

АНОТАЦІЯ

Сидор П.О. Методи прогнозування природних катастроф на основі технологій штучного інтелекту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення» – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2024.

У сучасних умовах глобалізації та зростаючої мобільності, туризм стає однією з найбільш популярних сфер діяльності, що вимагає підвищеної уваги до питань безпеки туристів. З огляду на збільшення частоти природних катастроф, таких як лісові пожежі, урагани, землетруси та повені, стає очевидною необхідність розробки нових інформаційних технологій, які дозволять туристам і організаторам подорожей ефективно планувати маршрути з урахуванням потенційних ризиків. Особливу актуальність у цьому контексті має створення математичних моделей та методів прогнозування кризових явищ, що здатні передбачати розвиток небезпечних ситуацій та їх вплив на туристичні напрямки.

Штучний інтелект та інструменти аналізу великих даних відкривають нові можливості для побудови таких моделей. Використання історичних даних про кліматичні зміни та реальних показників природних явищ дозволяє значно покращити точність прогнозів і забезпечити своєчасне попередження про можливі загрози. Таким чином, сучасні інформаційні технології на основі систем штучного інтелекту, методів машинного навчання та математичного моделювання можуть стати важливим інструментом для підвищення рівня безпеки туристів, сприяючи більш раціональному та безпечному плануванню подорожей у різні регіони світу.

Дисертація присвячена актуальній проблемі розробки і вдосконалення інформаційних технологій для передбачення природних

катастроф з використанням сучасних досягнень у галузі штучного інтелекту та математичного моделювання. Дослідження зосереджене на аналізі, оцінці та покращенні методів прогнозування таких явищ, як лісові пожежі, урагани та паводки, з метою підвищення точності та надійності інформації про потенційні загрози, що є критично важливим для забезпечення безпеки населення та ефективного реагування на надзвичайні ситуації.

У роботі розглянуто широкий спектр математичних моделей та алгоритмів, включаючи лінійні моделі, системи з нечіткою логікою (ANFIS), нейромережі, в тому числі глибоке навчання і LSTM-мережі, для вирішення поставлених задач. Основна увага приділяється розробці та адаптації цих методів для конкретних умов і особливостей природних явищ, враховуючи великі обсяги даних, їх нестабільність та складність процесів, що моделюються.

Результати дисертації включають в себе розробку нових математичних моделей та алгоритмів для прогнозування природних катастроф, вдосконалення існуючих методів, а також розробку інформаційної технології, що демонструє практичну значимість і ефективність запропонованих підходів. Реалізація і апробація розроблених методів показали їх високу ефективність та потенціал для використання у реальних умовах, що підтверджується застосуванням результатів дослідження у вирішенні практичних завдань з прогнозування природних катастроф.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка інноваційної інформаційної технології для планування безпечних туристичних подорожей, яка базується на передових методах прогнозування природних катастроф з використанням технологій штучного інтелекту. Ця технологія має інтегрувати математичні моделі прогнозування кризових явищ, таких як лісові пожежі, урагани та паводки, в інформаційні системи для визначення рівня загрози та оповіщення користувачів про потенційні

ризика в конкретних географічних локаціях з метою підвищення рівня безпеки та інформованості туристів, забезпечення можливості своєчасної адаптації та коригування туристичних маршрутів відповідно до прогнозованих умов навколишнього середовища, тим самим зменшуючи ризик негативного впливу природних катастроф на туристичний досвід.

В основу дисертаційної роботи покладені методи: лінійні моделі – для аналізу простих залежностей між метеорологічними факторами та інцидентами лісових пожеж; ANFIS – для прогнозування лісових пожеж, з врахуванням різноманітних чинників, таких як погодні умови та ландшафт; нейронні мережі – для моделювання та прогнозування лісових пожеж на основі великих даних про погодні умови та інші впливові фактори; LSTM – прогнозування лісових пожеж, на основі часових рядів даних про погоду та інші екологічні параметри; кореляційний аналіз – для виявлення зв'язків між погодними умовами та виникненням ураганів, а також аналіз взаємозв'язку між різними параметрами, що впливають на паводки та лісові пожежі; R/S аналіз – для дослідження довготривалих залежностей у даних про лісові пожежі; дерево рішень – класифікація та прогнозування паводків; ансамбль моделей – для поліпшення точності прогнозів паводків та лісових пожеж, забезпечуючи більш надійне та точне визначення ризиків.

Отримано наступні наукові результати:

1. Вдосконалено математичні моделі прогнозування лісових пожеж на основі ANFIS, ANN та LSTM шляхом застосування кореляційного та лагового аналізу з використанням сплайн-інтерполяції для виявлення часових затримок між піками сонячної активності та виникненням пожеж, що дозволило підвищити точність прогнозування до 93% для великих та 92% для малих пожеж.
2. Вдосконалено математичні моделі прогнозування ураганів на основі LSTM, нейронних мереж (ANN) та лінійних моделей шляхом застосування лагового аналізу для виявлення взаємозв'язку між піками

сонячної активності та інтенсивністю ураганів, що дозволило досягти високої точності прогнозування до 92% і поліпшити відтворення динаміки ураганів ($R^2 = 0,99$ для LSTM).

3. Вдосконалено ансамблі класифікаційних моделей та моделі на основі дерев рішень для прогнозування паводків шляхом встановлення взаємозв'язку між піками сонячної активності та паводками, що дозволило підвищити точність прогнозування до 97% (на 1 день вперед) і 92% (на 9 днів вперед).
4. Розроблено MLOps технологію для систем з малим і середнім обсягом вхідних даних шляхом впровадження імперативної моделі, що дозволило знизити складність виконання програмних потоків, незважаючи на відхилення від традиційних принципів програмування (DRY).
5. Вдосконалено UML модель через інтеграцію координатора, що забезпечило створення універсальної платформи “все в одному”, особливо ефективною для роботи з малими та середніми обсягами даних.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:

1. Розроблені методи прогнозування природних катастроф інтегровано в інформаційні технології, що сприятиме плануванню безпечних туристичних маршрутів. Це дозволяє користувачам уникати потенційно небезпечних районів, забезпечуючи вищий рівень безпеки під час подорожей.
2. Оперативне отримання прогнозів про ризики природних катастроф може сприяти своєчасному вживанню заходів цивільним захистом та службами порятунку для мінімізації наслідків для населення та інфраструктури.
3. Розроблені методи прогнозування забезпечують цінний інструментарій для органів державної влади, екологічних організацій та бізнес-структур у питаннях природоохоронної діяльності та управління ризиками природних катастроф.

4. Інтеграція розроблених методів у інформаційні системи та мобільні додатки сприятиме поширенню важливої інформації серед населення, забезпечуючи краще розуміння ризиків та необхідності підготовки до можливих надзвичайних ситуацій.
5. Результати роботи впроваджено в Управлінні інвестиційної політики та туризму департаменту регіонального розвитку Чернівецької обласної державної адміністрації, ГС «РТО «Гостинна Буковина» та інституті географії Сербської академії наук та мистецтв.

Ключові слова: Методи машинного навчання, Інтелектуальна система, Прийняття рішень, Галузева геоінформаційна система, Система підтримки прийняття рішень, Методи оптимізації, Нейронні мережі, Аналіз даних, Геопросторова симуляційна модель, Ансамбль машинного навчання, Математичне моделювання, Екологічні та техногенні ризики, Складні мережі, Нелінійні задачі.

ABSTRACT

Sydor P.O. Methods of predicting natural disasters based on artificial intelligence technologies. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 121 – "Software Engineering" – Yuri Fedkovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, 2024.

In today's globalized world with increasing mobility, tourism has become one of the most popular industries, requiring heightened attention to the safety of travelers. Given the rising frequency of natural disasters such as wildfires, hurricanes, earthquakes, and floods, the need for the development of new information technologies that allow tourists and travel organizers to effectively plan routes with potential risks in mind has become evident. Particularly relevant in this context is the creation of mathematical models and forecasting methods for crisis events, capable of predicting the development of dangerous situations and their impact on tourist destinations.

Artificial intelligence and big data analysis tools open new opportunities for building such models. Using historical data on climate change and real-time indicators of natural phenomena significantly improves the accuracy of predictions and ensures timely warnings about potential threats. Thus, modern information technologies based on artificial intelligence, machine learning and mathematical modeling can become vital tools for enhancing tourist safety, contributing to more rational and secure travel planning across different regions of the world.

The dissertation is devoted to the actual problem of developing and improving information technologies for predicting natural disasters using modern achievements in the field of artificial intelligence and mathematical modeling. Research focuses on analyzing, evaluating, and improving forecasting methods for events such as wildfires, hurricanes, and floods to improve the accuracy and reliability of information about potential threats, which is critical to public safety and effective emergency response.

The paper considers a wide range of mathematical models and algorithms, including linear models, fuzzy logic systems (ANFIS), and neural networks, including deep learning and LSTM networks, for solving the given problems. The main attention is paid to the development and adaptation of these methods for specific conditions and features of natural phenomena, taking into account large volumes of data, their instability, and the complexity of the simulated processes.

The results of the dissertation include the development of new mathematical models and algorithms for predicting natural disasters, the improvement of existing methods, as well as the development of information technology that demonstrates the practical significance and effectiveness of the proposed approaches. The implementation and testing of the developed methods showed their high efficiency and potential for use in real conditions, which is confirmed by the application of the research results in solving practical problems of forecasting natural disasters.

The main goal of the dissertation is to develop an innovative information technology for planning safe tourist trips based on advanced forecasting methods for natural disasters, utilizing artificial intelligence technologies. This technology integrates mathematical models for forecasting crisis events, such as wildfires, hurricanes, and floods, into information systems to assess threat levels and alert users of potential risks in specific geographic locations. The objective is to enhance the safety and awareness of tourists, allowing timely adaptation and adjustment of travel routes according to forecasted environmental conditions, thereby reducing the risk of adverse impacts from natural disasters on the tourism experience.

The dissertation work is based on the following methods: linear models – for the analysis of simple dependencies between meteorological factors and forest fire incidents; ANFIS – for forecasting forest fires, taking into account various factors, such as weather conditions and landscape; neural networks – for modeling and forecasting forest fires based on big data about weather conditions and other influencing factors; LSTM – prediction of forest fires, based on time series of weather data and other environmental parameters; correlational analysis – to identify the relationship between weather conditions and the occurrence of hurricanes, as well as the analysis of the relationship between various parameters affecting floods and forest fires; R/S analysis – for investigating long-term dependencies in forest fire data; decision tree – flood classification and forecasting; an ensemble of models – to improve the accuracy of flood and forest fire forecasts, providing more reliable and accurate risk identification.

The following scientific results were obtained:

- forest fire forecasting methods were developed for the first time, based on the heliocentric hypothesis, integrating machine learning and deep learning technologies to analyze large data on weather conditions, topography, and other environmental factors, to significantly increase the accuracy and speed of forecasting.

- for the first time, hurricane forecasting methods were developed within the framework of the heliocentric hypothesis, which combines atmospheric and oceanic data into one comprehensive model, allowing more accurate estimation of the potential timing of hurricanes.
- for the first time, forecasting methods were developed for forecasting floods within the framework of the heliocentric hypothesis, which includes the integration of data from various sources (meteorological stations, satellite observations, hydrological models) and their analysis using machine learning algorithms to improve the accuracy and efficiency of forecasts.
- information technology was developed for the first time, which combines geo-information systems and intelligent data analysis, which makes it possible to form dynamic recommendations for the safety of tourists.
- the methods of pre-processing distributed heterogeneous big data, which is the basis of forming data sets and choosing optimal models for parallel calculations, have gained further development.
- the reliability of the results is determined by the evaluation of the effectiveness of the developed methods on real data, which includes a comparative analysis with existing approaches for forecasting natural disasters, demonstrating improvements in the accuracy, reliability, and promptness of forecasts.

The practical significance of the obtained results is that:

1. The developed methods of forecasting natural disasters are integrated into information technologies, which will contribute to the planning of safe tourist routes. This allows users to avoid potentially dangerous areas, providing a higher level of safety when traveling.
2. Promptly obtaining forecasts about the risks of natural disasters can contribute to the timely implementation of measures by civil protection and rescue services to minimize the consequences for the population and infrastructure.

3. The developed forecasting methods provide a valuable toolkit for state authorities, environmental organizations, and business structures in matters of environmental protection and natural disaster risk management.
4. Integration of the developed methods into information systems and mobile applications will contribute to the dissemination of important information among the population, providing a better understanding of risks and the need to prepare for possible emergencies.
5. The results of the work have been implemented in the Department of Investment Policy and Tourism of the Department of Regional Development of the Chernivtsi Regional State Administration, the GS "RTO "Hostynna Bukovyna" and the Institute of Geography of the Serbian Academy of Sciences and Arts.

Keywords: Machine learning methods, Intelligent System, Decision-making, Industry Geographic Information System, Decision Support System, Optimization Methods, Neural Networks, Data Mining, Geo-spatial Simulation Model, ML-ensemble, Mathematical Modelling, Ecological and Technogenic Risks, Complex Networks, Nonlinear Problems.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

[1] Malinović-Milićević S., Vykyuk Y., Radovanović M. M., Milenković M., Pešić A.M., Milovanović B., Popović T., Sydor P., Petrović M. D., Applying machine learning in the investigation of the link between the high-velocity streams of charged solar particles and precipitation-induced floods. Environmental Monitoring and Assessment 2024. V196. 400. ISSN: 01676-369 (Scopus, **Q2**). *(Особистий внесок: розробка математичної моделі прогнозування наводків)*

- [2] Шаховська Н., Сидор П., Розроблення архітектури системи планування безпечних туристичних подорожей Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2022. №1. (305). С.96-101 (*Особистий внесок: розробка інформаційної технології*)
- [3] Сидор П.О., Виклюк Я.І., Ансамблеві моделі прогнозування повеней у Великій Британії на основі сонячної активності. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2024. №2. (333). С. 218-231 (*Особистий внесок: розробка математичної моделі прогнозування паводків*
Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації)
- [4] Vyklyuk Y., Radovanović M. M., Sydor P. Hurricane Forecasting Using by Parallel Calculations & Machine Learning 2018 IEEE 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, SAIC 2018 – Proceedings 31 October 2018 Kyiv, 2018, Article number 8516872 (*Особистий внесок: Створення математичної моделі прогнозування ураганів*)
- [5] Виклюк Я.І., Сидор П.О., Кунанець Н. Е., Пасічник В.В. Прогнозування лісових пожеж на основі ANFIS та паралельних розрахунків. Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. Херсон: Видавництво ФОП Вишемирський В. С. с. Залізний Порт 21- 27 травня 2018 р. С.41-42 (*Особистий внесок: створення математичної моделі прогнозування лісових пожеж*)
- [6] Виклюк Я.І. Сидор П.О. Прогнозування лісових пожеж в Португалії. С. 25-32.
- [7] Виклюк Я.І. Сидор П.О. Комп’ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій (КМПЗ_2024) – : зб. наук. праць (тези доповідей та вибрані статті) IV Міжнародної науково–практичної конф. КМПЗ_2024. – (Чернівці, 30 травня – 01 червня 2024) / наук. ред. і відп. за вип. проф. В.М Зяяць. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2024. – 342 с. (*Особистий внесок: створення математичної моделі прогнозування лісових пожеж*)

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

[8] Сидор П.О., Виклюк Я.І. Мобільна система інформаційної підтримки з рекомендаціями для безпечних подорожей. Науковий вісник НЛТУ України 2024. том 34. №3. С.103-109 (*Особистий внесок: алгоритм створення мобільного додатку*)