

Модел ь інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у сфері цивільного захисту при ліквідації пожеж

Model of an Intelligent Decision Support System for Civil Protection Management in Fire Suppression Operations

Ганна Пронюк

Corresponding author: кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: ganna.proniuk@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7648-0360>

Тетяна Стиценко

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: tatiana.stytsenko@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4530-0253>

Ігор Невлюдов

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: igor.nevliudov@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Олександр Мамонтов

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: aleksandr.mamontov@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-8644>

Інна Хондак

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: inna.hondak@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6644-9968>

Hanna Proniuk

Corresponding author: PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: ganna.proniuk@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7648-0360>

Tetiana Stytsenko

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: tatiana.stytsenko@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4530-0253>

Ihor Nevliudov

Dr of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: igor.nevliudov@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Oleksandr Mamontov

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: aleksandr.mamontov@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-8644>

Inna Khondak

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: inna.hondak@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6644-9968>

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Received: July 21, 2026 | Revised: August 20, 2026 | Accepted: August 31, 2026

УДК 614.842:519.816

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.28>

Мета дослідження. Розробити концептуальну модель інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у сфері цивільного захисту для вибору варіанта реагування під час ліквідації пожеж шляхом інтеграції методів оцінювання ризику, машинного навчання та багатокритеріального аналізу.

Методи дослідження. Використано системний аналіз, математичне моделювання, методи теорії прийняття рішень, оцінювання ризику, машинного навчання, аналізу ієрархій, нормалізації даних та адитивного багатокритеріального оцінювання альтернатив.

Результати дослідження. Розроблено модульну архітектуру СППР, що інтегрує збір і обробку даних, прогнозування небезпечного сценарію, оцінювання ризику, генерацію допустимих альтернатив, їх ранжування та формування рекомендацій. Запропоновано модель ризику ($R = PS$). Розрахунковий приклад підтвердив можливість ранжування альтернатив; аналіз чутливості $\pm 20\%$ не змінив отриманого порядку ранжування.

Теоретична цінність дослідження. Формалізовано єдиний цикл переходу від прогнозування пожежі до багатокритеріального вибору варіанта реагування.

Практична цінність дослідження. Модель може бути основою спеціалізованої СППР та інтегруватися з ГІС, БПЛА й автоматизованими системами моніторингу.

Purpose. To develop a conceptual model of an intelligent decision support system for civil protection to select response options during fire suppression by integrating risk assessment, machine learning, and multi-criteria decision-making methods.

Method. The study employed systems analysis, mathematical modeling, decision theory, risk assessment, machine learning, the Analytic Hierarchy Process (AHP), data normalization, and additive multi-criteria evaluation of alternatives.

Findings. A modular DSS architecture was developed that integrates data collection and preprocessing, hazardous-scenario prediction, risk assessment, generation of feasible alternatives, their ranking, and recommendation generation. A risk model ($R = PS$) was proposed. A numerical example demonstrated the feasibility of ranking response alternatives, while a $\pm 20\%$ sensitivity analysis did not alter the resulting ranking order.

Theoretical implications. An integrated decision-making cycle from fire development prediction to the multi-criteria selection of a response option was formalized.

Practical implications. The model can serve as a methodological basis for a specialized DSS and can be integrated with GIS, UAVs, and automated monitoring systems.

Оригінальність / цінність дослідження. Запропоновано інтеграцію машинного прогнозування, оцінювання наслідків і багатокритеріального ранжування альтернатив в єдиній архітектурі.

Обмеження / напрями подальших досліджень. Модель має концептуальний характер і потребує валідації на реальних даних, оцінювання впливу неповноти даних і data drift, уточнення ваг критеріїв та розроблення програмного прототипу.

Тип дослідження. Концептуально-методологічне дослідження з математичним моделюванням.

Originality / value. The study integrates machine-learning-based prediction, consequence assessment, and multi-criteria ranking of response alternatives within a unified architecture.

Limitations / future research. The model is conceptual and requires validation using real-world data, assessment of the effects of incomplete data and data drift, refinement of criterion weights, and development of a software prototype.

Paper type. Conceptual and methodological study employing mathematical modeling.

Ключові слова цивільний захист; ліквідація пожеж; оцінювання ризику; система підтримки прийняття рішень; машинне навчання; багатокритеріальний аналіз; інтелектуальні інформаційні системи.

Key words. Civil Protection; Fire Suppression; Risk Assessment; Decision Support System; Machine Learning; Multi-Criteria Decision Making; Intelligent Information Systems.

Вступ

В умовах сучасних викликів, пов'язаних зі зростанням кількості надзвичайних ситуацій природного, техногенного та воєнного характеру, особливого значення набуває підвищення ефективності управління силами і засобами цивільного захисту. Пожежі, що виникають унаслідок бойових дій, аварій на об'єктах критичної інфраструктури, у лісових і торф'яних масивах, є одним із найпоширеніших видів надзвичайних ситуацій, ліквідація яких покладається на органи та підрозділи Єдиної державної системи цивільного захисту. Такі пожежі характеризуються швидкою зміною оперативної обстановки, високою невизначеністю та значною кількістю факторів, які необхідно враховувати під час прийняття управлінських рішень. За таких умов своєчасність і обґрунтованість рішень безпосередньо впливають не лише на ефективність ліквідації пожежі, а й на безпеку особового складу, населення та збереження матеріальних цінностей, а отже, й на загальний рівень готовності системи цивільного захисту до реагування на надзвичайні ситуації.

Відповідно до Кодексу цивільного захисту України та Статуту дій органів управління і підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж [12], відповідальність за організацію ліквідації пожежі, визначення тактики гасіння, розподіл сил і засобів та забезпечення безпеки особового складу покладається на керівника гасіння пожежі — посадову особу органу управління цивільного захисту. У процесі управління він повинен оперативно аналізувати інформацію про параметри пожежі, погодні умови, особливості об'єкта, наявні сили й засоби, можливі шляхи поширення вогню, ризику для рятувальників та населення. Рішення приймаються в умовах дефіциту часу, неповноти інформації та постійної зміни оперативної обстановки, що суттєво підвищує ймовірність помилок і зумовлює необхідність використання сучасних інформаційних технологій підтримки управління.

Особливої актуальності зазначена проблема набуває з урахуванням специфіки України, де внаслідок воєнних дій суттєво зросла кількість пожеж на об'єктах критичної інфраструктури, промислових підприємствах, складах паливно-мастильних матеріалів, у житлових будівлях та природних екосистемах. Такі пожежі характеризуються масштабністю, високою інтенсивністю розвитку та потребою в одночасному виконанні великої кількості взаємопов'язаних оперативних завдань, тому інформаційна підтримка керівника гасіння пожежі стає одним із ключових чинників ефективного реагування.

Проведений аналіз засвідчує, що актуальним науковим завданням є розроблення моделей інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, яка поєднує оцінювання ризику розвитку пожежі на основі методів штучного інтелекту з багатокритеріальним вибором оптимального варіанта реагування.

Метою дослідження є розроблення концептуальної моделі інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у сфері цивільного захисту для вибору варіанта реагування під

час ліквідації пожеж на основі інтеграції методів оцінювання ризику, машинного навчання та багатокритеріального аналізу.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні концептуальної моделі інтелектуальної СППР для ліквідації пожеж, у якій прогнозована методами машинного навчання ймовірність небезпечного сценарію інтегрується з моделлю оцінювання наслідків і багатокритеріальним ранжуванням альтернатив реагування.

Огляд літератури

Останніми роками активно розвиваються інформаційні та інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень у сфері реагування на надзвичайні ситуації, що забезпечують збір, оброблення та аналіз оперативної інформації для підтримки управлінських рішень [14]. Одним напрямом їх розвитку є застосування методів машинного навчання, геоінформаційних технологій, дистанційного моніторингу та інших інтелектуальних засобів для прогнозування виникнення й розвитку пожеж [1; 8].

Одними з найбільш відомих програмних комплексів для моделювання розвитку природних пожеж є FARSITE (Fire Area Simulator) та FlamMap, розроблені Лісовою службою США під керівництвом М. Finney [5; 6]. Ці системи базуються на фізико-математичних моделях поширення фронту пожежі і враховують характеристики рослинності, рельєф місцевості, швидкість і напрямок вітру, вологість пального матеріалу та інші фактори. FARSITE здійснює динамічне моделювання поширення пожежі в часі, тоді як FlamMap призначена переважно для просторового аналізу потенційної пожежної небезпеки без моделювання часової еволюції процесу [11]. Ці комплекси широко використовуються під час планування протипожежних заходів, оцінювання ефективності протипожежних бар'єрів і прогнозування можливих сценаріїв розвитку лісових пожеж.

Новим етапом розвитку СППР стали інтегровані цифрові платформи, зокрема WIFIRE, розроблена Каліфорнійським університетом, яка об'єднує геоінформаційні технології, супутникові спостереження, безпілотні літальні апарати, сенсорні мережі, метеорологічні моделі та високопродуктивні обчислення. Одним із компонентів платформи є Firemap, який забезпечує інтерактивне моделювання розвитку пожежі, аналіз просторових даних та візуалізацію результатів у режимі, наближеному до реального часу [4]. Використання технологій Big Data дозволяє враховувати значні масиви інформації та підвищувати точність прогнозування розвитку пожеж.

Окремим напрямом сучасних досліджень є застосування методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж для прогнозування виникнення, розвитку та наслідків пожеж [1; 8], які дозволяють оцінювати ймовірність виникнення та розвитку пожеж на основі історичних даних, метеорологічної інформації, характеристик рослинності, супутникових знімків і показників сенсорних систем. Алгоритми Random Forest, Support Vector Machine, Gradient Boosting, Artificial Neural Networks, Convolutional Neural Networks та Long Short-Term Memory успішно застосовуються для аналізу супутникових знімків, оцінювання пожежної небезпеки територій, прогнозування швидкості поширення вогню, виявлення осередків загоряння та оцінювання ризиків. На відміну від традиційних фізичних моделей, методи машинного навчання здатні враховувати складні нелінійні залежності між параметрами пожежі та адаптуватися до нових даних під час експлуатації.

Проведений аналіз [3; 12] свідчить, що переважна більшість робіт присвячена окремим аспектам інформаційної підтримки ліквідації пожеж: прогнозуванню розвитку пожежі, оцінюванню її параметрів, оптимізації маршрутів руху пожежно-рятувальної техніки або автоматизованому аналізу зображень із безпілотних літальних апаратів і супутників. При цьому питання інтеграції моделей прогнозування, оцінювання ризику та багатокритеріального вибору оптимального варіанта реагування в межах єдиної інтелектуальної системи підтримки

прийняття рішень залишаються недостатньо дослідженими, тоді як саме така інтеграція є необхідною, оскільки прогноз розвитку пожежі сам по собі не забезпечує прийняття оптимального управлінського рішення щодо розподілу сил і засобів, вибору тактики гасіння та мінімізації ризиків для особового складу.

У вітчизняних дослідженнях висвітлено окремі складові інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема побудову систем підтримки антикризових рішень за умов неповноти вхідної інформації [18], моніторинг і попередження лісових пожеж [16], систематизацію управління пожежною безпекою об'єкта захисту [19] та інформаційно-аналітичне забезпечення публічного управління [15].

Водночас комплексна інтеграція прогнозування розвитку пожежі, оцінювання ризику та багатокритеріального вибору варіанта реагування в межах єдиної системи залишається недостатньо дослідженою. Наявні дослідження переважно охоплюють окремі елементи інформаційної підтримки, тоді як завдання формування єдиного циклу “прогнозування — оцінювання ризику — формування альтернатив — багатокритеріальний вибір варіанта реагування” потребує подальшого наукового опрацювання.

Методологія дослідження

У процесі ліквідації пожеж керівник гасіння пожежі приймає рішення в умовах дефіциту часу, невизначеності та значної кількості взаємопов'язаних факторів. До таких факторів належать параметри пожежі, метеорологічні умови, особливості місцевості або об'єкта, наявність людей у зоні небезпеки, кількість і технічний стан сил та засобів, можливі ризики для особового складу, а також ресурсні обмеження.

Нехай поточний стан оперативної обстановки описується вектором ознак $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, де x_i – характеристики оперативної обстановки: температура осередку пожежі, площа пожежі, швидкість і напрямок вітру, вологість повітря, рівень задимлення, кількість людей у небезпечній зоні, тип об'єкта, наявність вибухонебезпечних речовин, наявні сили й засоби тощо.

На основі вектора X система визначає ймовірність розвитку небезпечного сценарію, після чого обчислює інтегральний показник ризику:

$$R = P \cdot S, \quad (1)$$

де P – ймовірність розвитку небезпечного сценарію;
 S – оцінка тяжкості можливих наслідків.

Формула (1) відповідає загальним принципам управління ризиками, визначеним міжнародним стандартом ISO 31000, згідно з яким ризик характеризується поєднанням ймовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її наслідків.

На відміну від традиційних експертних методів, у запропонованій моделі значення P визначається на основі алгоритмів машинного навчання. Якщо вихідний шар моделі формує оцінку як логістичну функцію від зваженої суми нормалізованих ознак x_i , отримуємо:

$$P = \sigma(b + \sum_{i=1}^n w_i x_i), \quad (2)$$

де $\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$ – сигмоїдна функція активації;
 b – зміщення (вільний член моделі);
 w_i – зміщення (вільний член моделі);
 $x_i \in [0; 1]$ – нормалізовані значення відповідної ознаки (параметру оперативної обстановки). Нормалізація виконується методом *min-max*:

$$x_i = \frac{x_i^{fact} - x_i^{min}}{x_i^{max} - x_i^{min}} \quad (3)$$

де x_i^{fact} – поточне значення;
 x_i^{min} і x_i^{max} – відповідно мінімальне і максимальне значення відповідної ознаки у навчальній вибірці.

Нормалізація дозволяє привести всі ознаки до єдиного діапазону зміни та виключити вплив різних одиниць вимірювання (табл. 1).

Таблиця 1: Приклад нормалізації ознак

Параметр	Діапазон вимірювання	Фактичне значення	Нормалізоване значення
Температура	20–800 °C	680 °C	0,85
Площа	0–500 м ²	350 м ²	0,70
Вітер	0–20 м/с	11 м/с	0,55
Задимлення	0–100 %	90%	0,90
Люди	0–50	20	0,40

Джерело: складено авторами.

Тяжкість можливих наслідків S визначається як агрегований показник, що враховує основні складові потенційних наслідків пожежі. Для цього використовується адитивна модель:

$$S = \sum_{k=1}^m v_k s_k \quad (4)$$

де s_k – нормалізоване значення k -ї складової тяжкості наслідків;
 v_k – ваговий коефіцієнт відповідної складової, при цьому $v_k \geq 0$ та $\sum_{k=1}^m v_k = 1$.

До основних наслідків доцільно віднести прогнозовані людські втрати, ризик для особового складу, матеріальні збитки, вплив на критичну інфраструктуру та екологічні наслідки тощо. Нормалізація складових забезпечує приведення їх до єдиної шкали у інтервалі $[0;1]$.

Вагові коефіцієнти v_k можна визначити експертним методом із застосуванням методу аналізу ієрархій (АНР). Приклад наведено у табл. 2. У такому випадку експертна група формується з фахівців, які мають досвід управління силами та засобами цивільного захисту під час ліквідації пожеж. Попарне порівняння складових наслідків дає змогу отримати їх відносні пріоритети та перевірити узгодженість експертних суджень, що оцінюється за коефіцієнтом узгодженості CR . Значення $CR < 0,1$ свідчить про прийнятний рівень узгодженості суджень і дає підстави використовувати отримані вагові коефіцієнти в подальших розрахунках.

Таблиця 2: Приклад визначення вагових коефіцієнтів

Позначення	Складові наслідків	Ваговий коефіцієнт
s_1	Людські втрати	0,40
s_2	Матеріальні збитки	0,20
s_3	Ризик для особового складу	0,25
s_4	Екологічні наслідки	0,15
Разом		1

Джерело: складено авторами.

Тоді, наприклад, при $s_1=0,60$, $s_2=0,50$, $s_3=0,70$, $s_4=0,40$:

$$S = 0,40 \cdot 0,60 + 0,20 \cdot 0,50 + 0,25 \cdot 0,70 + 0,15 \cdot 0,40 = 0,575.$$

Якщо прогнозована моделлю ймовірність небезпечного сценарію $P = 0,65$, тоді $R = P \cdot S = 0,65 \cdot 0,575 = 0,374$.

Після оцінювання інтегрального рівня ризику система формує множину можливих варіантів реагування на пожежу. Кожна альтернатива характеризується різними показниками ефективності, використання ресурсів, часу реагування та безпеки особового складу, тому вибір найкращого варіанта є задачею багатокритеріального прийняття рішень. Сучасна теорія багатокритеріального аналізу містить значну кількість методів підтримки прийняття рішень, найбільш поширеними серед них є метод аналізу ієрархій (АНП), метод TOPSIS, метод ELECTRE та метод PROMETHEE.

Метод АНП (Analytic Hierarchy Process), запропонований Т. Сааті, ґрунтується на ієрархічному поданні задачі та попарному порівнянні критеріїв і альтернатив, що дозволяє формалізувати експертні оцінки й визначати вагові коефіцієнти критеріїв. Разом із тим, кількість попарних порівнянь швидко зростає зі збільшенням числа критеріїв і альтернатив, що ускладнює використання методу в умовах оперативного реагування.

Метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) передбачає вибір альтернативи, яка є найближчою до ідеального рішення та найвіддаленішою від найгіршого [7]. Метод забезпечує високу об'єктивність ранжування, однак потребує виконання додаткових процедур нормалізації та обчислення евклідових відстаней, що підвищує обчислювальну складність.

Методи ELECTRE (Élimination et choix traduisant la réalité) ґрунтуються на побудові відношень переваги між альтернативами та широко використовуються для складних управлінських задач із суперечливими критеріями. Недоліком методу є складність визначення порогів переваги та інтерпретації отриманих результатів.

Метод PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) реалізує ранжування альтернатив за допомогою функцій переваги та забезпечує високу якість прийняття рішень за значної кількості критеріїв [2], однак його практичне застосування потребує визначення параметрів функцій переваги та значного обсягу обчислень.

Порівняльний аналіз зазначених методів показує, що для задач підтримки прийняття рішень під час ліквідації пожеж основними вимогами є висока швидкодія, простота інтерпретації результатів, можливість роботи в режимі реального часу та незначні обчислювальні витрати. Саме тому в роботі запропоновано використовувати адитивну модель зваженої суми (Weighted Sum Model), яка забезпечує достатню точність оцінювання альтернатив за значно меншої обчислювальної складності.

За отриманою величиною R система формує рекомендацію керівнику гасіння пожежі. Саме інтегральний показник ризику визначає необхідність залучення додаткових сил і засобів, вибір тактики ліквідації пожежі та подальше формування альтернативних варіантів реагування. Відповідно до вимог ISO 31000 щодо встановлення критеріїв ризику в роботі запропоновано умовну шкалу інтегрального індексу ризику (табл. 3). Межі між рівнями мають уточнюватися експертним методом або за результатами статистичного аналізу даних про пожежі.

Таблиця 3: Критерії прийняття рішень

Індекс ризику R	Категорія	Рекомендовані дії
0–0,30	Низький	Продовжувати моніторинг, штатне реагування
0,30–0,50	Помірний	Підвищена увага, готовність до посилення
0,50–0,70	Високий	Посилити угруповання сил і засобів, контроль розвитку
0,70–1,00	Критичний	Негайні дії (евакуація, захист особового складу тощо)

Джерело: розроблено авторами на основі концептуальних положень дослідження.

Множина можливих варіантів реагування представлена у вигляді $A=\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, де $A_1 \dots A_m$ — альтернативні сценарії реагування; m — кількість сформованих альтернатив.

Формування множини альтернатив $A=\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, здійснюється на основі поточного стану оперативної обстановки, результатів прогнозування розвитку пожежі, доступних сил і засобів та обмежень, визначених нормативними документами і базою знань СППР.

Процес генерації альтернатив передбачає послідовне виконання таких етапів:

1. визначення типу та поточного рівня розвитку пожежі;
2. визначення необхідних оперативних дій відповідно до прогнозованого сценарію;
3. формування початкової множини можливих комбінацій сил і засобів, тактичних способів локалізації та маршрутів їх висування;
4. перевірка відповідності кожної комбінації нормативним вимогам;
5. перевірка наявності необхідних сил і засобів у поточний момент часу;
6. перевірка часових, ресурсних та територіальних обмежень;
7. виключення фізично нездійсненних або нормативно недопустимих сценаріїв;
8. формування кінцевої множини допустимих альтернатив, яка передається до модуля багатокритеріального оцінювання.

Тобто:

$$A^*=\{A_j \in A \mid g_r(A_j) \leq 0, r = 1, \dots, p\},$$

де A^* – множина допустимих альтернатив;

$g_r(A_j)$ – обмеження для j -ї альтернативи.

Кожна альтернатива оцінюється за множиною критеріїв: часом реагування, потребою в силах і засобах, ризиком для особового складу, ефективністю локалізації пожежі, можливими матеріальними втратами тощо. Оскільки критерії мають різні одиниці вимірювання, перед інтегральним оцінюванням їх нормалізують. Можна використовувати для цього класичну лінійну мін-макс нормалізацію (3), причому для критеріїв-“витрат” (час, кількість ресурсів, ризик тощо) використовується нормалізація виду

$$x_{ij} = \frac{x_i^{\max} - x_{ij}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} \quad (5)$$

де x_{ij} – поточне значення;

$x_i^{\min}$ і $x_i^{\max}$ – відповідно мінімальне і максимальне значення критерію.

А для критеріїв-“вигід” (наприклад, ефективність покриття):

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^{\min}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} \quad (6)$$

Якщо всі альтернативи мають однакове значення критерію, нормалізоване значення приймається рівним 0,5.

Після нормалізації визначається інтегральна оцінка кожної альтернативи (наприклад, різних маршрутів розгортання сил і засобів) за адитивною моделлю зваженої суми:

$$A_j = \sum_{i=1}^n w_i x_{ij} \quad (7)$$

де A_j – інтегральна оцінка j -го варіанта реагування;

n – кількість критеріїв оцінювання;

w_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію;

x_{ij} – нормалізоване значення i -го критерію для j -ї альтернативи [0; 1].

Вагові коефіцієнти w_i також можуть визначатися методом аналізу ієрархій (АНР), методом парних порівнянь або на основі статистичних даних, при цьому виконується умова $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

Після обчислення інтегральних оцінок усі альтернативи ранжуються у порядку спадання величини A_j . Оптимальним визнається варіант з максимальним значенням інтегральної оцінки:

$$A^* = \arg \max_j A_j.$$

Для демонстрації працездатності запропонованої моделі розглянемо умовну оперативну ситуацію, для якої сформовано чотири альтернативні варіанти реагування A_1 – A_4 . Оцінювання здійснюється за п'ятьма критеріями: час реагування C_1 , потреба в силах і засобах C_2 , ризик для особового складу C_3 , ефективність локалізації пожежі C_4 та очікувані матеріальні втрати C_5 . Вихідні дані наведено у табл. 4.

Таблиця 4: Вихідні данні для обчислення інтегральної оцінки альтернатив

Альтернатива	Час реагування, хв.	Засоби пожежегасіння, од.	Ризик для особового складу	Ефективність локалізації пожежі, %	Збитки, тис. грн
A_1	12	10	0,30	0,80	120
A_2	15	8	0,20	0,90	100
A_3	10	14	0,45	0,75	140
A_4	18	6	0,15	0,85	90

Джерело: розраховано авторами.

Після нормалізації методом min–max за формулами (5)–(6) визначається інтегральна оцінка кожної альтернативи (табл. 5). Використаємо $w_1=0,1765$, $w_2=0,1233$, $w_3=0,2526$, $w_4=0,3614$, $w_5=0,0862$, при цьому $\sum_{i=1}^5 w_i=1$. Ваги критеріїв визначалися, як і раніше, методом аналізу ієрархій. Для матриці попарних порівнянь у цьому прикладі коефіцієнт узгодженості становить приблизно $CR = 0,025 < 0,1$, що свідчить про прийнятну узгодженість експертних суджень.

Таблиця 5: Ранжування альтернатив

Альтернатива	Інтегральна оцінка A_j	Ранг
A_1	0,4754	3
A_2	0,7996	1
A_3	0,176	4
A_4	0,7031	2

Джерело: розраховано авторами.

Отже, за заданих значень критеріїв і ваг найкращою є альтернатива A_2 .

Оскільки інтегральна оцінка альтернативи залежить від вагових коефіцієнтів критеріїв, додатково проведено аналіз чутливості результатів. Для цього кожну вагу почергово змінювали на $\pm 20\%$, після чого ваги повторно нормували до одиниці. Отримані результати показали, що в межах дослідженого діапазону зміна ваг не призводить до зміни порядку ранжування альтернатив: $A_2 > A_4 > A_1 > A_3$. Проведений аналіз чутливості підтверджує стійкість отриманого ранжування альтернатив до помірної зміни вагових коефіцієнтів у межах розглянутого сценарію, однак не дає підстав робити висновок про загальну стійкість запропонованої моделі для інших оперативних ситуацій.

Отриманий результат передається до модуля формування рекомендацій, де система автоматично генерує пропозиції щодо тактики ліквідації пожежі, необхідного складу сил і засобів, маршруту їх висування та заходів із забезпечення безпеки особового складу.

Результати дослідження

Загальну структуру СППР наведено на рис. 1. Архітектура системи побудована за модульним принципом і складається з таких взаємопов'язаних функціональних модулів.

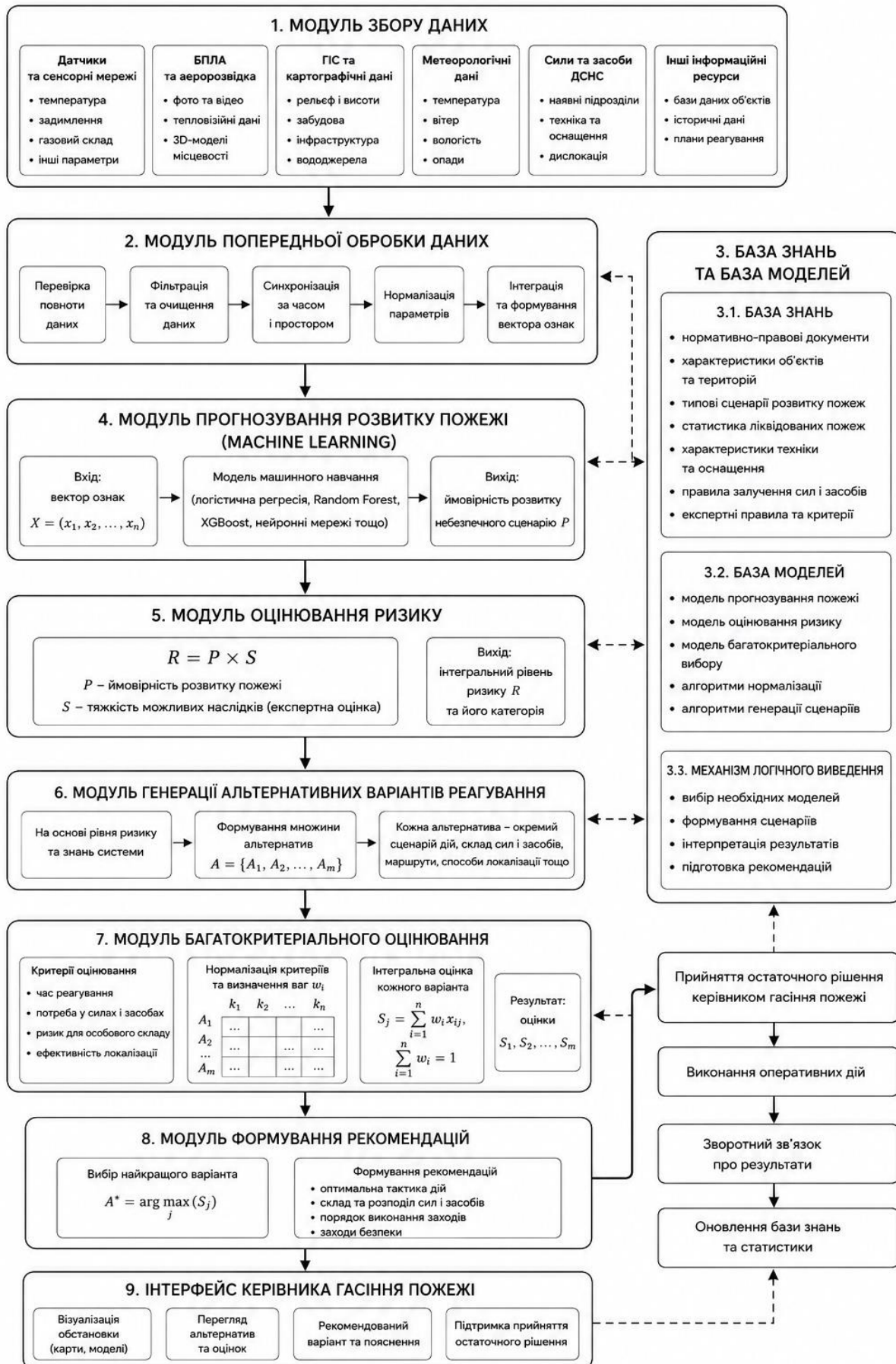


Рисунок 1: Функціональна схема СПДР

Джерело: підготовлено автором.

1. Модуль збору даних забезпечує отримання інформації з різних джерел: автоматичні пожежні датчики, тепловізійні камери, безпілотні літальні апарати, геоінформаційні системи, супутникові знімки, метеорологічні служби, інформаційні системи ДСНС, бази даних потенційно небезпечних об'єктів тощо. Вхідна інформація характеризує поточний стан оперативної обстановки та використовується для подальшого аналізу. Основними параметрами є температура осередку пожежі, площа горіння, швидкість поширення фронту пожежі, напрямок і швидкість вітру, рівень задимлення, кількість людей у зоні небезпеки, характеристики забудови, наявність сил і засобів, а також інформація про транспортну доступність району проведення аварійно-рятувальних робіт.

2. Модуль попередньої обробки даних. Оскільки інформація надходить із різних джерел і може мати різні формати, одиниці вимірювання та рівень достовірності, перед використанням виконується її попередня обробка, яка включає перевірку повноти даних, усунення пропусків, фільтрацію аномальних значень, синхронізацію інформації за часом, нормалізацію параметрів, інтеграцію даних у єдине інформаційне середовище. Після завершення цього етапу формується єдиний вектор ознак, який надходить до модуля прогнозування.

3. База знань та база моделей забезпечують накопичення, структурування та використання інформації, необхідної для формування обґрунтованих рекомендацій керівнику гасіння пожежі. База знань є сукупністю нормативної, довідкової, експертної та статистичної інформації, що використовується під час аналізу оперативної обстановки. До її складу входять:

нормативно-правові документи у сфері цивільного захисту та пожежної безпеки;

оперативні карти та характеристики потенційно небезпечних об'єктів;

сценарії розвитку пожеж різних типів;

статистичні дані про ліквідовані пожежі;

характеристики пожежно-рятувальної техніки та оснащення;

правила залучення сил і засобів;

експертні правила оцінювання ризику та вибору тактики реагування.

Накопичення таких знань дозволяє використовувати досвід ліквідації попередніх пожеж під час формування рекомендацій у нових оперативних ситуаціях.

База моделей містить математичні моделі, алгоритми та програмні компоненти, необхідні для функціонування СППР. Під час роботи системи база моделей взаємодіє з іншими функціональними модулями, забезпечуючи виконання необхідних математичних розрахунків залежно від поточної оперативної обстановки.

Важливу роль відіграє механізм логічного виведення, який забезпечує взаємодію між базою знань, базою моделей та іншими компонентами СППР. Його основними функціями є вибір необхідних моделей розрахунку, формування сценаріїв реагування, інтерпретація результатів моделювання та підготовка рекомендацій керівнику гасіння пожежі. Завдяки цьому система використовує не лише поточні дані, а й накопичені знання, що дозволяє підвищити обґрунтованість прийнятих рішень та адаптувати рекомендації до конкретної оперативної ситуації.

Запропонована структура бази знань є відкритою, що дозволяє доповнювати її новими правилами, статистичними даними, математичними моделями та алгоритмами без зміни загальної архітектури СППР, забезпечуючи її масштабованість і подальший розвиток відповідно до нових вимог цивільного захисту.

4. Модуль прогнозування розвитку пожежі реалізує алгоритми машинного навчання. На основі нормалізованих вхідних параметрів модель оцінює ймовірність розвитку небезпечного сценарію, прогнозує швидкість поширення фронту пожежі, визначає можливі напрямки її розвитку та формує прогноз оперативної обстановки на заданий часовий інтервал. Для реалізації модуля можуть використовуватися різні алгоритми машинного навчання,

зокрема логістична регресія, дерева рішень, Random Forest, XGBoost, нейронні мережі або ансамблеві методи [9; 10; 13]. Вибір конкретної моделі залежить від доступного набору навчальних даних та вимог до швидкодії системи.

Результатом роботи модуля є оцінка ймовірності розвитку небезпечного сценарію, яка використовується для визначення інтегрального рівня ризику.

5. Модуль оцінювання ризику визначає інтегральний рівень ризику розвитку пожежі з урахуванням як прогнозованої ймовірності небезпечного сценарію, отриманої модулем машинного навчання, так і експертної оцінки можливих наслідків пожежі.

6. Модуль генерації альтернатив. На основі отриманої оцінки ризику система формує кілька можливих варіантів реагування, кожен з яких є окремим сценарієм організації ліквідації пожежі й може відрізнятися складом сил і засобів, маршрутом руху пожежно-рятувальної техніки, порядком уведення сил у бойові дії, способом локалізації пожежі, використанням резервних підрозділів. Кількість альтернатив визначається оперативною обстановкою та інформацією, отриманою із бази знань системи.

7. Модуль багатокритеріального оцінювання. Визначається інтегральна оцінка кожного варіанта реагування з застосуванням адитивної моделі зваженої суми, що забезпечує можливість одночасного врахування критеріїв різної фізичної природи та дозволяє швидко виконувати розрахунки в режимі реального часу.

8. Модуль формування рекомендацій. Після завершення багатокритеріального оцінювання система автоматично визначає альтернативу з найбільшою інтегральною оцінкою та формує рекомендацію керівнику гасіння пожежі щодо тактики ліквідації пожежі, необхідної кількості сил і засобів, порядку їх залучення, послідовності виконання оперативних дій, а також заходів щодо забезпечення безпеки особового складу.

Важливо зазначити, що система виконує виключно консультативні функції. Остаточне рішення відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України приймає керівник гасіння пожежі, який може враховувати додаткові фактори, не формалізовані математично.

Таким чином, запропонована архітектура забезпечує послідовний перехід від збору оперативної інформації до формування рекомендацій щодо варіанта реагування, який є найкращим за прийнятою системою критеріїв. Використання модульного принципу побудови дозволяє адаптувати систему до різних типів пожеж і надзвичайних ситуацій, а також інтегрувати нові моделі прогнозування, оцінювання ризику та прийняття рішень без зміни загальної структури СППР.

Незважаючи на переваги запропонованого підходу, його практична ефективність залежить від якості вхідної інформації та адекватності моделей, що використовуються окремими функціональними модулями. За умов неповних або суперечливих даних, отриманих, наприклад, унаслідок відмови сенсорів, втрати зв'язку або обмеженої видимості, прогноз розвитку пожежі може характеризуватися підвищеною невизначеністю. У такому випадку використання прогнозованої ймовірності як безпосереднього компонента оцінювання ризику може призвести до помилкової класифікації рівня безпеки.

Додатковим ризиком є data drift — зміна статистичних характеристик вхідних даних у часі порівняно з навчальною вибіркою. Для пожеж, що виникають на нетипових об'єктах або за незвичайних метеорологічних та оперативних умов, це може знижувати точність прогнозування машинної моделі. Тому практична реалізація СППР повинна передбачати моніторинг якості прогнозів, періодичну перевірку актуальності навчальної вибірки та перенавчання моделей за необхідності.

Окремим джерелом невизначеності є вибір вагових коефіцієнтів критеріїв багатокритеріального оцінювання. Навіть за незмінних вихідних даних зміна відносної важливості критеріїв може призвести до зміни ранжування альтернатив. Проведений у роботі аналіз чутливості дає змогу оцінити стійкість рекомендації для заданого сценарію, однак не

виключає необхідності повторного визначення ваг у разі зміни оперативних умов або пріоритетів управління.

Обговорення

Отримані результати свідчать про можливість формалізації процесу підтримки прийняття управлінських рішень під час ліквідації пожеж шляхом інтеграції в межах єдиної системи прогнозування розвитку небезпечного сценарію, оцінювання ризику, формування допустимих альтернатив реагування та їх багатокритеріального ранжування. Принциповою особливістю запропонованого підходу є те, що результат прогнозування не розглядається як кінцевий інформаційний продукт, а використовується як складова подальшого циклу підтримки прийняття рішення. Прогнозована методами машинного навчання ймовірність розвитку небезпечного сценарію є вхідним параметром для визначення інтегрального ризику, на основі якого формуються та оцінюються можливі варіанти реагування.

Такий підхід розширює функціональні можливості відомих засобів моделювання та інформаційної підтримки. Зокрема, FARSITE і FlamMap орієнтовані передусім на моделювання та просторове оцінювання розвитку природних пожеж. FARSITE забезпечує динамічне моделювання поширення пожежі в часі, тоді як FlamMap використовується переважно для просторового аналізу потенційної пожежної небезпеки [5; 6; 11]. Платформа WIFIRE розвиває цей підхід шляхом інтеграції геоінформаційних технологій, супутникових спостережень, безпілотних літальних апаратів, сенсорних мереж, метеорологічних моделей і високопродуктивних обчислень [4]. Запропонована в цьому дослідженні модель не протиставляється зазначеним системам, а зміщує акцент із прогнозування та моніторингу пожежі на інформаційно-аналітичну підтримку безпосереднього вибору варіанта реагування.

Результати дослідження також узгоджуються із сучасним напрямом використання методів машинного навчання для підтримки управління пожежами. Як показано в роботах Jain et al. (2020), Bot і Borges (2022), такі методи можуть використовуватися для оцінювання пожежної небезпеки, прогнозування розвитку пожеж та аналізу значних масивів різномірних даних. Водночас у запропонованій моделі машинне навчання виконує конкретну функцію в загальному контурі прийняття рішення — визначення ймовірності розвитку небезпечного сценарію. Це дозволяє поєднати прогностичні можливості машинного навчання з формалізованим оцінюванням наслідків і подальшим багатокритеріальним вибором варіанта реагування.

Важливим результатом є поєднання ймовірності небезпечного сценарію та тяжкості можливих наслідків у межах інтегрального показника ризику. Така формалізація створює зв'язок між прогнозуванням оперативної обстановки та вибором управлінської альтернативи. Водночас значення інтегрального показника ризику необхідно інтерпретувати обережно. Запропоновані в роботі межі категорій ризику мають умовний характер і, як зазначено в дослідженні, потребують уточнення на основі експертного оцінювання або статистичного аналізу реальних даних про пожежі. Тому наведена шкала на цьому етапі є елементом концептуальної моделі, а не емпірично валідованим нормативним інструментом.

Застосування адитивної моделі зваженої суми для багатокритеріального оцінювання альтернатив обумовлено специфікою оперативного управління під час ліквідації пожеж. На відміну від АНР, TOPSIS, ELECTRE та PROMETHEE, використання яких передбачає додаткові процедури попарного порівняння, визначення відстаней, порогів або функцій переваги, адитивна модель характеризується відносною простотою обчислення та інтерпретації. Це є суттєвою перевагою для СППР, яка повинна функціонувати в умовах дефіциту часу. Водночас така перевага не означає універсальної переваги адитивної моделі над іншими методами багатокритеріального аналізу. Доцільність її застосування в реальних оперативних умовах потребує подальшого порівняльного оцінювання з альтернативними методами.

Розрахунковий приклад із чотирма альтернативами та п'ятьма критеріями продемонстрував можливість кількісного ранжування варіантів реагування. За прийнятої системи критеріїв і ваг найвищу інтегральну оцінку отримала альтернатива A2. Проведений аналіз чутливості, у межах якого вагові коефіцієнти почергово змінювалися на $\pm 20\%$ із подальшою нормалізацією, не змінив порядку ранжування $A2 > A4 > A1 > A3$. Це свідчить про стійкість отриманого результату до помірної зміни вагових коефіцієнтів саме для розглянутого сценарію. Водночас цей результат не може бути екстрапольований на інші оперативні ситуації без додаткової перевірки.

Окремою перевагою запропонованої СППР є формалізація процесу генерації допустимих альтернатив. Система передбачає не лише формування потенційних варіантів реагування, а й їх перевірку за нормативними, ресурсними, часовими, територіальними та фізичними обмеженнями з подальшим виключенням недопустимих сценаріїв. У такий спосіб багатокритеріальне оцінювання здійснюється вже для множини альтернатив, які можуть бути реалізовані за конкретної оперативної обстановки. Це підвищує практичну орієнтованість запропонованої моделі порівняно з підходами, у яких прогнозування розвитку пожежі та вибір управлінського рішення розглядаються як відокремлені завдання.

Модульний принцип побудови СППР забезпечує можливість незалежного вдосконалення її функціональних компонентів. Зокрема, алгоритм прогнозування може бути замінений іншою моделлю машинного навчання без принципової зміни модулів оцінювання ризику та багатокритеріального вибору. Аналогічно можуть уточнюватися критерії оцінювання альтернатив, їх вагові коефіцієнти та правила формування допустимих сценаріїв залежно від типу пожежі й особливостей оперативної обстановки. Така архітектура створює передумови для інтеграції СППР із геоінформаційними системами, безпілотними літальними апаратами, автоматизованими системами моніторингу та інформаційними ресурсами ДСНС.

Водночас результати дослідження мають низку обмежень. Насамперед запропонована модель має концептуальний характер і не пройшла експериментальної валідації на масивах реальних даних про пожежі. Точність рекомендацій СППР безпосередньо залежатиме від повноти, достовірності та своєчасності вхідних даних, а також від адекватності моделі машинного навчання конкретному типу пожежі. Відмова сенсорів, втрата зв'язку, обмежена видимість або суперечливість інформації можуть підвищувати невизначеність прогнозу та, відповідно, впливати на оцінювання ризику.

Додатковим обмеженням є можливість зміни статистичних характеристик вхідних даних порівняно з навчальною вибіркою (data drift). Це особливо важливо для пожеж на нетипових об'єктах або за оперативних і метеорологічних умов, недостатньо представлених у навчальних даних. Тому практичне впровадження СППР потребуватиме постійного контролю якості прогнозування, перевірки репрезентативності навчальних вибірок і періодичного перенавчання моделей.

Ще одним джерелом невизначеності є визначення вагових коефіцієнтів критеріїв. Навіть за незмінних вихідних даних зміна пріоритетності безпеки особового складу, часу реагування, ресурсних витрат, ефективності локалізації або очікуваних збитків потенційно може змінити ранжування альтернатив. Тому проведений аналіз чутливості слід розглядати як перевірку стійкості конкретного розрахункового прикладу, а не як доказ загальної робастності моделі.

Таким чином, основним результатом дослідження є не окремий алгоритм прогнозування пожежі або метод багатокритеріального ранжування, а їх інтеграція в єдиний формалізований цикл підтримки прийняття рішення: збір і обробка даних $\rightarrow$ прогнозування небезпечного сценарію $\rightarrow$ оцінювання ризику $\rightarrow$ генерація допустимих альтернатив $\rightarrow$ багатокритеріальне оцінювання $\rightarrow$ формування рекомендації керівнику гасіння пожежі. Саме ця інтеграція визначає відмінність запропонованого підходу від систем, орієнтованих переважно на моніторинг або прогнозування розвитку пожежі. Водночас підтвердження

практичної ефективності запропонованої СППР потребує її подальшої експериментальної апробації на реальних оперативних даних.

Висновки

У результаті дослідження розроблено концептуальну модель інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для вибору варіанта реагування під час ліквідації пожеж, яка інтегрує прогнозування розвитку небезпечного сценарію, оцінювання ризику, генерацію допустимих альтернатив та їх багатокритеріальне ранжування. На відміну від відомих систем, орієнтованих переважно на прогнозування розвитку пожежі або моніторинг окремих параметрів оперативної обстановки, запропонована модель поєднує ці функції в межах єдиного формалізованого циклу прийняття рішення: прогноз імовірності небезпечного сценарію є не самостійним результатом, а вхідним параметром для оцінювання інтегрального ризику $R = P \cdot S$, який визначає множину альтернатив реагування та їх багатокритеріальне ранжування.

Формалізовано оцінювання тяжкості наслідків як агрегованого показника, що обчислюється за адитивною згортою нормалізованих складових наслідків з їхніми ваговими коефіцієнтами. Для визначення вагових коефіцієнтів запропоновано застосування методу аналізу ієрархій з контролем узгодженості експертних суджень за коефіцієнтом CR .

Для багатокритеріального вибору використано адитивну модель зваженої суми. Розрахунковий приклад для чотирьох альтернатив і п'яти критеріїв продемонстрував можливість отримання кількісної оцінки та ранжування варіантів реагування. Проведений аналіз чутливості (варіювання вагових коефіцієнтів у межах $\pm 20\%$) підтвердив стійкість отриманого ранжування до помірної зміни ваг у розглянутому сценарії.

Формалізовано механізм генерації множини допустимих альтернатив у вигляді послідовності етапів — від формування початкової множини варіантів реагування до перевірки їх відповідності нормативним, ресурсним, часовим і фізичним обмеженням та виключення недопустимих сценаріїв.

Практична цінність запропонованого підходу забезпечується модульним принципом побудови архітектури, що дозволяє незалежно оновлювати окремі компоненти системи (наприклад, замінювати модель прогнозування новим алгоритмом машинного навчання без перегляду моделі оцінювання ризику чи багатокритеріального вибору) і адаптувати перелік критеріїв та методик визначення ваг до специфіки різних типів надзвичайних ситуацій. Запропонована СППР узгоджується з наявною структурою управління цивільним захистом і може використовуватися як у стаціонарних, так і в мобільних пунктах управління на місці ліквідації масштабних пожеж та інших надзвичайних ситуацій.

Інтеграція системи з геоінформаційними технологіями, безпілотними літальними апаратами, автоматизованими системами моніторингу та інформаційними ресурсами ДСНС дозволить підвищити оперативність отримання даних і скоротити час, необхідний керівнику гасіння пожежі для прийняття управлінських рішень, що загалом підвищить готовність системи цивільного захисту до реагування на пожежі та пов'язані з ними надзвичайні ситуації.

Водночас модель має концептуальний характер і потребує подальшої експериментальної перевірки на реальних даних про пожежі. Особливу увагу в подальших дослідженнях доцільно приділити оцінюванню точності моделей машинного навчання, впливу неповноти даних та data drift на якість прогнозування, визначенню оптимальних вагових коефіцієнтів критеріїв і перевірці стійкості рекомендацій у різних оперативних сценаріях, а також створенню програмного прототипу СППР для експериментальної апробації запропонованих моделей.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел

1. Bot K., Borges J. G. A systematic review of applications of machine learning techniques for wildfire management decision support. *Inventions*. 2022. Vol. 7, No. 1. Art. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010015>.
2. Brans J. P., Vincke P. A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making. *Management Science*. 1985. Vol. 31, No. 6. P. 647–656. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>.
3. Cardil A., Monedero S., Schag G., de-Miguel S., Tapia M., Stoof C. R., Silva C. A., Mohan M., Cardil A., Ramirez J. Fire behavior modeling for operational decision-making. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2021. Vol. 23. Art. 100291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100291>.
4. Crawl D., Block J., Lin K., Altintas I. Firemap: A dynamic data-driven predictive wildfire modeling and visualization environment. *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 108. P. 2230–2239. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917307585>.
5. Finney M. A. *FARSITE: Fire area simulator – Model development and evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4. USDA Forest Service, 1998. 47 p. DOI: <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4>.
6. Finney M. A. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. *Fuels management – How to measure success: Conference proceedings / comps.* P. L. Andrews, B. W. Butler. Proceedings RMRS-P-41. USDA Forest Service, 2006. P. 213–220.
7. Hwang C. L., Yoon K. *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Vol. 186. Berlin : Springer-Verlag, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
8. Jain P., Coogan S. C. P., Subramanian S. G., Crowley M., Taylor S., Flannigan M. D. A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews*. 2020. Vol. 28, No. 4. P. 478–505. DOI: <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>.
9. Matougui Z., Zouidi M. A temporal perspective on the reliability of wildfire hazard assessment based on machine learning and remote sensing data. *Earth Science Informatics*. 2024. Vol. 18, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01501-5>.
10. Sari F. Assessment of the effects of different variable weights on wildfire susceptibility. *European Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 143. P. 651–670. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01643-z>.
11. Stratton R. D. *Guidance on spatial wildland fire analysis: Models, tools, and techniques*. General Technical Report RMRS-GTR-183. USDA Forest Service, 2006.
12. Suarez D., Gomez C., Medaglia A. L., Akhavan-Tabatabaei R., Grajales S. Integrated decision support for disaster risk management: Aiding preparedness and response decisions in wildfire management. *Information Systems Research*. 2024. Vol. 35, No. 2. P. 609–628. DOI: <https://doi.org/10.1287/isre.2022.0118>.
13. Tahri M., Badr S., Mohammadi Z., Kašpar J., Berčák R., Holuša J., Surový P., Marušák R., Yousfi N. New forest fire assessment model based on artificial neural network and analytic hierarchy process or fuzzy-analytic hierarchy process methodology for fire vulnerability map. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 138. Art. 109399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109399>.
14. Коваленко Р. І., Калиновський А. Я., Кривошей Б. І., Коротенко Г. М. Удосконалення структури інформаційної системи підтримки прийняття рішень. *Проблеми*

- надзвичайних ситуацій. 2020. № 2(32). С. 186–198. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4400194>.
15. Василенко Д. В. Підтримка прийняття рішень на основі інформаційно-аналітичного забезпечення у системі публічного управління. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Актуальні проблеми розвитку українського суспільства*. 2025. № 1. DOI: <https://doi.org/10.20998/2227-6890.2025.1.06>.
16. Головіна Н. В. Розроблення системи підтримки прийняття рішень для моніторингу та попередження лісових пожеж в Україні. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.21>.
17. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17> (дата звернення: 20.07.2026).
18. Рубан І. В., Тютюник В. В., Тютюник О. О. Особливості створення системи підтримки прийняття антикризових рішень в умовах невизначеності вхідної інформації при надзвичайних ситуаціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2021. Т. 40, № 1. С. 75–84. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-75-84>.
19. Сізіков О. В., Нижник В. В., Балло Я. В., Голікова С. М., Савченко О. В. Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 2(8). С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.41-49>.
20. Яковенко В. М., Ульяновська Ю. В., Яковенко Т. В. Моделі надзвичайних ситуацій техногенного характеру для систем підтримки прийняття рішень. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Т. 2, № 4(104). С. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201736>.

References

1. Bot, K., & Borges, J. G. (2022). A systematic review of applications of machine learning techniques for wildfire management decision support. *Inventions*, 7(1), Article 15. <https://doi.org/10.3390/inventions7010015>
2. Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making. *Management Science*, 31(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>
3. Cardil, A., Monedero, S., Schag, G., de-Miguel, S., Tapia, M., Stoof, C. R., Silva, C. A., Mohan, M., Cardil, A., & Ramirez, J. (2021). Fire behavior modeling for operational decision-making. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 23, Article 100291. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100291>
4. Crawl, D., Block, J., Lin, K., & Altintas, I. (2017). Firemap: A dynamic data-driven predictive wildfire modeling and visualization environment. *Procedia Computer Science*, 108, 2230–2239. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917307585>
5. Finney, M. A. (1998). *FARSITE: Fire area simulator—Model development and evaluation* (Research Paper RMRS-RP-4). USDA Forest Service. <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4>
6. Finney, M. A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In P. L. Andrews & B. W. Butler (Comps.), *Fuels management—How to measure success: Conference proceedings* (Proceedings RMRS-P-41, pp. 213–220). USDA Forest Service.
7. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications* (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 186). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
8. Jain, P., Coogan, S. C. P., Subramanian, S. G., Crowley, M., Taylor, S., & Flannigan, M. D. (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews*, 28(4), 478–505. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>
9. Matougui, Z., & Zouidi, M. (2024). A temporal perspective on the reliability of wildfire hazard assessment based on machine learning and remote sensing data. *Earth Science Informatics*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01501-5>

10. Sari, F. (2024). Assessment of the effects of different variable weights on wildfire susceptibility. *European Journal of Forest Research*, 143, 651–670. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01643-z>
11. Stratton, R. D. (2006). *Guidance on spatial wildland fire analysis: Models, tools, and techniques* (General Technical Report RMRS-GTR-183). USDA Forest Service.
12. Suarez, D., Gomez, C., Medaglia, A. L., Akhavan-Tabatabaei, R., & Grajales, S. (2024). Integrated decision support for disaster risk management: Aiding preparedness and response decisions in wildfire management. *Information Systems Research*, 35(2), 609–628. <https://doi.org/10.1287/isre.2022.0118>
13. Tahri, M., Badr, S., Mohammadi, Z., Kašpar, J., Berčák, R., Holuša, J., Surový, P., Marušák, R., & Yousfi, N. (2024). New forest fire assessment model based on artificial neural network and analytic hierarchy process or fuzzy-analytic hierarchy process methodology for fire vulnerability map. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 138, Article 109399. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109399>
14. Kovalenko, R. I., Kalynovskyi, A. Ya., Kryvoshei, B. I., & Korotenko, H. M. (2020). Udoskonalennia struktury informatsiinoi systemy pidtrymky pryiniattia rishen [Improvement of the structure of a decision support information system]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2(32), 186–198. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4400194> [in Ukrainian]
15. Vasylenko, D. V. (2025). Pidtrymka pryiniattia rishen na osnovi informatsiino-analitychnoho zabezpechennia u systemi publichnoho upravlinnia [Decision support based on information and analytical support in the public administration system]. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii: Aktualni Problemy Rozvytku Ukrainskoho Suspilstva*, (1). <https://doi.org/10.20998/2227-6890.2025.1.06> [in Ukrainian]
16. Holovina, N. V. (2024). Rozroblennia systemy pidtrymky pryiniattia rishen dlia monitorynhu ta poperedzhennia lisovykh pozhezh v Ukraini [Development of a decision support system for monitoring and prevention of forest fires in Ukraine]. *Visnyk Khersonskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu*, (2). <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.21> [in Ukrainian]
17. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy [Code of Civil Protection of Ukraine], Law of Ukraine No. 5403-VI (2012, October 2). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17> [in Ukrainian]
18. Ruban, I. V., Tiutiunyk, V. V., & Tiutiunyk, O. O. (2021). Osoblyvosti stvorennia systemy pidtrymky pryiniattia antykrizovykh rishen v umovakh nevyznachenosti vkhidnoi informatsii pry nadzvychainykh sytuatsiiakh [Features of creating a crisis decision support system under input-data uncertainty in emergency situations]. *Suchasni Informatsiini Tekhnologii u Sferi Bezpeky ta Oborony*, 40(1), 75–84. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-75-84> [in Ukrainian]
19. Sizikov, O. V., Nyzhnyk, V. V., Ballo, Ya. V., Holikova, S. M., & Savchenko, O. V. (2020). Systematyzatsiia protsesu upravlinnia pozhezhnoi bezpekoii obiekta zakhystu [Systematization of the fire-safety management process for a protected facility]. *Naukovyi Visnyk: Tsyvilnyi Zakhyst ta Pozhezhna Bezpeka*, 2(8), 41–49. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.41-49> [in Ukrainian]
20. Yakovenko, V. M., Ulianovska, Yu. V., & Yakovenko, T. V. (2020). Modeli nadzvychainykh sytuatsii tekhnohennoho kharakteru dlia system pidtrymky pryiniattia rishen [Models of anthropogenic emergencies for decision support systems]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(4(104)), 30–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201736> [in Ukrainian]

