УДК 504.054:574.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.26

ДІЄВІ АЛГОРИТМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГОВІ

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

Сучасний світ став зовсім іншим, відмінним від усіх попередніх епох розвитку людства. Прийдешня цифровізація світової економіки перебудовує всі механізми взаємодії між людьми і державами: змінюються принципи спілкування людей, торгівлі та укладання угод. Бізнес, щоб залишатися конкурентоспроможним і зберегтися у майбутньому, змушений маневрувати дуже швидко, освоювати нові можливості на ринках, особливо на цифровому.

Сучасний смартфон дозволяє проводити спілкування людей у режимі реального часу «будь-де, будь-коли і завжди» з усіма частинами світу. Мобільні технології стали рушійною силою появи нових інноваційних моделей роботи фінансових організацій в цифровому середовищі. Новий напрямок роботи в цифровому середовищі називається фінтех (фінансові технології, англ. FinTech) – технології, що включають програмне забезпечення, додатки, процеси та бізнес-моделі. Людство перетворило смартфон на ще розумніший пристрій – на апарат для укладання угод: ми здатні здійснювати транзакції і торгувати один з одним у режимі реального часу, віч-на-віч, 24 на 7.

Останнім часом говорять про нові інноваційні тенденції, що несуть світовій економіці сучасні інформаційно-комунікаційні технології: «Smart», «Digital Factory» та «Digitalization». Звідси й походить назва «Цифрова економіка», яка об'єднує багато інноваційних технологій: Інтернет речей, великі дані, хмарні обчислення, віддалений та мобільний доступ, бездротовий зв'язок, 3D друк тощо.

Глобальна інформатизація суспільства у всіх сферах суспільного життя та бурхливий розвиток інформаційно-комунікаційних систем формують єдиний світовий інформаційний простір, збільшуючи доступність користувачів до загальних інформаційно-обчислювальних ресурсів серверів, сховищ, мережі, додатків та інших хмарних послуг (cloud computing).

Штучний інтелект (ШІ, англ. Artificial Intelligence, AI) є провідною технологією сучасної епохи Четвертої промислової революції [1] (Індустрія 4.0 або 4IR, англ. The Fourth Industrial Revolution – Industry 4.0, нім. Industrie 4.0). Штучний інтелект здатний включати людську поведінку та інтелект у машини чи системи. Таким чином, моделювання на основі штучного інтелекту є ключем до побудови автоматизованих, інтелектуальних та розумних систем відповідно до потреб сьогодення. Для вирішення реальних проблем можуть застосовуватися різні типи штучного інтелекту, такі як аналітичний, функціональний, інтерактивний, текстовий і візуальний ШІ, для підвищення інтелекту та можливостей програми. *Ключові слова:* штучний інтелект, моделі штучного інтелекту, моніторинг навколишнього середовища, довкілля, переваги використання штучного інтелекту, недоліки використання штучного інтелекту.

Effective artificial intelligence algorithms in environmental monitoring. Stasevych S., Makhniak A.

The modern world has become entirely different, distinct from all previous eras of human development. The impending digitalization of the global economy is reshaping all mechanisms of interaction between people and states: the principles of human communication, trade, and agreements are changing. To remain competitive and survive in the future, businesses are forced to maneuver very quickly, mastering new opportunities in markets, especially in the digital one.

The modern smartphone allows people to communicate in real-time "anywhere, anytime, and always" with all parts of the world. Mobile technologies have become the driving force behind the emergence of new innovative business models for financial organizations in the digital environment. This new direction of work in the digital environment is called FinTech (Financial Technology) – technologies that include software, applications, processes, and business models. Humanity has transformed the smartphone into an even smarter device – an apparatus for making deals: we are capable of conducting transactions and trading with each other in real-time, face-to-face, 24/7.

Recently, there has been talk about new innovative trends that modern information and communication technologies are bringing to the global economy: "Smart," "Digital Factory," and "Digitalization." Hence the name "Digital Economy," which combines many innovative technologies: the Internet of Things, big data, cloud computing, remote and mobile access, wireless communication, 3D printing, and more.

The global informatization of society in all spheres of public life and the rapid development of information and communication systems are forming a unified global information space, increasing users' access to common information and computing resources of servers, storage, networks, applications, and other cloud services (cloud computing).

Artificial Intelligence (AI) is the leading technology of the modern era of the Fourth Industrial Revolution [1] (Industry 4.0 or 4IR). Artificial intelligence is capable of incorporating human behavior and intelligence into machines or systems. Thus, AI-based modeling is key to building automated, intelligent, and smart systems according to today's needs. Various types of AI, such as analytical, functional, interactive, textual, and visual AI, can be used to solve real-world problems and enhance the intelligence and capabilities of applications. *Key words:* artificial intelligence, artificial intelligence models, environmental monitoring, environment, advantages of using artificial intelligence, disadvantages of using artificial intelligence.

Постановка проблеми. Штучний інтелект став важливою інтеграцією в зусилля з моніторингу навколишнього середовища, спрямованих на підвищення об'єктивності результатів і поліпшення доступності для регіонів, які страждають від обмежених ресурсів. Він дозволяє аналізувати великі набори даних, що є корисним для виявлення закономірностей і здійснення точних прогнозів. 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, методичні вимірювання та постійну оцінку природного середовища та всіх його компонентів. Моніторинг поточного стану навколишнього середовища та виявлення будь-яких змін, які можуть бути шкідливими для екосистеми або здоров'я населення, є його основною метою.

Статистичний аналіз, лабораторний аналіз та ручний відбір проб є типовими методами, що використовуються для моніторингу стану навколишнього середовища. Основними проблемами традиційних методів екологічного моніторингу є їх висока вартість, тривалість та низька точність. Ці фактори значно обмежують їх ефективність. Вартість використання цих процедур є однією з найбільших перешкод. Витрати, пов'язані з ручним відбором проб і лабораторним аналізом є доволі високі, вони включають працю кваліфікованих працівників, обладнання та хімікати. Як наслідок, програми екологічного моніторингу часто мають вузьку спрямованість, використовують невеликі розміри вибірок і не дають повної картини стану навколишнього середовища. Через тривалий процес ручного відбору проб та лабораторного аналізу, рішення та реагування на надзвичайні ситуації (стихійні лиха, кризи забруднення) можуть бути значно відкладені. Окрім цього, суб'єктивність спостереження людини та її потенційна помилка обмежують точність традиційних методів моніторингу навколишнього середовища [2]. Через людський фактор, ручний відбір проб та лабораторний аналіз може призводити до помилок та неточностей у зборі та обробці даних.

Використання передових технологій і наявність належним чином підготовленого технічного персоналу, необхідного для точного моніторингу навколишнього середовища, часто перешкоджають обмеженням у фінансуванні та дефіцитом кваліфікованих спеціалістів. Отже, забезпечення регулярного моніторингу стає важким завданням, особливо в регіонах з обмеженими ресурсами. І це особливо помітно в областях, де бракує технологічної інфраструктури та досвіду [3].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Застосування інноваційних методологій 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 довкілля, постраждалого від воєнних дій, до нормованого стану у відповідності до європейських та світових норм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вибираючи модель штучного інтелекту для моніторингу навколишнього середовища, важливо враховувати такі фактори, як доступність і актуальність даних, обчислювальні ресурси та експертиза. Деякі моделі штучного інтелекту потребують великих даних та потужного обладнання, тоді як інші можуть працювати з меншими обсягами даних та меншими обчислювальними витратами.

Метод опорних векторів (SVMs, від англ. Support Vector Machine) добре підходить для обробки великих даних і вивчення складних взаємозв'язків між змінними, його можна використовувати з різними типами даних, включаючи зображення та текст. Наприклад, SVMs ефективно використовується для завдань класифікації зображень, таких як виявлення вирубки лісів та ідентифікації дикої природи [4].

Метод опорно-векторної регресією (ОВР, SVR, від англ. Support Vector Regression) варіант SVM, використовується для задач регресії в екологічному моніторингу, пропонуючи ефективне рішення для прогнозування параметрів екологічного контролю [5].

Метод дерева рішень (Decision tree) відносно простий у навчанні та інтерпретації, що робить його доступним для різних типів даних. Цей метод зазвичай використовується для таких завдань, як виявлення та моніторинг вирубки лісів, моніторинг якості повітря та якості води. Одним із недоліків дерева рішень є їхня схильність до перенавчання, особливо на зашумлених даних. Через цей метод не є найкращим вибором для завдань, де потрібно здійснювати розпізнавання зображень чи аналізувати текст.

Випадкові ліси (Random Forest) – цей метод машинного навчання відноситься до так званих ансамблевих методів. Він базується на об'єднанні великої кількості слабких моделей (в даному випадку – дерево рішень) в єдину модель з кращими прогностичними властивостями. Ці моделі більш стійкі до перенавчання, ніж окремі дерева рішень, і можуть обробляти різні типи даних, включаючи зображення та текст [6]. Випадкові ліси зазвичай використовуються для класифікації зображень, обробки тексту та завдань прогнозування часових рядів у екологічному моніторингу. Незважаючи на свою надійність, випадкові ліси можуть вимагати значного обсягу пам'яті та обчислювальної потужності.

Рекурентні нейронні мережі (RNNs, від англ. Recurrent Neural Networks) – це вид штучних нейронних мереж, який спеціалізується на обробці послідовних даних, таких як текст, мова, часові ряди тощо. RNNs здатні виявляти довгострокові зв'язки в даних, що робить їх цінними інструментами для прогнозування екстремальних погодних явищ та отримання інформації з екологічних документів. Навчання RNNs може займати багато часу та потребувати значних обчислювальних ресурсів. Також ця модель має проблеми з навчанням довгих послідовностей через зникаючий градієнт. Це означає, що мережа може «забувати» попередні дані, що ускладнює навчання.

Згорткові нейронні мережі (CNNs or ConvNet, від англ. Convolutional Neural Networks) добре підходять для класифікації зображень і завдань, пов'язаних з просторовими даними. CNNs можуть вивчати складні шаблони із зображень без явного програмування, що робить їх ідеальними для виявлення вирубки лісів та ідентифікації дикої природи [7]. Навчання даної моделі вимагає багато часу та потребує значних обчислювальних ресурсів, особливо для великих моделей та великих наборів даних. Дана модель потребує великої кількості даних для складних завдань, що при недостатній їх кількості може призводити до перенавчитися та погано працювати на нових прикладах. Навчання моделей CNNs може бути ускладненим через відсутність анотованих наборів даних для візуального розпізнавання. Моделі попереднього навчання з використанням даних зі схожих доменів можуть пом'якшити цю проблему [8].

Гібридні моделі, що інтегрують найкращі аспекти машинного та глибокого навчання, характеризуються високою точністю та надійністю. За допомогою цих моделей успішно вирішуються завдання моніторингу навколишнього середовища, що характеризуються складними нелінійними залежностями між різними параметрами. Хоча гібридні моделі можуть бути складнішими в навчанні та інтерпретації, вони забезпечують чудову продуктивність для задач екологічного моніторингу де ціна помилки є надто висока.

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., що піддає руйнації промислові та інфраструктурні об'єкти, що значно забруднює довкілля внаслідок їх ушкоджень та руйнації.

Вибір правильної моделі штучного інтелекту для конкретного екологічного завдання є критично важливим, адже кожна з них має свої сильні та слабкі сторін. SVMs та SVR ефективні для завдань з великими даними та регресією, але можуть бути економічно недоцільними через витрати на обчислювальні потужності. Дерева рішень прості та інтерпретовані, але схильні до перенавчання. Випадкові ліси вирізняються надійністю та універсальністю, але їх використання потребує значних обчислювальних ресурсів. CNNs є ідеальними для обробки зображень, проте їх ефективність залежить від великих обсягів мічених даних та значної обчислювальної потужності. RNNs, в свою чергу, добре працюють з послідовними даними, але також потребують значних обчислювальних ресурсів та складної архітектури системи. Гібридні моделі забезпечують найвищу точність і надійність, але їх складно тренувати та інтерпретувати. Тому необхідно обґрунтовано вибирати правильну модель штучного інтелекту для вирішення конкретної екологічної задачі.

Новизна. Дослідження пропонує аналіз основних алгоритмів штучного інтелекту, що використовуються для побудови моделей екологічного моніторингу навколишнього середовища (ґрунтів, якості повітря та води, прогнозуванні стихійних лих тощо). Розглядаються переваги і недоліки використання штучного інтелекту у різних видах екологічного моніторингу.

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

Викладення основного матеріалу. Варто визнати, що разом із численними перевагами у сфері штучного інтелекту для моніторингу навколишнього середовища, існує і кілька суттєвих недоліків і проблем. Потрібно завжди пам'ятати про актуальність даних, які є доречними для відповідальної та обґрунтованої розробки моделей ШІ.

Залежність від кількості та якості вхідних даних. Через недостатність або упередженість даних, модель може показувати низьку продуктивність чи виділятися алгоритмічною упередженістю. До прикладу модель ШІ для моніторингу якості повітря, навчена на даних з міських районів, може виявитися неефективною в сільській місцевості через відмінності в умовах, це може призвести до неточних прогнозів та прийняттю шкідливих рішень [9, 10].

Ресурсомісткість. Значні обчислювальні витрати, необхідні для навчання та запуску складних моделей ШІ, можуть стати бар'єром для розвитку та впровадження технологій штучного інтелекту. Це в першу чергу актуально для невеликих організацій та країн, що розвиваються. Ця диспропорція може посилити існуючу нерівність. Лише ті хто володіє достатніми ресурсами зможуть ефективно використовувати передові технології штучного інтелекту.

Інтерпретованість моделей ШІ, особливо глибокого навчання, залишається серйозним викликом. Через їхню складність, їх часто називають «чорними скриньками» («black boxes»), що ускладнює

розуміння процесів прийняття рішень. Здатність розуміти, як і чому модель ШІ приймає те чи інше рішення, є запорукою довіри користувачів до них і це є постійним викликом для розробників.

Суттєві пересторогиmають *ризики стосовно безпеки моніторингу*. Невеликі, ретельно продумані та підібрані зловмисником зміни у вхідних даних можуть обдурити модель ШІ [11]. Безпека та надійність ШІ є критично важливими, адже зловмисники можуть завдати значної шкоди. Як приклад маніпуляції системами ШІ в інтелектуальних мережах, може порушити розподіл електроенергії та завдати значної економічної шкоди. Окрім цього, зловмисник також може вплинути на продуктивність те ефективність моделі. Такі маніпуляції можуть призвести до збільшення витрати енергетичних ресурсів, що негативно впливає.на навколишнє середовище. Тому розробка енергоефективних та стійких моделей штучного інтелекту є нагальною потребою.

За своєю суттю моделювання штучного інтелекту ґрунтується на принципі навчання на основі даних. *Якість та кількість даних* є критично важливими для успіху моделювання штучного інтелекту. Моделі штучного інтелекту навчаються на великих наборах даних, просіюючи дані, щоб виявити закономірності, тенденції та взаємозв'язки. Вони допомагають контролювати якість води, аналізуючи такі параметри, як рівень pH, каламутність та вміст нітратів, для прогнозування можливого забруднення. Також моделі штучного інтелекту, застосовують, у сфері моніторингу якості повітря, аналізують дані з різних датчиків для прогнозування рівня забруднення та виявлення джерел забруднення. Використання машинного навчання та алгоритмів глибокого навчання в моніторингу навколишнього середовища є надзвичайно важливим, адже вони дозволяють опрацьовувати великі об'єми даних для прогнозування та прийняття ефективних рішень.

Узагальнення (Generalization) – це здатність моделі ШІ, навченої на конкретних наборах даних, успішно працювати з іншими, подібними, щоб робити прогнози або рішення в ширшому контексті. Ця гнучкість гарантує, що моделі штучного інтелекту можуть ефективно обробляти нові, невидимі дані [12]. Практичним прикладом застосування принципу узагальнення є модель CDLSTM (The Climate Deep Long Short-Term Memory), яка, аналізуючи історичні кліматичні дані, прогнозує майбутні кліматичні зміни.

Баланс між складністю та простотою моделі. Моделі ШІ не повинні бути ані надто складними, ані надто спрощеними. Занадто складні моделі можуть призвести до перенавчання, коли вони досягають високої точності на тренувальних даних, але втрачають здатність узагальнюватись на нових даних [13]. І навпаки, занадто спрощені моделі можуть не вловлювати складні закономірності в даних.

Баланс між складністю та узагальненням можна побачити на прикладі моделей моніторингу навколишнього середовища, які використовують випадкові ліси. *Ансамблеві методи* (Ensemble methods), що лежать в основі випадкових лісів, допомагають запобігти перенавчанню, зберігаючи при цьому надійність прогнозів.

Ключове значення має *інтерпретація моделі*. Розуміння принципів роботи моделі штучного інтелекту та її обґрунтувань є критично важливим для забезпечення довіри користувачів та вирішення етичних питань. Для моніторингу навколишнього середовища інтерпретовані моделі допомагають зацікавленим сторонам зрозуміти фактори, що сприяють забрудненню, тим самим сприяючи прийняттю вірно обґрунтованих рішень. Як приклад, дерева рішень, що використовуються в екологічному моніторингу, можуть надавати чіткі, інтерпретовані правила, які пояснюють, як конкретні умови навколишнього середовища призводять до певних результатів [14].

Головні висновки. Попри переваги використання ШІ для моніторингу навколишнього середовища, існує низка питань, які необхідно вирішити для успішного впровадження даної технології. Якість даних є критично важливим фактором і це є однією з домінуючих перешкод. Щоб системи ШІ могли робити точні прогнози та вибір, їм потрібні точні та надійні дані. Недостатньо якісні дані можуть стати причиною неточних прогнозів та суджень, що може мати серйозні наслідки для навколишнього середовища та здоров'я людей. Доступність даних для навчання та здійснення аналізу представляє ще одну складність. Окрім технологічних аспектів, необхідно звернути увагу на етичні питання, пов'язані з моніторингом довкілля за допомогою ШІ. Існує занепокоєння щодо того, хто володіє цими даними, як забезпечується їх конфіденційність та як можна запобігти їх неправомірному використанню.

Не зважаючи на очевидні переваги моделей ШІ для моніторингу стану навколишнього середовища варто враховувати які екологічні наслідки він несе. Технології штучного інтелекту, особливо ті, що пов'язані з обробкою великих обсягів даних, можуть мати значний вплив на навколишнє середовище, тому необхідно розробити стратегії управління, щоб забезпечити екологічну стійкість. Однією з основних проблем є **значне споживання енергії**, пов'язане з навчанням та експлуатацією моделей ШІ [15]. Часто така електроенергія отримана з невідновлюваних джерел енергії. Таке високе споживання енергії може призвести до збільшення викидів вуглецю, протидіючи позитивному впливу ШІ на стан довкілля. До того ж, апаратне забезпечення, що використовується для функціонування ШІ, зокрема сервери та системи зберігання даних, вимагає виробничих процесів, які часто передбачають використання рідкоземельних елементів та інших невідновлюваних ресурсів [16].

Підсумовуючи, незважаючи на значний прогрес, який пропонують моделі ШІ для моніторингу навколишнього середовища, необхідно уважно стежити за їхнім впливом на екологію. Майбутні дослідження та політичні рішення мають бути спрямовані на створення умов, які забезпечать стале використання ШІ, максимізуючи його переваги та мінімізуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

Перспективи використання результатів дослідження. У порівнянні зі традиційними методами, використання моделей ШІ для моніторингу навколишнього середовища має низку переваг. Системи моніторингу навколишнього середовища, що базуються на ШІ, здатні обробляти величезні обсяги даних з різних джерел, що дозволяє отримувати точну та актуальну картину стану довкілля. Крім того, їхнє застосування надає можливість автоматизувати збір та аналіз даних, що призводить до зменшення вартості програм моніторингу. На відміну від звичайних підходів, системи моніторингу навколишнього середовища, що використовують ШІ, здатні збирати та аналізувати дані з вищою точністю, що зменшує кількість помилок та неточностей.

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: 14.02.2025).
2. Hameed, M., Sharqi, S.S., Yaseen, Z.M., Afan, H.A., Hussain, A., Elshafie, A. Application of artificial intelligence (AI) techniques in water quality index prediction: a case study in tropical region, Malaysia. *Neural Comput. Appl.* 2017. № 28. С. 893–905. DOI: https://doi.org/10.1007/s00521-016-2404-7.
3. Li, Y., Feng, Z., Chen, S., Zhao, Z., Wang, F. Application of the artificial neural network and support vector machines in forest fire prediction in the Guangxi autonomous region, China. *Discrete Dyn. Nat. Soc.* 2020. № 1. С. 1–14. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/5612650.
4. Zagajewski, B., Kluczek, M., Raczko, E., Njegovec, A., Dabija, A., Kycko, M. Comparison of random forest, support vector machines, and neural networks for post-disaster forest species mapping of the krkonoˇse/karkonosze transboundary biosphere reserve. *Remote Sens.* 2021. № 13(13), 2581. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13132581.
5. 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*. 2020. № 699:134279. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134279.
6. 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), С. 6103–6116. DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-022-04367-6.
7. Zhang, H., Zhang, L., Wang, S., Zhang, L. Online water quality monitoring based on UV–Vis spectrometry and artificial neural networks in a river confluence near Sherfield-on-Loddon. *Environ. Monit. Assess.* 2022. № 194:630. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-022-10118-4.
8. Ghorbani, Z., Behzadan, A.H. Monitoring offshore oil pollution using multi-class convolutional neural networks. *Environ. Poll.* 2021. № 289:117884. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117884.
9. Almalawi, A., Alsolami, F., Khan, A.I., Alkhathlan, 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.
10. Rowley, A., Karakus¸, O. Predicting air quality via multimodal AI and satellite imagery. *Remote Sens. Environ*. 2023. № 293:113609. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113609.
11. Baniecki H., Biecek, P. Adversarial attacks and defenses in explainable artificial intelligence: a survey. *Information Fusion.* 2024 № 107(5):102303. DOI: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102303.
12. 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.
13. Kernbach, J.M., Staartjes, V.E. (2022). Foundations of machine learning-based clinical prediction modeling: part II–Generalization and overfitting. In: Staartjes, V.E., Regli, L., Serra, C.(eds). *Machine Learning in Clinical Neuroscience*: *Acta Neurochirurgica Supplement*. 2022. № 134. С. 15–21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85292-4_3.
14. Ryo, M., Angelov, B., Mammola, S., Kass, J.M., Benito, B.M., Hartig, F. Explainable artificial intelligence enhances the ecological interpretability of blackbox species distribution models. *Ecography*. 2020. № 44 (2). С. 199–205. DOI: https://doi.org/10.1111/ecog.05360.
15. 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.
16. 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. С. 346–371. DOI: https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0892-9.ch017.