Ncube M. M., Ngulube P. Enhancing environmental decision-making: a systematic review of data analytics applications in monitoring and management. *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. №. 1. P. 1-21. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s43621-024-00510-0.pdf> (date of access: 13.11.2024)
11. Ullo S. L., Sinha G. R. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 11. P. 3113. URL: <https://doi.org/10.3390/s20113113> (date of access: 13.11.2024).
12. Database Meets Artificial Intelligence: A Survey / X. Zhou et al. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tkde.2020.2994641> (date of access: 13.11.2024).
13. Comparison of Random Forest, Support Vector Machines, and Neural Networks for Post-Disaster Forest Species Mapping of the Krkonoše/Karkonosze Transboundary Biosphere Reserve / B. Zagajewski et al. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 13. P. 2581. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13132581> (date of access: 13.11.2024).
14. Ghorbani Z., Behzadan A. H. Monitoring offshore oil pollution using multi-class convolutional neural networks. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 289. P. 117884. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117884> (date of access: 13.11.2024).
15. Analysis of environmental factors using AI and ML methods / M. A. Haq et al. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16665-7> (date of access: 13.11.2024).
16. Artificial Intelligence in Environmental Monitoring: Advancements, Challenges, and Future Directions / D. B. Olawade et al. *Hygiene and Environmental Health Advances*. 2024. P. 100114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114> (date of access: 13.11.2024).

## Tinturin S.G. APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENVIRONMENTAL PROTECTION MONITORING SYSTEMS

*Artificial intelligence is one of the most promising new areas of technology that has been developing rapidly over the past twenty years. Over the past ten years, artificial intelligence algorithms have been able to significantly influence all areas of human life, including the field of monitoring the state of the environment for the purpose of environmental protection. When monitoring the state of the environment, artificial intelligence systems analyze vast amounts of data from various sources, such as satellites, sensors and drones, to provide real-time information for environmental professionals. This article provides an overview of the application of artificial intelligence in environmental protection monitoring systems, which helped to better understand the principles of their work and the shortcomings they have. For this, the works of Ukrainian and foreign researchers were analyzed, which confirmed the relevance of the chosen topic. The results of the current study found that integrating artificial intelligence algorithms into the environmental monitoring process provides transformative benefits in a variety of areas, including soil, water, and air quality monitoring, traffic management, and carbon footprint tracking. All this makes a significant contribution to environmental protection, public health protection and sustainable development of society. For future research in this direction, there is a critical need to focus on the ethical implications and quantifying the impact of artificial intelligence technologies on the environment. The development of standardized methods for assessing the ecological footprint of monitoring systems based on artificial intelligence and studying the ethical aspects of their deployment will ensure the responsible and safe use of these systems, which will make them even more popular for use in the field of ecology.*

**Key words:** artificial intelligence, ecosystem, limited natural resources, monitoring systems, climate changes.