

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЗАСОБАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Стасевич С.П., Махняк А.Я.

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів

serhiy.p.stasevych@lpnu.ua, andrii.y.makhniak@lpnu.ua

Штучний інтелект (ШІ) – це широка інноваційна галузь, розробкою якої займаються багато людей, компаній та організацій по всьому світу. Важко назвати одну людину або компанію, яка є «розробником» ШІ в цілому, оскільки це скоріше колективний процес, що включає в себе дослідження, розробку алгоритмів, створення програмного забезпечення та багато іншого.

Традиційні методи моніторингу ґрунту, такі як ручний відбір проб та лабораторний аналіз, часто є трудомісткими та надають обмежений обсяг даних. Однак штучний інтелект пропонує інноваційні рішення, які підвищують точність, ефективність і масштабованість в моніторингу та управлінні стану якості ґрунту.

Забруднення, кліматичні зміни та збільшення кількості людей на планеті є одними з ключових факторів, що негативно впливають на якість води. Вода є життєво важливою для людини, і її якість має вирішальне значення для здоров'я та безпеки населення. Традиційні методи моніторингу якості води ґрунтуються на трудомісткому, дорогому та обмеженому за обсягом ручному відборі проб та лабораторному аналізі. А також вони мають суттєві недоліки, такі як тривалий час обробки, високі обчислювальні вимоги та можливість людських помилок, що ускладнює отримання надійних прогнозів.

Однією з найактуальніших екологічних проблем, що негативно впливає на якість життя, економічне зростання та здоров'я людей, є забруднення повітря. Забруднення повітря є серйозною загрозою для здоров'я людини, що може спричинити розвиток раку, серцево-судинних захворювань та респіраторних захворювань. Серед дослідників спостерігається підвищений інтерес до використання ШІ для моніторингу якості повітря як інструменту для вирішення даної проблеми.

Використання ШІ для прогнозування стихійних лих дає ряд переваг перед більш традиційними підходами. Системи ШІ здатні аналізувати величезні обсяги даних з різних джерел, створюючи детальну картину стану навколишнього середовища в реальному часі. Це дає змогу владі заздалегідь планувати потенційні стихійні лиха та швидко діяти для їх вирішення. Системи ШІ здатні розробляти персоналізовані рішення для боротьби з різними типами стихійних лих у різних місцевостях. Наприклад, алгоритми ШІ можуть пропонувати зміни до правил зонування, розвитку інфраструктури та будівельних норм, щоб знизити ймовірність повеней, землетрусів або лісових пожеж. *Ключові слова:* штучний інтелект, моделі штучного інтелекту, моніторинг навколишнього середовища, довкілля, ШІ в моніторингові ґрунтів, ШІ в моніторингові якості води, ШІ в моніторингові якості повітря, ШІ для прогнозування стихійних лих.

Increasing the efficiency of environmental monitoring using artificial intelligence. Stasevych S., Makhniak A.

Artificial Intelligence is a broad field of innovation, developed by many people, companies and organizations around the world. It is difficult to name one person or company that is the “developer” of AI as a whole, as it is more of a collective process that includes research, algorithm development, software creation and much more.

Traditional soil monitoring methods, such as manual sampling and laboratory analysis, are often labor-intensive and provide limited data. However, AI offers innovative solutions that increase the accuracy, efficiency and scalability of soil quality monitoring and management.

Pollution, climate change and the increase in the number of people on the planet are among the key factors negatively affecting water quality. Water is vital to humans, and its quality is crucial for the health and safety of the population. Traditional methods of monitoring water quality rely on labor-intensive, expensive and limited manual sampling and laboratory analysis. They also have significant drawbacks, such as long processing times, high computational requirements, and the possibility of human error, which makes it difficult to obtain reliable forecasts.

One of the most pressing environmental problems that negatively affects the quality of life, economic growth, and human health is air pollution. Air pollution is a serious threat to human health, which can cause the development of cancer, cardiovascular diseases, and respiratory diseases. There is increased interest among researchers in using AI to monitor air quality as a tool to solve this problem.

Using AI to predict natural disasters offers several advantages over more traditional approaches. AI systems are able to analyze huge amounts of data from various sources, creating a detailed picture of the state of the environment in real time. This allows authorities to plan in advance for potential natural disasters and act quickly to resolve them. AI systems are able to develop personalized solutions to combat different types of natural disasters in different locations. For example, AI algorithms can suggest changes to zoning regulations, infrastructure development, and building codes to reduce the likelihood of floods, earthquakes, or wildfires. *Key words:* artificial intelligence, artificial intelligence models, environmental monitoring, environment, AI in soil monitoring, AI in water quality monitoring, AI in air quality monitoring, AI for natural disaster forecasting.

Постановка проблеми. На даний час штучний інтелект широко застосовується у моніторингові навколишнього середовища. Його використання збільшує об'єктивність отриманих результатів і робить доступним моніторинг навколишнього середовища для регіонів, які страждають від обмежених ресурсів для життєдіяльності людини. Штучний інтелект дозволяє проводити аналіз вели-

ких наборів даних для виявлення закономірностей і здійснення точних прогнозів в екологічному моніторингові. Можливості штучного інтелекту використовуються для вирішення різноманітних завдань у сфері моніторингу навколишнього середовища, серед яких – прогнозування природних катаклізмів, контроль за станом повітря, води, ґрунту, а також виявлення і контроль за концентрацією забруднюючих речовин.

Актуальність дослідження. Процес екологічного моніторингу передбачає систематичні спостереження, вимірювання та постійну оцінку параметрів навколишнього середовища для виявлення будь-яких змін, які можуть бути шкідливими для екосистеми або здоров'я населення.

Традиційними методами моніторингу стану навколишнього середовища є статистичний аналіз, лабораторний аналіз та ручний відбір проб, і вони мають суттєві недоліки: високу вартість, довго тривалість у часі та низьку точність вимірювання. Дуже часто традиційні програми екологічного моніторингу є вузько спеціалізованими, використовують невеликі об'єми вибірок і не дають повної картини стану навколишнього середовища.

Використання інноваційних технологій і наявність підготовлених кваліфікованих фахівців для регулярного точного моніторингу навколишнього середовища є першочерговим завданням для кожної країни, особливо це стосується України, яка отримала від бойових дій Росії нищівні руйнації території та інфраструктури.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Застосування інноваційних методів та інструментів з використанням дієвих алгоритмів штучного інтелекту у моніторингу навколишнього середовища дозволяє розробити ефективну систему управління екологічною безпекою у державі. Особливо це стає актуальним для приведення довілля, постраждалого від воєнних дій, до нормованого стану у відповідності до європейських та світових норм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Штучний інтелект (ШІ, англ. Artificial Intelligence, AI) став провідною технологією Четвертої промислової революції [1] (Індустрія 4.0, англ. Industry 4.0) і за останнє десятиріччя використовується у все більше галузях економічного та суспільного життя більшості країн. Штучний інтелект, що імітує поведінку та інтелект людини, впроваджується в автоматизовані виробничі та інформаційні системи. Моделювання з використанням штучного інтелекту є ключем до побудови автоматизованих, інтелектуальних та розумних систем відповідно до потреб сьогодення [2]. Для вирішення реальних проблем можуть застосовуватися різні типи штучного інтелекту для підвищення інтелектуальних можливостей програми: аналітичний, функціональний, інтерактивний, текстовий і візуальний ШІ [3].

Застосування штучного інтелекту в моніторингу ґрунтів є значним прогресом у сільськогосподарському управлінні, збереженні навколишнього середовища та плануванні землекористування [4].

Моделі випадкового лісу (**Random Forests**) та дерева рішень (**Decision Trees**) виявилися дуже корисними при роботі зі складними наборами даних, що містять велику кількість змінних. Ці алгоритми дають можливість передбачати такі властивості ґрунту, як вміст вологи, рівень поживних речовин і pH, аналізуючи великі обсяги даних із різних джерел [5, 6]. Використання алгоритму випадкового лісу, наприклад, у дослідженні запасів органічного вуглецю в ґрунті, продемонструвало значне підвищення точності порівняно зі стандартними статистичними методами [7].

Опорні векторні машини (**SVM**, від англ. Support Vector Machine) застосовують для класифікації типів ґрунтів за фізико-хімічними властивостями, забезпечуючи точнішу оцінку стану ґрунту та сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень [8].

У моніторингу стану ґрунту велику увагу також приділяють моделям глибокого навчання. Згорткові нейронні мережі (**CNN** or **ConvNet**, від англ. Convolutional Neural Networks) застосовують для аналізу ґрунту на основі зображень. Аналізуючи зображення, отримані з супутників або дронів, згорткові нейронні мережі здатні ідентифікувати особливості, що свідчать про стан ґрунту, ерозію та забруднення [9].

Рекурентні нейронні мережі (**RNN**, від англ. Recurrent Neural Networks) допомагають прогнозувати зміни властивостей ґрунту з часом, аналізуючи історичні дані та дані ґрунту у вигляді часових рядів [10].

Моніторинг якості води в режимі реального часу забезпечує використання штучного інтелекту [11]. Алгоритми машинного навчання дозволяють опрацьовувати дані з різних джерел. Сюди входять дані про погоду, історичні записи та дані з датчиків якості води і це дозволяє алгоритмам відслідковувати закономірності та тенденції, які можуть свідчити про зміни в якості води. За допомогою ШІ можна виявляти ледь помітні зміни у якості води, як-от коливання температури, pH, рівня кисню та наявність забруднювачів, що може вказувати на забруднення або інші проблеми [12].

Системи ШІ здатні надавати *актуальну та точну інформацію про якість повітря в реальному часі*, що допомагає владі розробляти ефективні стратегії та заходи для боротьби із забрудненням повітря [13]. У разі погіршення якості повітря, рекомендації, генеровані штучним інтелектом, можуть допомогти вжити своєчасних заходів для захисту здоров'я населення. Алгоритми машинного навчання використовують дані з різних джерел (датчики якості повітря, супутникові зображення та дані про погоду, тощо) для надання актуальної інформації про якість пові-

тря. Такі алгоритми здатні аналізувати дані та виявляти в таких даних закономірності, можуть визначати джерела забруднення, оцінювати його масштаби та надавати рекомендації щодо зменшення забруднення повітря.

У дослідженні [14] наведено класифікацію інструментів ШІ для прогнозування забруднення повітря на основі таких факторів, як ефективність, вхідні дані та частота використання методів штучного інтелекту.

В останні роки для моніторингу навколишнього середовища широко почали застосовувати алгоритми штучного інтелекту як от штучні нейронні мережі (ANN від англ. Artificial Neural Networks), глибокі нейронні мережі (DNN, від англ. Deep Neural Networks), машини підтримки векторів SVM та нечітку логіку (Fuzzy Logic). На даний час найефективнішим інструментом для моніторингу навколишнього середовища на основі штучного інтелекту є глибокі нейронні мережі DNN [14].

У роботі [15] проведені порівняльні дослідження інших методів і моделей, призначених для аналізу стану повітря, і які пропонують використовувати регресію вектору підтримки (SVR, від англ. Support Vector Regression) та авторегресійну інтегровану ковзну середню (ARIMA – AutoRegressive Integrated Moving Average) як найефективніші методи аналізу часових рядів твердих частинок (PM) діаметром $<10\ \mu\text{m}$ і діаметром $<2,5\ \mu\text{m}$.

Останнім часом ШІ використовують у *прогнозуванні стихійних лих та пом'якшенні їхніх наслідків*. Рішення на основі ШІ можуть надавати точні дані про стихійні лиха в режимі реального часу, тим саме надаючи владі дієвий інструмент для створення ефективних планів реагування та знижувати ризики для громадської безпеки [16].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У теперішній час навколишнє середовище України перебуває не тільки під впливом антропогенного навантаження, але й від пагубних наслідків воєнних дій Росії, яка піддає руйнації промислові та інфраструктурні об'єкти України, що значно забруднює довкілля внаслідок їх ушкоджень та руйнування. Тому необхідно обґрунтовано вибрати правильну модель штучного інтелекту для вирішення конкретної екологічної задачі.

Новизна. У дослідженні аналізуються основні моделі штучного інтелекту, що використовуються для побудови моделей екологічного моніторингу навколишнього середовища в режимі реального часу: ґрунтів, якості повітря та води, прогнозуванні стихійних лих тощо.

Методологічне або загальнонаукове значення. Застосування інноваційних інформаційно-телекомунікаційних технологій у моделях штучного інтелекту значно прискорює і оптимізує процеси автоматизації отримання, обробки, зберігання та візуалізації екологічної інформації.

Викладення основного матеріалу. Завдяки точності алгоритмів ШІ, людський фактор зводиться до мінімуму, що сприяє більш точному екологічному моніторингу навколишнього середовища.

Переваги використання штучного інтелекту в моніторингу ґрунтів є суттєвими. Масштабованість рішень на основі ШІ дозволяє проводити комплексну оцінку стану ґрунту на великих сільськогосподарських територіях. Прогнозні дані моделей ШІ надають можливість динамічного управління станом ґрунту, наприклад, шляхом коригування графіків поливу та оптимізації внесення добрив [17] або запровадження заходів у боротьбі з ерозією.

Використання ШІ для моніторингу ґрунтів демонструє, як передові технології здатні змінювати традиційні підходи в сфері сільського господарства та екології. У міру розвитку технологій, ШІ відкриває нові можливості для більш ефективного та сталого управління земельними ресурсами.

Використання ШІ для оцінки якості води має низку переваг перед звичайними методами. ШІ забезпечує можливість постійного та миттєвого контролю за якістю води, що дозволяє органам влади оперативно реагувати на будь-які зміни та швидко і ефективно вирішувати проблеми з якістю води. Крім того, системи на основі ШІ можуть аналізувати величезні обсяги даних з численних джерел, надаючи всебічну картину змін у якості води. Ця здатність допомагає виявляти тенденції та закономірності в зміні якості води, прогнозувати майбутні проблеми та розробляти вірні стратегії для їх усунення. Рекомендації, надані ШІ, можуть також сприяти своєчасному вжиттю заходів для вирішення проблем з якістю води. Наприклад, модель може аналізувати дані в реальному часі, визначати найкращий час для очищення води або рекомендувати конкретні методи боротьби із забруднювачами [18].

Використовуючи алгоритми ШІ для аналізу даних про якість води та стану навколишнього середовища, можна створювати ефективні стратегії для контролю забруднення та збереження водних екосистем, що сприятиме підтримці біорізноманіття [19].

Моделі ШІ, зокрема глибоке навчання, дерева рішень, машини опорних векторів SVM та штучні нейронні мережі ANN [20] використовуються для прогнозування змін у якості води, таких як рН, температура та розчинений кисень. Залежно від типу та мети завдання моделі ШІ використовують різні вхідні параметри. Наприклад, в одних дослідженнях застосовувалися хімічні показники, такі як розчинений кисень, біохімічна потреба в кисні та загальний азот, тоді як в інших – фізичні параметри, такі як температура, рН та каламутність. Моделі штучного інтелекту можуть надати точні та ефективні рішення для моніторингу якості води [21].

Аналіз та прогнозування якості повітря значною мірою залежить від інформації, яка використовується конкретною моделлю ШІ та які саме забруд-

нювачі повітря переважають у даному регіоні. Використання гібридних моделей може забезпечувати кращу ефективність у політиці моніторингу та прийняття рішень щодо навколишнього середовища. Гібридні моделі поєднують властивості та переваги двох алгоритмів штучного інтелекту для прийняття обґрунтованих рішень щодо можливих наслідків від забруднювачів повітря, а також є більш надійними для прогнозування якості повітря [22].

ШІ для моніторингу якості повітря має ряд переваг перед традиційними методами. У порівнянні зі звичайними методами, системи ШІ забезпечують вищу точність збору та аналізу даних, що мінімізує можливість помилок та невідповідностей у даних про якість повітря. Крім того, алгоритми ШІ можуть надавати індивідуальні рішення для різних джерел забруднення та регіонів. Моделі ШІ, аналізуючи дані з різних локацій та джерел, можуть розробляти індивідуальні стратегії щодо зменшення забруднення повітря, до прикладу, регулювати транспортні потоки, оптимізувати роботу промислових підприємств або пропонувати зміни для міського планування [21, 23].

Рекомендації, розроблені на основі ШІ, можуть відігравати ключову роль у моніторингу якості повітря, надаючи ефективну інформацію для пом'якшення забруднення. Наприклад, алгоритми ШІ можуть рекомендувати зміни в організації дорожнього руху під час годин пікового забруднення, щоб зменшити викиди. Або запропонувати оптимальний час для промислових операцій для мінімізації впливу на навколишнє середовище. Також алгоритм штучного інтелекту здатен визначити зелені зони, де рівень забруднення знаходиться в безпечних межах [24, 25].

Рекомендації надані алгоритмами ШІ для моніторингу якості повітря допомагають органам влади впроваджувати своєчасні заходи, забезпечуючи збереження якості повітря в допустимих межах, тим саме здійснюючи захист здоров'я населення.

Алгоритми ШІ є важливими інструментами для міського управління та планування. Вони дозволяють аналізувати дані про якість повітря, трафік та розвиток міста, щоб створювати персоналізовані рішення для зменшення забруднення повітря [26]. Наприклад, алгоритм може рекомендувати зміни в організації дорожнього руху для зменшення заторів та кількості шкідливих викидів, або ж модифікації у міському плануванні для поліпшення циркуляції повітря та зниження концентрації шкідливих речовин. У промислових операціях алгоритм ШІ може аналізувати дані про викиди та розробляти індивідуальні рішення для зменшення забруднення, наприклад, шляхом впровадження більш екологічних матеріалів та джерел енергії, або оптимізації виробничих процесів для мінімізації відходів та викидів [27].

Штучний інтелект ефективно використовується в прогнозуванні стихійних лих, обробляючи великі масиви даних з різних джерел, таких як супут-

никові знімки, сейсмічні датчики та метеорологічні прогнози. Це дозволяє виявити закономірності та оцінити ризики виникнення катастроф [28].

Доступність до даних і якість самих даних представляє ще одну складність [16]. Створити точні та надійні системи прогнозування на основі ШІ складно, оскільки є багато регіонів світу з недостатніми даними про стихійні лиха. Політичні та економічні питання, поряд з технологічними обмеженнями, також можуть створювати перешкоди для отримання необхідних даних. Важливо враховувати також етичні наслідки використання ШІ для прогнозування стихійних лих (конфіденційність, права власності та можливе зловживання даними).

Головні висновки. Управління водними ресурсами та їх очищення є одним із ключових напрямків застосування ШІ. На основі аналізу даних про якість води, ШІ може розробляти спеціалізовані рішення для очищення та управління водними ресурсами, наприклад, рекомендувати конкретні системи фільтрації або стратегії хімічної обробки для зменшення негативного впливу забруднення.

Сільське господарство та виробництво продуктів харчування також отримують вигоду від моніторингу якості води на основі ШІ. На основі аналізу даних про якість води, алгоритми ШІ можуть розробляти спеціалізовані стратегії зрошення та управління врожаєм для пом'якшення негативного впливу забруднення води. Наприклад, можна оптимізувати графіки поливу, а також вибрати культури, які менш сприйнятливі до забруднення води.

Системи ШІ здатні аналізувати великі обсяги даних з різних джерел та надавати комплексну картину якості повітря в реальному часі. Це в свою чергу дозволяє керівним органам приймати обґрунтовані рішення та швидко діяти для зменшення забруднення повітря.

Існують проблеми, такі як відсутність стандартів у зборі та обробці даних, а також обмежена доступність високоякісних даних. Тому майбутні дослідження повинні зосередитися на створенні більш надійних моделей, здатних обробляти різні джерела даних та забезпечувати точні прогнози для різноманітних показників якості води.

Переваги прогнозування стихійних лих на основі ШІ, можуть бути знівельовані низкою питань, які потрібно вирішити для його успішного застосування. Якість і доступність даних, що використовуються для аналізу, є однією з основних перешкод для прогнозування стихійних лих. Точність та надійність даних є необхідною умовою для того, щоб системи ШІ могли ефективно прогнозувати та приймати правильні рішення.

На противагу перевагам застосування ШІ в екологічному моніторингу виникає і ряд проблем. Ефективність моделей ШІ значною мірою залежить від якості та доступності даних про ґрунт. Якщо дані є неточними або неповними, то прогнози, зро-

блені на їх основі, будуть ненадійними. Саме тому так важливо використовувати надійні методи збору даних. Інтеграція ШІ, крім іншого, передбачає значні інвестиції на розбудову інфраструктури та навчання моделей. Однак, незважаючи на значні початкові інвестиції, довгострокова економія від використання технологій ШІ зазвичай є вищою завдяки автоматизації та зниженню потреби в людській праці.

Перспективи використання результатів дослідження. Використання штучного інтелекту відкриває значні перспективи для моніторингу навколишнього середовища в Україні, яка стикається з численними екологічними викликами, включаючи забруднення повітря та води, проблеми з відходами, втрату біорізноманіття та наслідки війни. Застосування ШІ дозволяє покращити ефективність, точність та оперативність екологічного моніторингу, а також сприяти прийняттю обґрунтованих рішень для захисту довкілля. Ось деякі перспективні напрями використання ШІ.

Автоматизований моніторинг забруднення – ШІ може аналізувати дані з різних джерел (супутники, дрони, наземні датчики, промислові сенсори тощо) для виявлення та оцінки рівня забруднення повітря, води та ґрунтів у режимі реального часу. Це дозволить оперативно реагувати на надзвичайні ситуації та контролювати дотримання екологічних норм.

Прогнозування екологічних ризиків – ШІ завдяки аналізу історичних даних та поточних екологічних показників може прогнозувати природні катастрофи та техногенні аварії для вживання превентивних заходів та мінімізації їхніх наслідків.

Оцінка стану біорізноманіття – ШІ може використовуватися для моніторингу популяцій диких тварин, виявлення браконьєрства та оцінки стану екосистем.

Оптимізація використання природних ресурсів – ШІ може допомогти в аналізі даних про споживання води, енергії та інших природних ресурсів та розробити рекомендації щодо оптимізації їх використання.

Управління відходами – ШІ може застосовуватися для оптимізації процесів збору, сортування та переробки відходів, а також для моніторингу стану полігонів та виявлення несанкціонованих сміттєзвалищ.

Аналіз впливу війни на довкілля – ШІ може бути використаний для аналізу супутникових знімків та інших даних для оцінки збитків, завданих навколишньому середовищу внаслідок бойових дій, та планування заходів з відновлення території.

Підтримка прийняття рішень – ШІ може аналізувати великі обсяги екологічних даних, надаючи експертам та урядовцям обґрунтовані рекомендації для розробки екологічної політики та прийняття управлінських рішень.

Незважаючи на значний потенціал, впровадження ШІ в екологічний моніторинг в Україні потребує вирішення ряду завдань, включаючи забезпечення доступу до якісних даних, розвиток відповідної інфраструктури та підготовку кваліфікованих фахівців. Проте, враховуючи нагальність екологічних проблем, інвестиції в цю сферу можуть принести значні вигоди для сталого розвитку країни та збереження її природного багатства.

Література

1. The Fourth Industrial Revolution. What It Means and How to Respond. By Klaus Schwab. December 12, 2015. URL: <https://www.foreignaffairs.com/world/fourth-industrial-revolution> (дата звернення: 04.04.2025).
2. Sarker, I.H. AI-based modeling: techniques, applications and research issues towards automation, intelligent and smart systems. *SN Computer Science*. 2020. № 3:158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01043-x>.
3. Russell, S., Norvig, P. *Artificial intelligence: A modern approach (4th ed., Global ed.* Pearson. 2021. P. 1166.
4. 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. 15 (21), 15444. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152115444>.
5. Folorunso, O., Ojo, O., Busari, M., Adebayo, M., Joshua, A., Folorunso, D., Ugwunna, C. O., Olabanjo, O., Olabanjo, O. Exploring machine learning models for soil nutrient properties prediction: a systematic review. *Big Data Cogn. Comput.* 2023. 7 (2), 113. DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc7020113>.
6. John, K., Abraham Isong, I., Michael Kebonye, N., Okon Ayito, E., Chapman Agyeman, P., Marcus Afu, S. Using machine learning algorithms to estimate soil organic carbon variability with environmental variables and soil nutrient indicators in an alluvial soil. *Land* (Basel). 2020. 9 (12), 487. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9120487>.
7. Wang, S., Gao, J., Zhuang, Q., Lu, Y., Gu, H., Jin, X. Multispectral remote sensing data are effective and robust in mapping regional forest soil organic carbon stocks in a northeast forest region in China. *Remote Sens.* (Basel). 2020. 12 (3), 393. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12030393>.
8. Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A.B. Machine learning and soil sciences: a review aided by machine learning tools. *Soil*. 2020.6 (1), 35–52. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-6-35-2020>.
9. Feizizadeh, B., Garajeh, M.K., Lakes, T., Blaschke, T. A deep learning convolutional neural network algorithm for detecting saline flow sources and mapping the environmental impacts of the Urmia Lake drought in Iran. *Catena* (Amst.) 2021. 207, 105585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105585>.
10. Bai, D., Lu, G., Zhu, Z., Tang, J., Fang, J., Wen, A. Using time series analysis and dual-stage attention-based recurrent neural network to predict landslide displacement. *Environ. Earth Sci.* 2021. 81 (21), 509. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10637-w>.
11. Artiola, J., Pepper, I.L., Brusseau, M.L. (2004). Environmental Monitoring and Characterization. *Academic Press*. 2004. 410 p.
12. Ye, Z., Yang, J., Zhong, N., Tu, X., Jia, J., Wang, J. Tackling environmental challenges in pollution controls using artificial intelligence: a review. *Sci. Total Environ.* 2019. 699: 134279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134279>.

13. El-Magd, S.A.A., Soliman, G., Morsy, M., Kharbish, S. Environmental hazard assessment and monitoring for air pollution using machine learning and remote sensing. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2022. 20(6), 6103–6116. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04367-6>.
14. Masood, A., Ahmad, K. A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: fundamentals, application and performance. *J. Clean. Prod.* 2021. 322, 129072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129072>.
15. Dobrea, M., B̃ adicu, A., Barbu, M., Subea, O., B̃ alanescu, ̃ M., Suciū, G., Dobre, C. Machine learning algorithms for air pollutants forecasting. In: *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. IEEE, 2020. pp. 109–113. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIITME50350.2020.9292238>.
16. Zhang, X., Shu, K., Rajkumar, S., Sivakumar, V. Research on deep integration of application of artificial intelligence in environmental monitoring system and real economy. *Environ. Impact Assess. Rev.* 2021. 86, 106499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106499>.
17. Elshaikh, A., Elsheikh, E., Mabrouki, J. Applications of Artificial Intelligence in Precision Irrigation. *J. Environ. Earth Sci.* 2024. 6 (2), 176–186. DOI: <https://doi.org/10.30564/jees.v6i2.6679>.
18. Nova, K. AI-enabled water management systems: an analysis of system components and interdependencies for water conservation. *Eigenpub Rev. Sci. Technol.* 7 (1), 105–124. URL: <https://studies.eigenpub.com/index.php/erst/article/view/12> (дата звернення: 04.04.2025).
19. Wagle, N., Acharya, T.D., Lee, D.H. Comprehensive review on application of machine learning algorithms for water quality parameter estimation using remote sensing data. *Sens. Mater.* 2020. 32 (11), 3879–3892. DOI: <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2953>.
20. Aldhyani, T.H., Al-Yaari, M., Alkahtani, H., Maashi, M. Water quality prediction using artificial intelligence algorithms. *Appl. Bionics Biomech.* 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/6659314>.
21. Ortega-Fern' andez, 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. 12 (19), 7860. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12197860>.
22. Fu, L., Li, J., Chen, Y. An innovative decision making method for air quality monitoring based on big data-assisted artificial intelligence technique. *J. Innov. Knowl.* 2023. 8 (2), 100294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100294>.
23. Subramaniam, S., Raju, N., Ganesan, A., Rajavel, N., Chenniappan, M., Prakash, C., Dixit, S. Artificial intelligence technologies for forecasting air pollution and human health: a narrative review. *Sustainability.* 2022. 14 (16), 9951. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14169951>.
24. Boukerche, A., Tao, Y., Sun, P. Artificial intelligence-based vehicular traffic flow prediction methods for supporting intelligent transportation systems. *Comput. Netw.* 2020. 182, 107484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107484>.
25. Degas, A., Islam, M.R., Hurter, C., Barua, S., Rahman, H., Poudel, M., Ruscio, D., Ahmed, M.U., Begum, S., Rahman, M.A. A survey on artificial intelligence (ai) and explainable ai in air traffic management: current trends and development with future research trajectory. *Appl. Sci.* 2022. 12(3), 1295. <https://doi.org/10.3390/app12031295>.
26. Almalawi, A., Alsolami, F., Khan, A.I., Alkhatlan, A., Fahad, A., Irshad, K., Qaiyum, S., Alfakeeh, A.S. An IoT based system for magnify air pollution monitoring and prognosis using hybrid artificial intelligence technique. *Environ.* 2022. № 206:112576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112576>.
27. Alpan, K., Sekeroglu, B. Prediction of pollutant concentrations by meteorological data using machine learning algorithms. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* 2020. 44, 21–27. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-21-2020>.
28. Marcin Frackiewicz. The use of artificial intelligence in environmental monitoring [online]. 2023. DOI: <https://ts2.space/en/the-use-of-artificial-intelligence-in-environmental-monitoring/> (дата звернення: 04.04.2025).
29. Bloomfield, P., Clutton-Brock, P., Pencheon, E., Magnusson, J., Karpathakis, K. Artificial Intelligence in the NHS: Climate and Emissions. *J. Clim. Change Health.* 2021. № 4:100056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2021.100056>.
30. Gundeti, R., Vuppala, K., Kasireddy, V. The Future of AI and Environmental Sustainability: Challenges and Opportunities. In H. Kannan, R. Rodriguez, Z. Paprika, & A. Ade-Ibijola (Eds.), *Exploring Ethical Dimensions of Environmental Sustainability and Use of AI*. 2024. C. 346–371. DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0892-9.ch017>.