



А. М. Тригуба¹, Р. Т. Ратушний², А. Р. Ратушний², Л. С. Коваль², А. І. Івануса²

¹Львівський національний університет природокористування, м. Львів, Україна

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8014-5661> – А. М. Тригуба

<https://orcid.org/0000-0003-0448-0331> – Р. Т. Ратушний

<https://orcid.org/0000-0003-0768-6466> – А. Р. Ратушний

<https://orcid.org/0009-0002-7600-7308> – Л. С. Коваль

<https://orcid.org/0000-0001-9141-8039> – А. І. Івануса



trianamik@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ БЕЗПЕКОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ У ПРОГРАМАХ ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Проблема. Обґрунтовано особливості управління конфігурацією проектів створення пожежно-рятувальних формувань та актуальність задачі оптимізації розміщення пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період для відновлення функціонування безпекової інфраструктури. На основі аналізу стану питання в теорії та практиці встановлено, що ефективне розташування пожежно-рятувальних формувань потребує використання геоінформаційних систем для просторового аналізу територій, оцінки ризиків, ресурсних обмежень та інфраструктурної доступності. В умовах обмеженого фінансування, зміни демографічної структури та пошкодження транспортної мережі управління проектами створення пожежно-рятувальних формувань потребує застосування системного підходу, сучасного управлінського інструментарію та інтеграції просторових даних у процес прийняття управлінських рішень щодо розвитку безпекової інфраструктури на рівні адміністративних районів та громад.

Мета. Обґрунтування підходу та розроблення методу оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період із використанням сучасних геоінформаційних систем, що дозволяє підвищити ефективність прийняття управлінських рішень, забезпечити раціональне планування ресурсів, мінімізувати час реагування на надзвичайні ситуації та покращити безпеку об'єктів критичної інфраструктури в умовах обмежених ресурсів та динамічного проектного середовища.

Методи дослідження. Для вивчення особливостей післявоєнного стану територій окремих адміністративних районів використано метод статистичного оцінювання соціально-демографічних та інфраструктурних характеристик, що дало змогу виокремити основні чинники їх впливу на проектне середовище. Використано методи системного підходу, геоінформаційного аналізу, моделювання покриття територій та розв'язання задачі оптимального розміщення пожежно-рятувальних формувань. Використано методи аналізу та синтезу чинників проектного середовища, що дозволили визначити основні змінні, що формують структуру системи розміщення пожежно-рятувальних формувань на заданій території. Запропонований інструментарій базується на сучасних інформаційних технологіях. Зокрема, використано геоінформаційні системи (GIS), просторове моделювання та алгоритми оптимізації для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період.

Основні результати дослідження. Розроблено метод оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів на заданій адміністративній території, який передбачає системне виконання 10 етапів. Цей метод передбачає використання географічних інформаційних систем (ГІС) на основі фреймворку OpenStreetMap (OSM). У основі методу покладено підхід, який дає можливість врахувати топографію місцевості заданої території, наявні пошкодження інфраструктурних об'єктів (доріг, мостів, будівель тощо), що впливає на тривалість переміщення пожежно-рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних подій та їх ефективне територіальне розташування. Використовується прогнозування ризиків виникнення пожеж і надзвичайних ситуацій, що лежить в основі моделювання для визначення можливих варіантів територіального розташування пожежно-рятувальних підрозділів. Оптимізація розташування пожежно-рятувальних підрозділів на заданій адміністративній території здійснюється із використанням методів кластеризації зон ризику, аналізу транспортної мережі для визначення доступності до об'єктів та алгоритмів мінімізації часу прибуття пожежно-рятувальних підрозділів на місця надзвичайної події.

Висновки та конкретні пропозиції автора. Проведене дослідження підтвердило актуальність і потребу реалізації проєктів створення пожежно-рятувальних формувань та актуальність задачі оптимізації розміщення пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період для відновлення функціонування безпекової інфраструктури. На основі досліджень розроблено метод, який базується на сучасних геоінформаційних системах, що забезпечують отримання точних та актуальних даних, що дозволяє обґрунтовувати управлінські рішення щодо оптимального розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період із врахуванням наявних ресурсів, демографічної ситуації, стану транспортної інфраструктури та ризиків, зумовлених динамічним проєктним середовищем. Використання аналітичного інструментарію на основі фреймворку OpenStreetMap дозволяє узгоджувати територіальне розташування пожежно-рятувальних формувань із змінами у проєктному середовищі. Подальші дослідження слід проводити на основі використання запропонованого методу щодо визначення оптимального розташування пожежно-рятувальних формувань у адміністративних районах, які постраждали від воєнних дій. Це дасть можливість обґрунтувати рекомендації для проєктних менеджерів із формування конфігурації проєктів створення пожежно-рятувальних формувань. Запропоновано інтегрувати засоби обчислювального інтелекту у процеси планування та реалізації проєктів створення пожежно-рятувальних формувань для підвищення адаптивності до динамічного проєктного середовища.

Ключові слова: управління, проєкт, післявоєнний період, пожежно-рятувальні формування, оптимальне розташування, геоінформаційні системи, просторове моделювання, ефективність.

A. M. Tryhuba¹, R. T. Ratushnyi², A. R. Ratushnyi², L. S. Koval², A. I. Ivanusa²

¹Lviv National Environmental University, Lviv, Ukraine

²Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

OPTIMIZATION OF SECURITY INFRASTRUCTURE IN POST-WAR RECONSTRUCTION PROGRAMS USING MODERN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS)

Introduction. The article substantiates the peculiarities of managing the configuration of fire and rescue units and highlights the relevance of optimizing their deployment in the post-war period to restore the functionality of security infrastructure. Based on an analysis of the current state of theory and practice, it has been established that the effective deployment of fire and rescue units requires the use of geographic information systems (GIS) for spatial analysis of territories, risk assessment, resource constraints, and infrastructure accessibility. In the context of limited funding, demographic shifts, and damage to the transport network, the project-based management of fire and rescue units necessitates a systematic approach, the application of modern management tools, and the integration of spatial data into the decision-making process for developing security infrastructure at the level of administrative districts and communities.

Purpose. To substantiate an approach and develop a method for optimizing the location of fire and rescue units in the post-war period using modern geographic information systems. The proposed method aims to enhance the efficiency of management decision-making, ensure rational resource planning, minimize emergency response time, and improve the safety of critical infrastructure facilities under conditions of limited resources and a dynamic planning environment.

Methods. To examine the post-war conditions of the territories within selected administrative districts, a statistical evaluation method was applied to assess socio-demographic and infrastructure characteristics. This approach made it possible to identify key factors influencing the project environment. A systematic approach, geographic information analysis, territorial coverage modeling, and optimization techniques for the placement of fire and rescue units were employed. Additionally, methods of analysis and synthesis were used to determine the main variables shaping the system structure for deploying fire and rescue units in specific areas. The proposed tools are based on modern information technologies. In particular, geographic information systems (GIS), spatial modeling, and optimization algorithms were applied to support informed management decisions regarding the location of fire and rescue units during the post-war recovery period.

Results. A method for optimizing the location of fire and rescue units within a given administrative territory has been developed. It consists of a systematic implementation of ten stages and utilizes geographic information systems (GIS) based on the OpenStreetMap (OSM) framework. The approach accounts for the topography of the area and existing damage to infrastructure facilities (such as roads, bridges, and buildings), which affects travel time to emergency scenes and the effectiveness of territorial deployment.

Fire and emergency risk forecasting serves as the basis for modeling possible location scenarios. The optimization process involves clustering risk zones, analyzing the transport network to assess accessibility, and applying algorithms to minimize the response time of fire and rescue units to emergencies.

Conclusions and specific proposals of the author. The study confirms the relevance and necessity of implementing projects aimed at establishing fire and rescue units, as well as the urgency of optimizing their deployment in the post-war period to restore the functionality of security infrastructure.

Based on the research, a method was developed that utilizes modern geographic information systems (GIS) to provide accurate, up-to-date spatial data. This enables comprehensive analysis of a given administrative territory and supports informed decision-making regarding the optimal placement of fire and rescue units. The method considers available resources, demographic trends, the condition of transport infrastructure, and risks associated with a dynamic project environment.

The use of analytical tools based on the OpenStreetMap (OSM) framework allows the territorial deployment of fire and rescue units to be coordinated with ongoing changes in the project environment.

Further research is recommended to apply the proposed method in various administrative areas affected by military operations. This will help to substantiate practical recommendations for project managers regarding the configuration and planning of fire and rescue services.

The author also proposes integrating computational intelligence tools into the planning and implementation processes to enhance adaptability in dynamic and resource-constrained conditions.

Key words: management, project, post-war period, fire and rescue units, optimal location, geographic information systems (GIS), spatial modeling, efficiency.

Постановка проблеми. Післявоєнний період потребуватиме оперативного відновлення безпечної інфраструктури окремих адміністративних районів, які постраждали від воєнних дій [1-3]. З-поміж них важливим науково-прикладним завдання є ефективне територіальне розташування пожежно-рятувальних підрозділів. Його розв'язання забезпечить швидке реагування на надзвичайні ситуації, зменшення наслідків можливих ризиків у динамічному проектному середовищі. Однак в умовах значного пошкодження дорожньої інфраструктури, використання об'єктів критичної інфраструктури, нестачі ресурсів та потреби у раціональному використанні наявних можливостей виникає потреба у оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період [4-7].

Традиційні підходи до планування розташування пожежно-рятувальних підрозділів у більшості не враховують сучасних вимог до адаптивності системи, змін у стані доріг і об'єктів критичної інфраструктури [8-11]. У свою чергу, сучасні геоінформаційні системи (ГІС) відкривають нові можливості для аналізу просторових даних, моделювання покриття територій та прийняття обґрунтованих управлінських рішень з урахуванням багатьох взаємозалежних чинників динамічного проектного середовища.

Таким чином, актуальною науково-прикладною задачею є обґрунтування підходу та на його основі розроблення методу оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період із використанням сучасних геоінформаційних систем, що дозволяє підвищити ефективність прийняття управлінських рішень, забезпечити раціональне планування ресурсів, мінімізувати час реагування на надзвичайні ситуації та покращити безпеку об'єктів критичної інфраструктури в умовах обмежених ресурсів та динамічного проектного середовища. У нашій статті розкрито особливості такого підходу та обґрунтовано основні етапи методу оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань у

післявоєнний період із використанням сучасних геоінформаційних систем.

Аналіз наукових досліджень галузі. У сучасних умовах, коли завдання ефективного реагування на надзвичайні ситуації постає як один із основних пріоритетів безпекової політики, питання оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період набуває особливої ваги [12-14]. Впродовж останніх років у науковому середовищі спостерігається зростання інтересу до тематики розташування пожежно-рятувальних формувань, зокрема служб екстреного реагування, з використанням інструментів просторового аналізу та оптимізаційного моделювання [15]. У цьому напрямі, вагоме місце посідає дослідження алгоритмів та розробка методів і моделей, що дозволяють враховувати територіальну специфіку, демографічні показники, стан дорожньої мережі, а також доступність об'єктів для оперативного виїзду підрозділів.

Багато наукових праць [16; 17], присвячено задачам покриття на заданій території, зокрема моделям р-медіани, р-центрів. Проведені дослідження вміщують моделювання максимального охоплення, демонструють прикладну ефективність у завданнях стратегічного розміщення пожежно-рятувальних формувань. Водночас, більшість цих моделей мають обмеження, пов'язані з їхньою статичністю. Зокрема, вони не враховують зміни у структурі населених пунктів чи пошкодження транспортної інфраструктури, що особливо актуально в умовах післявоєнного відновлення систем безпеки районів та громад.

Окремий напрям формують дослідження, у яких основний акцент зроблено на використанні геоінформаційних систем як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень [18-20]. Завдяки функціоналу ГІС можливо поєднувати просторові дані, карти ризиків, моделі транспортної доступності та дані про наявні ресурси. Це у свою чергу створює передумови для комплексного планування розташування пожежно-рятувальних формувань на заданій адміністративній території.

Автори таких досліджень підкреслюють важливість не лише точності початкових даних, а й адаптивності систем безпеки до змін, що є важливим у післявоєнний період.

Отже, існуючі підходи до планування територіального розташування пожежно-рятувальних структур зазвичай базуються на статистичних даних про пожежі та демографічних особливостях конкретних територій. Однак, у післявоєнний період ці підходи стають неефективними через зміну видів ризиків, невизначеності результатів бойових дій та часткового або повного руйнування існуючої інфраструктури. Враховуючи вище сказане, вирішення управлінської задачі розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період потребує використання сучасних методів, таких як геоаналітика, алгоритми оптимізації та машинного навчання. Це дасть можливість автоматизувати управлінський процес визначення конфігурації та розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період.

Не вирішені раніше частини загальної проблеми. Сьогодні залишається складною і багатоаспектною науково-прикладна задача ефективного розташування пожежно-рятувальних формувань на заданих територіях, що зазнали наслідків бойових дій. Попри наявність окремих наукових праць у сфері логістики та просторового планування розташування пожежно-рятувальних формувань, більшість із них не враховують специфіку післявоєнного періоду. У цей період слід враховувати такі основні чинники, як зруйнована інфраструктура (дороги, мости тощо), зміна густоти населення та потреба оперативного реагування на нові осередки ризику. Традиційні підходи, розроблені переважно для умов мирного часу, спираються на припущення про доступність транспортної мережі, наявність повного доступу до об'єктів тощо. У післявоєнний період ці умови для оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань є обмеженими або взагалі не діють.

Однією з принципових прогалин залишається відсутність методів та моделей, здатних адекватно оцінити доступність населених пунктів для пожежно-рятувальних формувань у динаміці. При цьому слід враховувати тимчасові обмеження, руйнування автошляхів, мостів, які не функціонують тощо. У більшості моделей, які застосовуються в практиці розташування пожежно-рятувальних формувань, транспортні зв'язки подані як фіксовані графи. При цьому у післявоєнний період їхня структура змінюється. Це робить недоцільним використання статичних моделей і вимагає розробки підходів, здатних працювати з оновленими даними в режимі реального часу.

Не менш важливою є складовою проблеми у післявоєнний період є просторова невизначеність

щодо існуючої кількості населених пунктів або постійного населення, що ускладнює оцінку ризиків і потреби у доступі до них пожежно-рятувальним формуванням. Систематизація таких даних потребує сучасних інструментів збору та обробки інформації. Зокрема, можна використувати супутниковий моніторинг, краудсорсингові платформи та відкриті геоінформаційні джерела, такі як OpenStreetMap. На даний час залишається обмеженим рівень їх інтеграції в реальні системи підтримки прийняття управлінських рішень.

Таким чином, існує потреба у обґрунтуванні підходу та розробленні методу оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період із використанням сучасних геоінформаційних систем, що дозволяє підвищити ефективність прийняття управлінських рішень. Це дасть можливість врахувати геодинамічну змінність, стан транспортної доступності, локальні загрози, соціально-демографічні показники та ступінь зруйнованості об'єктів на заданій території. У запропонованому методі наявне поєднання сучасних геоінформаційних технологій, алгоритмів просторового аналізу та актуальних даних заданої території, що дає можливість врахувати динамічне проектне середовище у післявоєнний період.

Таким чином, є потреба у розробці методу оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період. Він має базуватися на підході, що забезпечує гнучке, ефективне та адаптивне визначення територіального розташування пожежно-рятувальних підрозділів. Це сприяє мінімізації часу реагування на повідомлення щодо надзвичайних подій. Проводиться аналіз дорожньої мережі із врахуванням пошкоджень, а також доступності об'єктів. Забезпечується адаптація до змін проектного середовища у режимі реального часу завдяки інтеграції з даними OSM. Усе вище зазначене дає можливість значно підвищити рівень безпеки населення громад та зменшити збитки від наслідків надзвичайних ситуацій завдяки якісному управлінню проектами створення територіальних пожежно-рятувальних структур у післявоєнний період.

Ми розробили метод оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів на заданій адміністративній території. Цей метод передбачає використання географічних інформаційних систем (ГІС) на основі фреймворку OpenStreetMap (OSM). В основу цього методу покладено підхід, який дає можливість врахувати топографію місцевості заданої території, наявні пошкодження інфраструктурних об'єктів (доріг, мостів, будівель тощо). Окрім того, використовується прогнозування

ризиків виникнення пожеж і надзвичайних ситуацій. Оптимізація розташування пожежно-рятувальних підрозділів на заданій адміністративній території здійснюється із використанням методів кластеризації зон ризику, аналізу транспортної мережі для визначення доступності до об'єктів та алгоритмів мінімізації часу прибуття

пожежно-рятувальних підрозділів на місця надзвичайної події.

Перевагами використання запропонованого методу оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період є можливість вирішити управлінські завдання, які означено на рис. 1.



Рисунок 1 – Управлінські завдання, які розв’язуються на основі запропонованого методу оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період

Отже, запропонований метод оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період на відміну від існуючих дає можливість врахувати:

- 1) руйнування транспортної інфраструктури (пошкоджені дороги, будівлі, мости);
- 2) існуючі ризики виникнення надзвичайних подій (щільність населення, виникнення пожеж, наявність потенційно небезпечних та промислових об'єктів тощо);
- 3) час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів до місць виникнення надзвичайних ситуацій;
- 4) існуючі ресурси у кожному адміністративному районі.

Мета досліджень. Обґрунтувати підхід та розробити метод оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період із використанням сучасних геоінформаційних систем, що дозволяє підвищити ефективність прийняття управлінських рішень, забезпечити раціональне планування ресурсів, мінімізувати час реагування на надзвичайні ситуації та покращити безпеку об'єктів критичної інфраструктури в умовах обмежених ресурсів та динамічного проектного середовища.

Основні методи дослідження. Для вивчення особливостей післявоєнного стану територій окремих адміністративних районів використано

метод статистичного оцінювання соціально-демографічних та інфраструктурних характеристик, що дало змогу виокремити основні чинники їх впливу на проектне середовище. Використано методи системного підходу, геоінформаційного аналізу, моделювання покриття територій та розв’язання задачі оптимального розміщення пожежно-рятувальних формувань. Використано методи аналізу та синтезу чинників проектного середовища, що дозволили визначити основні змінні, що формують структуру системи розміщення пожежно-рятувальних формувань на заданій території. Запропонований інструментарій базується на сучасних інформаційних технологіях. Зокрема, використано геоінформаційні системи (GIS), просторове моделювання та алгоритми оптимізації для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період.

Основна частина. Післявоєнний час на територіях, де проходили бойові дії або наявні пошкодження об'єктів, характеризується суттєвими пошкодженнями інфраструктури. Це у свою чергу підвищує ризик виникнення надзвичайних ситуацій, що зумовлює потреби у швидкому реагуванні на загрози, що впливають на безпеку мешканців цих територій. Одним із основних завдань, під час реалізації проектів створення територіальних пожежно-рятувальних структур у

післявоєнний період, є удосконалення системи розміщення пожежно-рятувальних підрозділів. Їх розташування на окремій адміністративній території впливає на ефективне прикриття території, швидкий доступ до критичних об'єктів та зменшення часу реагування на надзвичайній ситуації.

Запропонований метод оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період передбачає виконання 10 етапів, які представлено на рис. 2.

Крок 1. Збір даних про задану адміністративну територію через OSMNX із використанням OpenStreetMap. На першому кроці реалізації методу виконуємо збір даних про задану адміністративну територію. Це потрібно для формування актуальної мережі транспортних шляхів, аналізу доступності територій для руху пожежно-рятувальних формувань, а також виявлення критичних об'єктів, які потребують підвищеного рівня захисту від надзвичайних ситуацій.

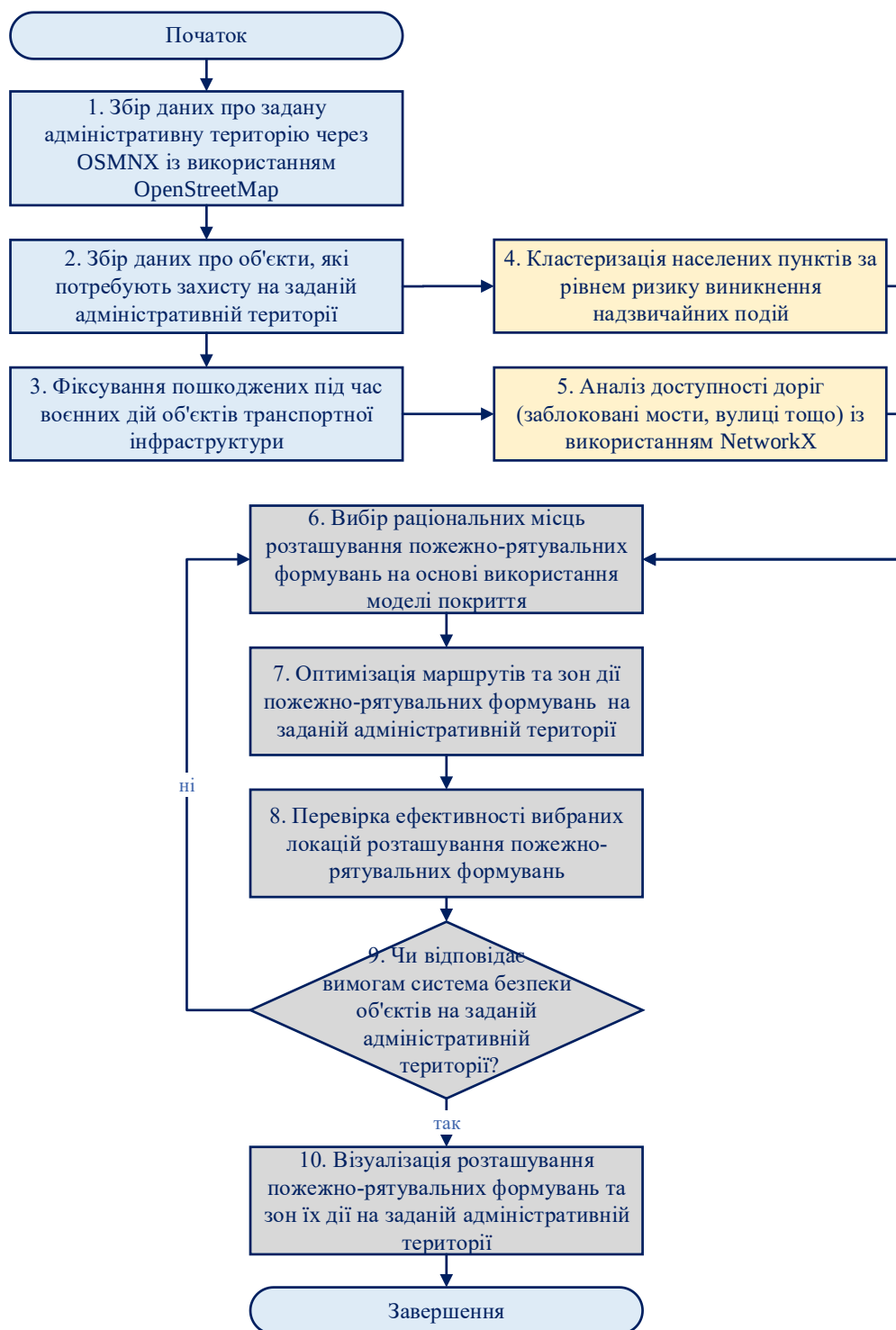


Рисунок 2 – Блок схема методу оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період

Для цього використовуємо OpenStreetMap (OSM) – відкрите географічне джерело, яке містить детальну інформацію про вуличну мережу, будівлі, мости, річки, інженерні споруди та об'єкти критичної інфраструктури [21].

Отримання цих даних здійснюємо через бібліотеку OSMNX (мова Python), яка дозволяє завантажувати, обробляти та аналізувати геодані у форматі графів. Це дає змогу побудувати актуальну мережу транспортної інфраструктури, включаючи дороги, вулиці, перехрестя, залізничні переходи та інші об'єкти, що можуть впливати на тривалість переміщення пожежно-рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних подій.

Транспортну мережу представляємо у вигляді графа, де вершинами V є перехрестя та інші базові точки дорожньої мережі, а ребра E – відрізки доріг між ними. Ваги W на ребрах E відображають довжину вулиць, або ж середню швидкість руху, стан дорожнього покриття тощо. Формально, граф транспортної інфраструктури можна записати виразом:

$$G = (V, E, W), \quad (1)$$

де W – множина ваг, що характеризують умови руху пожежно-рятувальних формувань по кожному сегменту дорожньої мережі.

Крок 2. Збір даних про об'єкти, які потребують захисту на заданій адміністративній території. Наступним кроком є ідентифікація критично важливих об'єктів, що потребують підвищеного рівня захисту у разі виникнення надзвичайних ситуацій. До таких об'єктів належать медичні заклади, школи, промислові підприємства, електростанції, житлові комплекси високої щільності населення та склади із небезпечними речовинами.

Далі виявляємо об'єкти, які потребують першочергового реагування у разі виникнення пожеж або інших надзвичайних подій. Для збору даних про ці об'єкти використовуємо теги OpenStreetMap, такі як:

- «amenity»=«hospital» для лікарень;
- «amenity»=«clinic» для клінік;
- «amenity»=«school» для шкіл;
- «amenity»=«kindergarten» для дитячих садків;
- «landuse»=«industrial» для промислових підприємств;
- «landuse»=«residential» для густонаселених районів.

Для оцінки важливості кожного об'єкта вводимо коефіцієнт критичності K , що визначається за виразом:

$$K = \frac{P \cdot S \cdot R}{1000}, \quad (2)$$

де P – чисельність населення (працівників), які наявні на об'єкті, осіб; S – площа будівлі, м²; R – рівень ризику (від 1 до 5, визначається експертно або за статистичними даними).

Надалі виконуємо розрахунки за формулою (2) та формуємо таблицю із характеристиками показників критичності для вибраних об'єктів (табл. 1).

Отримані дані дають можливість оцінити пріоритетність об'єктів заданої адміністративної території для пожежно-рятувальних підрозділів, що буде враховано під час визначення оптимального розташування депо.

Крок 3. Фіксування пошкоджених об'єктів транспортної інфраструктури під час воєнних дій. Одним із важливих чинників проектного середовища, який значною мірою впливає на ефективність планування проектів створення територіальних пожежно-рятувальних структур у післявоєнний період, є стан транспортної інфраструктури. У післявоєнний період частина доріг, мостів та тунелів будуть пошкоджені або зруйновані внаслідок воєнних дій. Це вплине на вибір маршрутів руху пожежно-рятувальних формувань до місць із виникненням надзвичайних подій та загальний рівень доступності для них територій.

Дані щодо пошкоджених об'єктів інфраструктури отримаємо із використанням запропонованої нами моделі, яка передбачає використання унікальної платформи Google Earth Engine для аналізу великих геоданих та фреймворку OpenStreetMap. Модель ідентифікації пошкоджених об'єктів транспортної інфраструктури заданої адміністративної території у післявоєнний період дає можливість визначити зафіксувати пошкоджені об'єкти транспортної інфраструктури під час воєнних дій. Це враховується під час оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період.

Для врахування пошкоджених об'єктів транспортної інфраструктури під час формування маршрутів руху пожежно-рятувальних формувань, усі пошкоджені сегменти виключаються з графа транспортної мережі. Це математично записуємо таким виразом:

$$G' = G - E_d, \quad (3)$$

де G' – оновлений граф територіального розташування об'єктів, які потребують захисту на заданій адміністративній території; E_d – множина зруйнованих ребер (доріг, мостів тощо).

Таким чином, модифікована дорожня мережа враховує реальний стан транспортної інфраструктури та виключає маршрути, які неможливо виконати через пошкоджені об'єкти (доріг, мостів тощо).

Описані три кроки методу забезпечують формування повноцінного набору вхідних даних для подальшої оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів на заданій території у післявоєнний період. Вони зроблять можливим отримати характеристики транспортної мережі з використанням OpenStreetMap. Вони є основою для визначення коефіцієнта критичності K кожного із об'єктів, які потребують захисту. Отримані дані про пошкодження транспортної інфраструктури дадуть змогу формувати ефективні маршрути руху пожежно-рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних подій. Вони забезпечать виконання наступних кроків для визначення оптимальних місць розташування пожежно-рятувальних формувань за критеріями мінімізації часу реагування на надзвичайні події та максимальної ефективності покриття заданої адміністративної території.

Крок 4. Кластеризація критично важливих об'єктів за рівнем ризику виникнення надзвичайних подій. Розподіл критично важливих об'єктів на групи за рівнем ризику є важливим етапом під час планування проєктів створення територіальних пожежно-рятувальних структур у післявоєнний період. Цей крок дозволяє визначити, які об'єкти потребують першочергової уваги та які з них можна віднести до менш критичних груп.

На основі отриманих даних (табл. 1) щодо показників критично важливих об'єктів заданої адміністративної території їх розділяємо на три групи, залежно від рівня ризику (табл. 2).

Отримані кластери визначають пріоритетність реагування на надзвичайні події. Об'єкти з високим ризиком потребують оперативного реагування, оскільки їх пошкодження призводить до значних людських втрат і матеріальних збитків. У подальшому виконується візуалізація кластеризації об'єктів заданої адміністративної території за рівнем ризику.

Крок 5. Аналіз доступності доріг (заблоковані мости, вулиці тощо) із використанням NetworkX. На цьому кроці аналізується сформований граф дорожньої мережі, який представлено на рис. 5. У цьому графі кожен об'єкт (дорога або міст) є ребром, а перехрестя або важливі точки з'єднання – вузлами графа. Завантаження дорожньої мережі здійснюється через OpenStreetMap за допомогою бібліотеки OSMNX, дає можливість отримати граф, що описується формулою (1).

Після цього в граф додаються вагові коефіцієнти, що відображають доступність дороги:

$$w(e) = \begin{cases} \infty, & \text{пошкоджена дорога} \\ d(e), & \text{інше} \end{cases}, \quad (4)$$

де $w(e)$ – вагова функція (довжина дороги або блокування); $d(e)$ – фактична довжина дорожнього сегмента, якщо він доступний.

Результати аналізу блокування об'єктів транспортної мережі заданої адміністративної території із використанням тег OpenStreetMap, що позначають пошкоджені дороги та мости, подаються у вигляді таблиці 3.

Надалі усі об'єкти (дороги та мости) транспортної мережі заданої адміністративної території, що представлені у таблиці 3, відображаються у графі G як недоступні.

Після цього виконується аналіз шляхів руху пожежно-рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних подій. Використовується бібліотека NetworkX мови програмування Python для дослідження графів та мереж. Потім аналізуються найкоротші маршрути між основними точками, які відображають розташування пожежно-рятувальних формувань та об'єкти високого ризику щодо виникнення надзвичайних подій. Використано алгоритм Дейкстри, який забезпечує пошук оптимального маршруту з урахуванням заблокованих ділянок:

$$d(u, v) = \min \sum w(e), \quad (5)$$

де $d(u, v)$ – найкоротший шлях між вершинами u та v ; $w(e)$ – довжина кожного сегмента дороги або його блокування.

Якщо шлях між двома точками містить заблоковану дорогу (тобто $w(e) = \infty$), то маршрут вважається недоступним. На основі цього аналізу визначаються ефективні маршрути для руху пожежно-рятувальних формувань, щоб мінімізувати час прибуття до важливих об'єктів, у яких виникли надзвичайні події. При цьому, використання NetworkX дозволяє ефективно моделювати транспортну доступність, що є вагомим чинником для швидкого реагування на надзвичайні події.

Крок 6. Вибір раціональних місць розташування пожежно-рятувальних формувань на основі використання моделі покриття. Враховуючи результати попередніх етапів, стає очевидним, що визначення місць розташування пожежно-рятувальних формувань потребує врахування доступності дорожньої мережі та щільності критично важливих об'єктів.

Для виконання цього етапу використовується модель вибору раціональних місць розташування пожежно-рятувальних формувань на заданій території використано відкриті геоінформаційні дані, що надає платформа OpenStreetMap. Ці дані є основою формування детального уявлення про задану територію (громаду або район) та її дорожню мережу. Для опрацювання даних

OpenStreetMap у середовищі Python застосовано бібліотеку OSMNX, яка забезпечує зручний інструментарій для створення графа дорожньої мережі та роботи з ним.

Запропонована модель забезпечує формування варіантів раціональних місць розташування пожежно-рятувальних формувань на заданій території. У подальшому ці варіанти використовуються для оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період із врахуванням інших чинників (цінності, логістики, безпеки тощо).

Крок 7. Оптимізація маршрутів та зон дії пожежно-рятувальних формувань на заданій адміністративній території. Після визначення потенційних місць дислокації пожежно-рятувальних формувань необхідно перейти до етапу оптимізації маршрутів для їх переміщення, а також чіткого окреслення зон дії кожного підрозділу. Основна мета цього етапу полягає у тому, щоб мінімізувати час прибуття до об'єктів критичної інфраструктури та населених пунктів, зважаючи на поточний стан дорожньої мережі та можливі обмеження руху.

Для кожного з базових пунктів розташування пожежно-рятувальних формувань B_i визначається зона обслуговування, яка включає ті об'єкти критичної інфраструктури та населені пункти, що розташовані в межах мінімального часу прибуття у разі виникнення надзвичайної події. Формально оптимізацію можна представити:

$$Z_i = \left\{ v_j \in V_c \cup V_s \mid T(B_i, v_j) \leq T_{\max} \right\}, \quad (5)$$

де Z_i – зона дії пожежно-рятувального формування з розташуванням у вузлі B_i , км; $T(B_i, v_j)$ – мінімальний час проходження маршруту від місця розташування B_i до об'єкта v_j , хв; $T_{\max}$ – гранично допустимий час прибуття пожежно-рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних подій для заданої території, хв.

Визначення мінімального часу $T(B_i, v_j)$ проходження маршруту від місця розташування B_i до об'єкта v_j здійснюється завдяки розрахунку найкоротшого шляху у графі дорожньої мережі з урахуванням вагових коефіцієнтів ребер (довжина дороги, середня швидкість руху, стан дороги). Для цього використовується модифікований алгоритм Дейкстри, де вага кожного ребра (e) визначається як:

$$w(e) = \frac{l(e)}{v(e)}, \quad (6)$$

де $l(e)$ – довжина ділянки дороги, км; $v(e)$ – середня допустима швидкість на цій ділянці, км/год.

На основі розрахованих маршрутів для кожного пожежно-рятувального формування формується карта зон дії, зведена інформація щодо оптимізації зон їх дії подається у вигляді таблиці 4.

Таким чином, реалізований підхід до оптимізації дозволяє отримати обґрунтовані зони дії для кожного пожежно-рятувального формування, забезпечити покриття всієї території (громади або району) у межах допустимого часу прибуття пожежно-рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних подій та уникнути надмірного дублювання використовуваних ресурсів.

Крок 8. Перевірка ефективності вибраних локацій розташування пожежно-рятувальних формувань. Після завершення етапу вибору потенційних місць для дислокації пожежно-рятувальних формувань слід оцінити ефективність запропонованих локацій. Основна мета перевірки полягає в тому, щоб впевнитися, що обрані точки забезпечують мінімальний час прибуття пожежно-рятувальних формувань до місць виникнення надзвичайних подій, покривають всі об'єкти критичної інфраструктури, а також відповідають критеріям рівномірного навантаження підрозділів ДСНС.

Для кількісної перевірки ефективності використовується показник середнього часу прибуття пожежно-рятувальних формувань до об'єктів у зоні їх дії. Додатково аналізується відсоток критичних об'єктів, що перебувають у межах допустимого часу прибуття пожежно-рятувальних формувань. Формально ефективність для кожного базового пункту розташування пожежно-рятувальних формувань B_i можна оцінити за формулою:

$$t(B_i) = \frac{1}{|Z_i|} \sum_{v_j \in Z_i} T(B_i, v_j), \quad (7)$$

де $t(B_i)$ – середній час прибуття пожежно-рятувальних формувань до об'єктів у зоні їх дії з базового пункту B_i ; Z_i – зона дії пожежно-рятувальних формувань; $T(B_i, v_j)$ – час руху пожежно-рятувального формування від місця розташування B_i до об'єкта v_j .

Якщо для всіх пунктів B_i розташування пожежно-рятувальних формувань середній час $t(B_i)$ не перевищує нормативного значення T_n , то обрані локації вважаються ефективними. Для наочності результати перевірки можна подати у таблиці 5.

Окрім кількісних показників, під час перевірки аналізують завантаженість дорожньої

мережі, доступність основних маршрутів та можливість оперативного перенаправлення у разі блокування окремих ділянок доріг.

Крок 9. Чи відповідає вимогам система безпеки об'єктів на заданій адміністративній території? Щоб зрозуміти, чи відповідає система безпеки об'єктів усім необхідним вимогам, спершу аналізується, як розташовані пожежно-рятувальні формування щодо основних об'єктів на території. Дивляться, чи всі об'єкти критичної інфраструктури потрапили у зони покриття, чи немає таких, до яких важко дістатися або де час реагування виходить за допустимі межі. Якщо десь бачимо, що об'єкт розташований далеко від бази, або доступ до нього ускладнений, це свідчить про потребу переглянути розташування пожежно-рятувальних формувань. Також пере-віряється, чи немає перевантажених підрозділів ДСНС, щоб частина об'єктів не залишалася без належного захисту. Загалом це дає розуміння, наскільки запропонована система справляється з поставленими завданнями і чи є сенс вносити зміни.

Крок 10. Візуалізація розташування пожежно-рятувальних формувань та зон їх дії на заданій адміністративній території. Коли вже було визначено точки, де саме розташовуватимуться пожежно-рятувальні формування, існує потреба показати ці результати так, щоб їх можна було легко оцінити. Для цього всю отриману інформацію наносимо безпосередньо на карту території громади або району. В першу чергу позначаємо базові пункти, тобто ті місця, де планується розташування пожежно-рятувальних формувань. Після цього для кожного з них окреслюємо зону, за яку вони відповідатимуть.

На підставі використання запропонованого методу ми виконали оптимізацію розташування пожежно-рятувальних підрозділів на території Криворізького району Дніпропетровської області у післявоєнний період. Насамперед ми виконали візуалізацію транспортної мережі Криворізького району Дніпропетровської області, отриману з OSM (рис. 3).

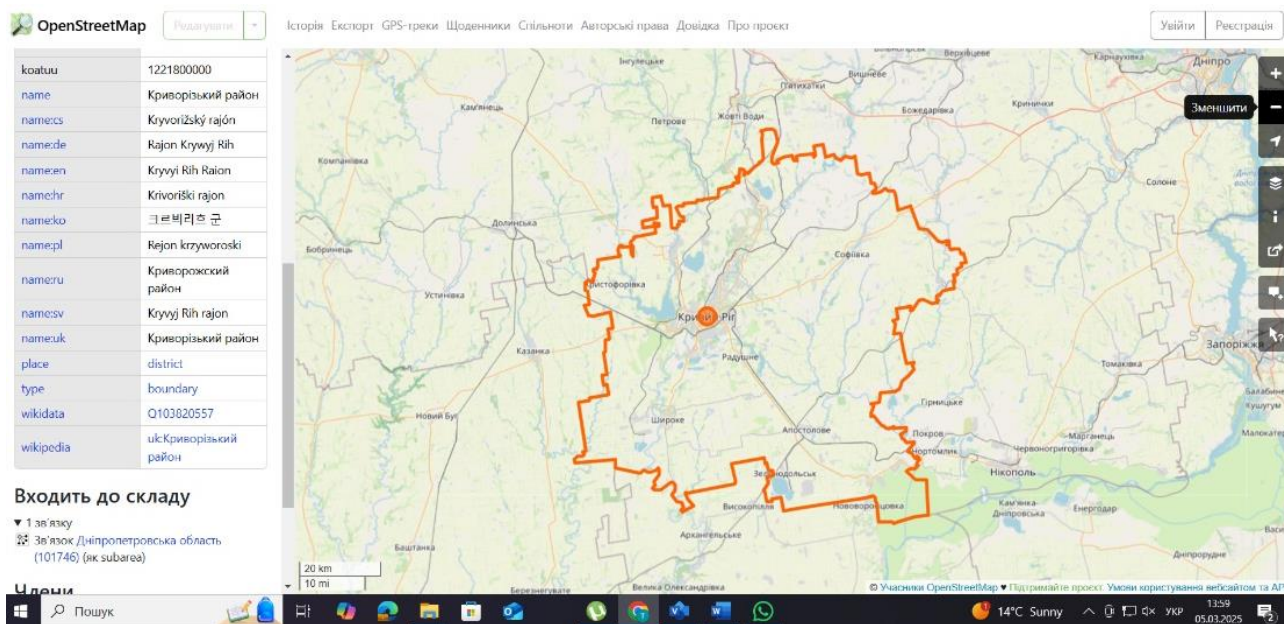


Рисунок 3 – Транспортна мережа Криворізького району Дніпропетровської області із сервісу OpenStreetMap [21]

Густота вузлів та зв'язків між ними демонструє доступність різних невеликих пунктів Криворізького району, що є досить важливим для розміщення пожежно-рятувальних формувань. Отримані дані використовуємо на наступних етапах для аналізу доступності об'єктів під час надзвичайних подій у окремих населених

пунктах та пошуку оптимальних місць розташування пожежно-рятувальних формувань.

Наступним кроком є відображення зон із важливими об'єктами критичної інфраструктури, що потребують підвищеного рівня захисту у разі виникнення надзвичайних ситуацій на території Криворізького району Дніпропетровської області (рис. 4).

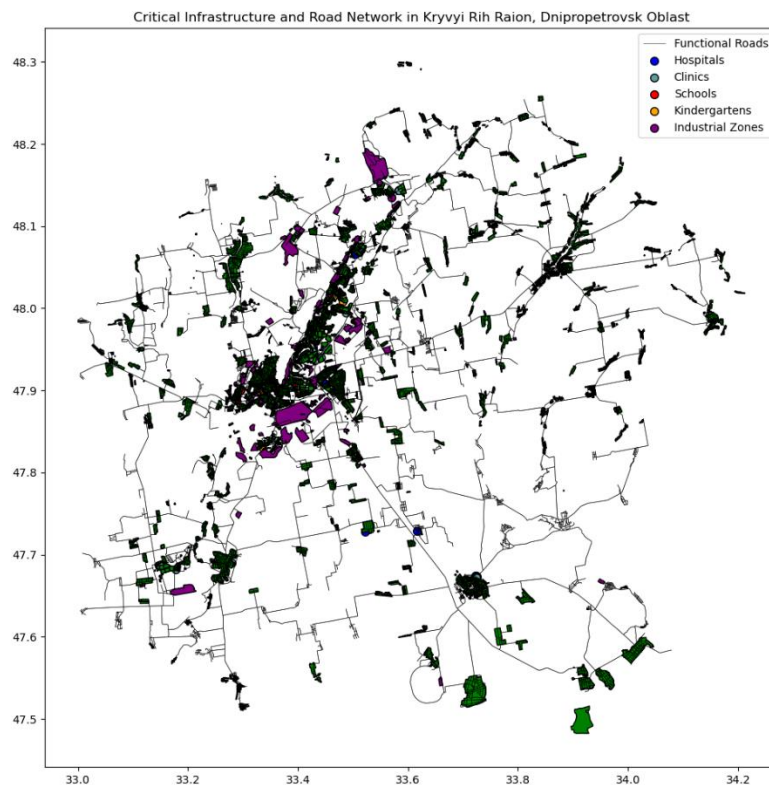


Рисунок 4 – Відображення зон із важливими об’єктами критичної інфраструктури, що потребують підвищеного рівня захисту у разі виникнення надзвичайних ситуацій на території Криворізького району Дніпропетровської області

Побудована карта з відображенням об’єктів критичної інфраструктури і дорожньої мережі на території Криворізького району Дніпропетровської області на підставі використання даних OpenStreetMap. Під час її створення автоматично завантажено функціональні дороги типу «drive», які використовуються для побудови графа дорожньої мережі. Потім із тієї ж самої території

вибираємо об’єкти, що мають важливе значення для інфраструктури, зокрема лікарні, поліклініки, школи, дитячі садки, промислові та житлові зони тощо.

Фрагмент відображення основних об’єктів критичної інфраструктури, що потребують підвищеного рівня захисту під час надзвичайних ситуацій на заданій території, представлено на рис. 5.

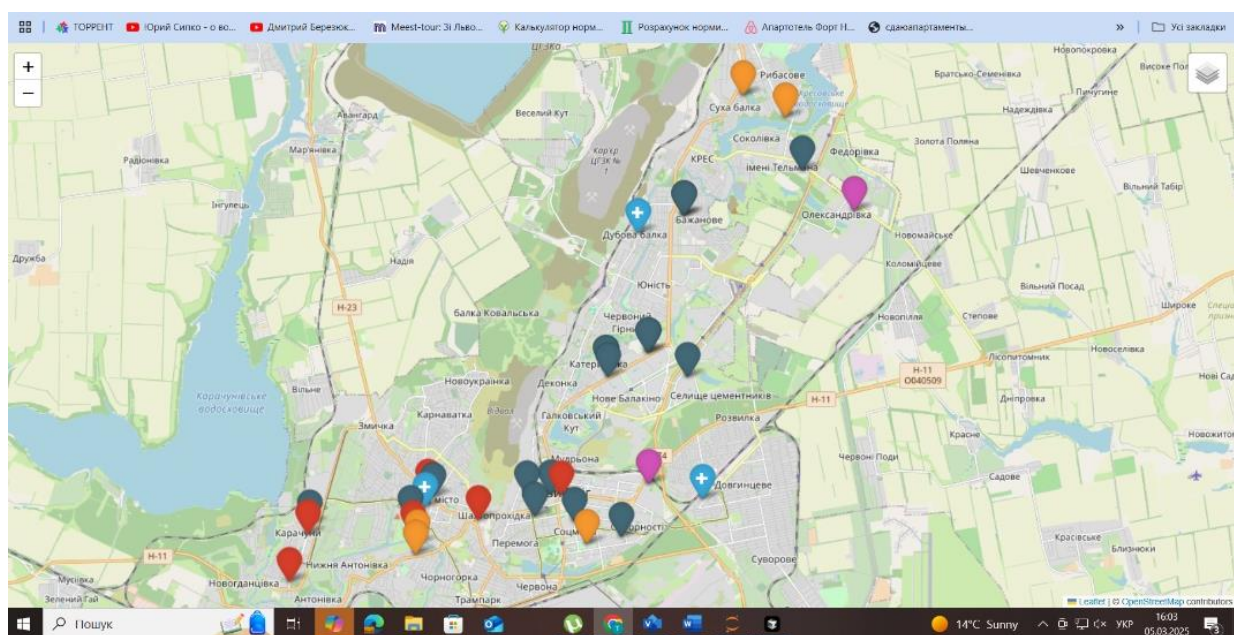


Рисунок 5 – Фрагмент відображення основних об’єктів критичної інфраструктури, що потребують підвищеного рівня захисту під час надзвичайних ситуацій на території Криворізького району Дніпропетровської області

Кожен тип об'єктів критичної інфраструктури задано відображено відповідним кольором, що дозволяє чітко розрізнити їх на карті. Далі всі елементи – дороги та об'єкти критичної інфраструктури – виводимо на карту з використанням бібліотеки Matplotlib. Завдяки цьому створюється зрозуміла та візуально насичена карта, яка

дозволяє побачити просторове розташування важливих об'єктів критичної інфраструктури заданого району та доступ до них через дорожню інфраструктуру.

Потім формуємо один спільний датафрейм із даними про об'єкти критичної інфраструктури на території Криворізького району Дніпропетровської області (табл. 1).

Таблиця 1

Результати ідентифікації показників важливих об'єктів критичної інфраструктури на території Криворізького району Дніпропетровської області

	name	category	geometry		centroid	longitude	latitude
0	Дитяче відділення	Лікарня	POINT (33.72315 47.67421)	POINT (33.72315 47.67421)	33.723146	47.674210	
1	Кардіологія	Лікарня	POINT (33.72296 47.67388)	POINT (33.72296 47.67388)	33.722957	47.673883	
2	Наркологія	Лікарня	POINT (33.72549 47.67245)	POINT (33.72549 47.67245)	33.725490	47.672446	
3	Приймальне відділення	Лікарня	POINT (33.72285 47.67272)	POINT (33.72285 47.67272)	33.722853	47.672720	
4	Центр крові	Лікарня	POINT (33.72505 47.6731)	POINT (33.72505 47.6731)	33.725052	47.673096	
2366	Без назви	Житлова зона	POLYGON ((33.41278 47.89631, 33.40729 47.8957,...	POINT (33.40917 47.89722)	33.409174	47.897219	
2367	Без назви	Житлова зона	POLYGON ((33.44816 47.97067, 33.44806 47.97067...	POINT (33.44539 47.97111)	33.445387	47.971111	
2368	Без назви	Житлова зона	POLYGON ((33.43594 47.97176, 33.43548 47.97179...	POINT (33.43473 47.97465)	33.434729	47.974652	
2369	Без назви	Житлова зона	POLYGON ((33.49948 48.05657, 33.49954 48.05641...	POINT (33.50025 48.05627)	33.500251	48.056266	
2370	Без назви	Житлова зона	POLYGON ((33.41389 47.96688, 33.41428 47.9668,...	POINT (33.41453 47.96612)	33.414531	47.966118	

Якщо назва об'єкта відсутня, вона замінюється на «Без назви». Далі визначимо розрахунок координат центру кожного об'єкта через переведення в метричну систему та повернення до географічної, що дозволяє точно визначити довготу і широту. У результаті

сформуємо таблицю з 2371 екземпляром, яка зберігається у CSV-файл із підтримкою кирилиці.

Надалі змодельюємо пошкоджені елементи транспортної інфраструктури Криворізького району. Це є можливість створити набір даних із пошкоджених унаслідок військової агресії росії доріг та мостів (табл. 2).

Таблиця 2

Фрагмент даних про заблоковані об'єкти (дороги та мости) транспортної мережі заданої адміністративної території

	type	name	status	length_m	start_lon	start_lat	end_lon	end_lat
0	Дорога	вул. Незалежності	Пошкоджено	1388.8	33.36	47.91	33.370	47.915
1	Дорога	вул. Соборна	Зруйновано	1388.9	33.38	47.92	33.390	47.925
2	Дорога	вул. Гагаріна	Частково пошкоджено	1388.6	33.35	47.89	33.360	47.895
3	Міст	міст по вул. Першотравнева	Обвалений	648.2	33.42	47.93	33.425	47.932
4	Міст	міст через Інгулець	Зруйновано	648.3	33.44	47.95	33.445	47.952

Для кожного об'єкта вказується тип («Дорога» або «Міст»), назва, статус пошкодження (наприклад, «Пошкоджено», «Зруйновано», «Обвалений») і геометрія у вигляді лінії, що описує початок та кінець відрізка на місцевості. Всі об'єкти задаються у географічній системі координат WGS84 (EPSG:4326).

Після отримання даних для кожного заблокованого об'єкта (дороги та мости) транспортної мережі заданої адміністративної території розраховуємо координати початкової та

кінцевої точки (довгота й широта), а також довжину лінії в метрах через перепроєкцію до метричної системи EPSG:3857. Наприклад, довжина вулиці Незалежності, яка позначена як «Пошкоджено», становить 1388,8 метрів, тоді як довжина зруйнованого мосту через Інгулець – 648,3 метри. Загалом у таблиці зафіксовано 5 об'єктів, із яких 3 – дороги, а 2 – мости, з довжиною кожної дороги близько 1388,6...1388,9 метрів, а довжина мостів приблизно 648,2...648,3 метрів. Далі ці дані зберігаються у файл CSV з

підтримкою кирилиці, щоб їх можна було використовувати в подальших GIS-аналізах.

Надалі моделюємо покриття об'єктів критичної інфраструктури зонами дії пожежно-рятувальних формувань (ПРФ) на території Криворізького району Дніпропетровської області. Усього було завантажено 2371 об'єкт критичної інфраструктури з CSV-файлу, кожен із яких має координати, тип та назву. Об'єкти автоматично прив'язуються до найближчих вузлів дорожнього графа, згенерованого на основі OpenStreetMap.

Ми розглянули 9 сценаріїв реалізації проектів розбудови системи безпеки на території Криворізького району. Вони передбачають розташування від 1 до 9 ПРФ. Для визначення

розміщення ПРФ використано кластеризацію методом К-середніх. У нашому випадку попередньо задається від 1 до 9 кластерів і формується зона дії кожного із ПРФ. Під час оптимізаційних розрахунків прийнято діючі регламенти [22]. Зокрема, швидкість руху рятувальних формувань до об'єктів становить 45 км/год, час прибуття – до 20 хвилин, що забезпечує визначення радіуса покриття у перерахунку на відстань. Центр кожного ПРФ визначається як середнє географічне положення об'єктів критичної інфраструктури, що належать до кластеру. Після цього ми розрахували кількість об'єктів критичної інфраструктури, що розташовані в межах досяжності ПРФ по дорогах. Отримані результати представлено у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати визначення показників зони дії пожежно-рятувальних формувань за різних сценаріїв реалізації проектів розбудови системи безпеки на території Криворізького району

Сценарій розташування ПРФ	Кількість ПРФ, од	Середній час проходження маршруту від місця розташування ПРФ до об'єкта критичної інфраструктури, хв	Максимальна відстань до об'єктів критичної інфраструктури, км	Кількість об'єктів у зоні дії ПРФ, од	Відсоток захищених об'єктів у межах норми, %
I	1	16,15	15,00	431	18,2
II	2	9,74	14,98	996	42,0
III	3	11,50	14,98	1169	49,3
IV	4	10,24	14,97	1035	43,7
V	5	10,71	14,99	1501	63,3
VI	6	11,21	14,99	1657	69,9
VII	7	11,13	15,00	2097	88,4
VIII	8	11,31	14,98	2095	88,4
IX	9	11,05	15,00	2279	96,1

У наведеній таблиці 3 представлено показники оптимізації зони дії пожежно-рятувальних формувань за дев'яти сценаріїв реалізації проектів розбудови системи безпеки на території Криворізького району. Встановлено, що захисту потребує 2371 об'єкт критичної інфраструктури. У першому сценарії завдяки розташуванню однією ПРФ вдалось охопити відповідно до нормованих показників захисту лише 431 об'єкт, що становить 18,2% від загальної кількості, при середньому часі прибуття ПРФ 16,15 хв і максимальній відстані 15,0 км. У другому сценарії, де кількість ПРФ збільшено до двох, захищено вже 996 об'єктів або 42,0%, а середній час зменшився до 9,74 хв. Найвищого показника покриття досягнуто у дев'ятому сценарії

з дев'ятьма ПРФ, де захищено 2279 об'єктів (96,1%) із середнім часом прибуття 11,05 хв. Значне покращення спостерігається вже при п'яти ПРФ (сценарій 5), коли захищено 1501 об'єкт, що становить 63,3%. У сценаріях із шістьма, сімома та вісьмома ПРФ рівень захищеності поступово зростає до 69,9%, 88,4% і 88,4% відповідно. Максимальна відстань до об'єктів критичної інфраструктури у всіх сценаріях не перевищує 15,0 км.

Потім ми оптимізували сценарій реалізації проекту розбудови системи безпеки на території Криворізького району Дніпропетровської області у післявоєнний період. Результати представлено на рис. 6.

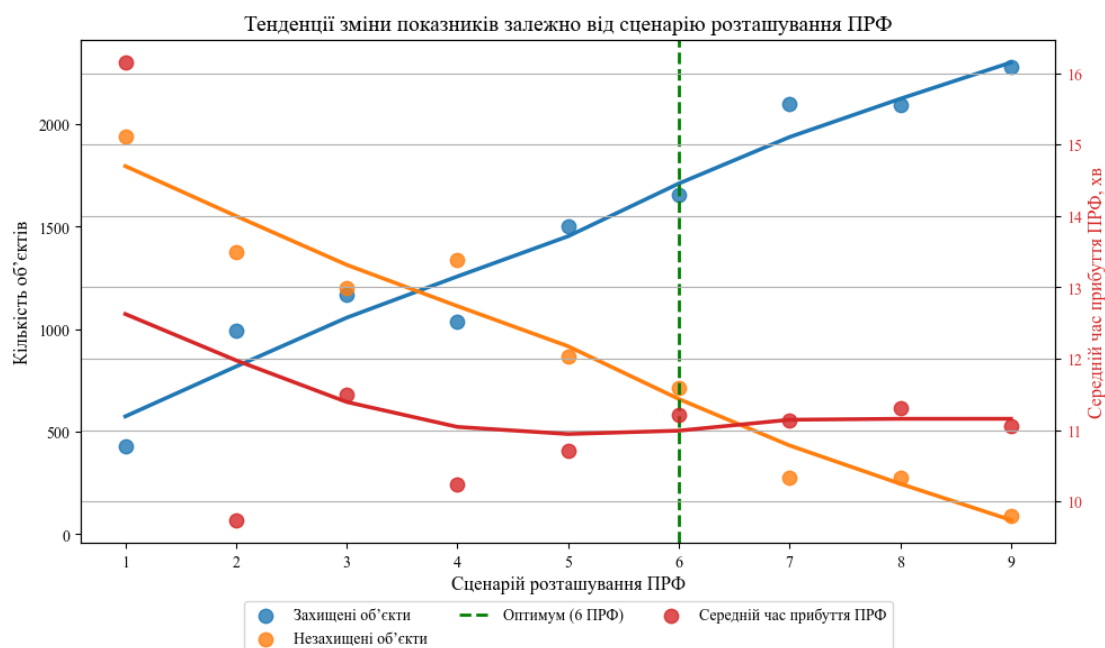


Рисунок 6 – Результати оптимізації сценарію реалізації проекту розбудови системи безпеки на території Криворізького району Дніпропетровської області у післявоєнний період

На рисунку 6 подано результати оптимізації сценарію реалізації проекту розбудови системи безпеки на території Криворізького району. Встановлено, що зі збільшенням кількості ПРФ з 1 до 9 одиниць спостерігається чітка тенденція до зростання кількості захищених об'єктів критичної інфраструктури. Відповідно захищеними є від 431 об'єктів критичної інфраструктури у I сценарії до 2279 об'єктів критичної інфраструктури у IX сценарії. У IX сценарії захищеними є 96,1% об'єктів критичної інфраструктури від загальної кількості (2371 од.). При цьому кількість незахищених об'єктів зменшується з 1940 од. до лише 92 од. Середній час прибуття ПРФ до об'єктів поступово знижується з 16,15 хв у сценарії I до 11,05 хв у сценарії IX. Оптимальним вважається сценарій VI, що передбачає розміщення шести ПРФ. При цьому, середній час прибуття ПРФ до об'єктів становить 11,21 хв, а також досягається охоплення 1657 об'єктів критичної інфраструктури. Тобто, захищеними у межах нормативів є майже 70% об'єктів критичної інфраструктури у районі. У подальшому зі зростанням кількості ПРФ приріст кількості захищених об'єктів критичної інфраструктури є менш інтенсивним.

Загальні висновки.

1. На підставі проведеного аналізу стану питання в науці та практиці встановлено, що існуючі підходи до планування територіального розташування пожежно-рятувальних структур зазвичай базуються на статистичних даних про пожежі та демографічних особливостях конкретних територій. У післявоєнний період ці підходи стають неефективними через зміну видів ризиків, невизначеності результатів бойових дій та

часткового або повного руйнування існуючої інфраструктури, що зумовлює потребу вирішення управлінської науково-прикладної задачі оптимізації розташування пожежно-рятувальних підрозділів у післявоєнний період на основі сучасних методів, таких як геоаналітика, алгоритми оптимізації та машинного навчання.

2. Обґрунтовано підхід та на його основі розроблено метод оптимізації розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період із використанням сучасних геоінформаційних систем. Він передбачає системне виконання 10 етапів, які базуються на використанні сучасних геоінформаційних систем, просторовому моделюванні та алгоритмі оптимізації для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо розташування пожежно-рятувальних формувань у післявоєнний період. Використання аналітичного інструментарію на основі фреймворку OpenStreetMap дозволяє узгоджувати територіальне розташування пожежно-рятувальних формувань із змінами у проектному середовищі. Це дозволяє підвищити ефективність прийняття управлінських рішень, забезпечити раціональне планування ресурсів, мінімізувати час реагування на надзвичайні ситуації та покращити безпеку об'єктів критичної інфраструктури в умовах обмежених ресурсів та динамічного проектного середовища.

3. На підставі використання запропонованого методу ми оптимізували розташування пожежно-рятувальних підрозділів на території Криворізького району Дніпропетровської області у післявоєнний період. Встановлено, що оптимальним вважається сценарій VI, що передбачає розміщення шести ПРФ. За цього сценарію середній

час прибуття ПРФ до об'єктів становить 11,21 хв. Також при сценарії VI досягається охоплення 1657 об'єктів критичної інфраструктури. Тобто, захищеними у межах нормативів є майже 70% об'єктів критичної інфраструктури. Надалі зі зростанням кількості ПРФ приріст кількості захищених об'єктів критичної інфраструктури є менш інтенсивним.

Список літератури:

1. Аналіз проекту плану післявоєнного відновлення України та рекомендації Екодії [Електронний ресурс]. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2022/07/plan-pislyavoen-vidnov-luhano-rekomend-ekodii.pdf>
2. Tryhuba A., Demchyna V., Ratushnyi A., Koval L. Identification of priority objects for the implementation of projects to restore the transport infrastructure of settlements in the post-war period. *Proceedings of the 5nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2024). Conference*. Bratislava, Slovakia, May 22, 2024. pp. 219-231. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3709/paper18.pdf> (Last accessed: 16.02.2025).
3. Зачко І. Г., Кобилкін Д. С., Зачко О. Б. Гібридні технології управління інфраструктурними проектами та програмами : монографія. Львів : СПОЛОМ, 2022. 266 с.
4. Тригуба А. М., Демчина В. Р., Ратушний А. Р., Коваль Л. С. Метод та результати визначення пріоритетних об'єктів під час ініціації проектів відновлення транспортної інфраструктури у післявоєнний час. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 2024, 29, 141-151. URL: <https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.15> (Last accessed: 27.02.2025).
5. Придатко О., Ляковська С., Мартин Є., Хлевной О. Моделювання багатопараметричних систем. Львів: ЛДУ БЖД, 2021. 245 с.
6. Martyn Y., Smotr O., Burak N., Prydatko O., Malets I. Software for Shelter's Fire Safety and Comfort Levels Evaluation. In book: *Data Stream Mining & Processing*. 2020. pp.457-469. DOI:10.1007/978-3-030-61656-4_31
7. Тригуба А. М., Ратушний А. Р., Демчина В. Р., Коваль Л. С. Особливості управління проектами відновлення транспортної та безпекової інфраструктури сільських громад у післявоєнний період. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 2023, 28, 44-54. URL: <https://doi.org/10.32447/20784643.28.2023.05>
8. Yang Z. Z., Guo L., Yang Z. Emergency logistics for wildfire suppression based on forecasted disaster evolution. *Annals of Operations Research*. 2019. 283(1). P. 385–412. doi.org/10.1007/s10479-017-2598-9. (Last accessed: 17.01.2025).
9. Tryhuba, A., Kondysiuk, I., Tryhuba, I., Boiarchuk, O., Tatomyr, A., Intellectual information system for formation of portfolio projects of motor transport enterprises. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022, 3109, pp. 44–52.
10. Tryhuba A., Zachko O., Grabovets V., Berladyn O., Pavlova I., Rudynets M. Examining the effect of production conditions at territorial logistic systems of milk harvesting on the parameters of a fleet of specialized road tanks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5(3). P. 59-70. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_5\(3\)_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_5(3)_7). (Last accessed: 17.10.2023).
11. Sikora, L., Lysa, N., Tkachuk, R., Fedevych, O. Informational and Procedural Description of an Energy-active Control Object Behavior Under Active Threats Conditions. *CEUR Workshop Proceedings*, 2023, 3373, pp. 507–517.
12. He Q., Xue L., Yang Y., Ding P., Liu M. Research on Chinese fire station optimal location model based on fire risk statistics: Case study in Shanghai. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2024. 14(5). P. 2052. <https://doi.org/10.3390/app14052052>. (Last accessed: 31.03.2025).
13. Zhou Y., Liu H., Wang N., Gu Y. Lagrangian relaxation-based approaches for cooperative location and assignment of emergency responders. *Alexandria Engineering Journal*. 2024. 107. P. 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.07.030>. (Last accessed: 31.03.2025).
14. Danshyna S., Nechausov A. Method of information technology for structure analysis of urban network fire-rescue units. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. (4). P. 171–183. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.4.12>. (Last accessed: 31.03.2025).
15. Yu D., Wang Z., Yue C., Wang J. Spatial modeling of brine level and salinity in the Qarhan Salt Lake using GIS and automated machine learning algorithms. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2025. 58. P. 102195. doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102195. (Last accessed: 31.03.2025).
16. Setiawan E., Kusuma J. V., Sulistyawan G. A., Astuti S. P. Optimising household solid waste collection facility in autonomous regions of developing countries: A case study on Karanganyar Regency, Indonesia. *Forum Geografi*. 2024. 38(3). P. 317–328. doi.org/10.23917/forgео.v38i3.4313. (Last accessed: 31.03.2025).
17. Volakakis V., Mahmassani H. S. Vertiport infrastructure location optimization for equitable access to urban air mobility. *Infrastructures*. 2024. 9(12). P. 239. doi.org/10.3390/infrastructures9120239. (Last accessed: 31.03.2025).

18. Mohamed A. G., Alqahtani F. K., Ismail E. R., Nabawy M. Synergizing GIS and genetic algorithms to enhance road management and fund allocation with a comprehensive case study approach. *Scientific Reports*. 2025. 15(1). P. 4634. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88760-4>. (Last accessed: 31.03.2025).

19. Belhadj C., Riahi R., Sebei A., Sifi S., Rebai N. Advanced groundwater potential and contamination vulnerability assessment using integrated GIS-based AHP techniques: A case study from the Bizerte watershed, Tunisia. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2025. 26. P. 100597. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100597>. (Last accessed: 31.03.2025).

20. Al-Sabbagh T. A., Almuqataf M. M., Elsaed E. L., Elkadeem M. R., Kotb K. M. Advanced GIS and fuzzy logic integration for strategic fire station placement in Yanbu industrial city, Saudi Arabia. *GeoJournal*. 2025. 90(2). P. 59. doi.org/10.1007/s10708-025-11304-w. (Last accessed: 31.03.2025).

21. OpenStreetMap. URL: openstreetmap.org/

22. Методичні рекомендації для органів місцевого самоврядування щодо організації та забезпечення пожежної безпеки на території об'єднаних територіальних громад. Київ, 2016. 32 с. URL: hromady.org/ (дата звернення: 31.03.2025).

References:

1. Analiz proiektu planu pisliavoiennoho vidnovlennia Ukrainy ta rekomendatsii Ekodii. Refrieved from: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2022/07/plan-pislyavoen-vidnov-luhano-rekomend-ekodii.pdf>

2. Tryhuba A., Demchyna V., Ratushnyi A., Koval L. Identification of priority objects for the implementation of projects to restore the transport infrastructure of settlements in the post-war period. *Proceedings of the 5nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2024). Conference*. Bratislava, Slovakia, May 22, 2024. pp. 219-231. Refrieved from: <https://ceur-ws.org/Vol-3709/paper18.pdf> (in Eng.)

3. Zachko I. H., Kobylkin D. S., Zachko O. B. Hibrydni tekhnolohii upravlinnia infrastrukturnymy proiektamy ta prohramamy : monohrafiia. Lviv : SPOLOM, 2022. 266 s. (in Ukr.)

4. Tryhuba A. M., Demchyna V. R., Ratushnyi A. R., Koval L. S. Metod ta rezultaty vyznachennia priorytetnykh ob'ektiv pid chas initsiiatsii proektiv vidnovlennia transportnoi infrastruktury u pisliavoiennyi chas. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiedialnosti*, 2024, 29, 141–151. Refrieved from: doi.org/10.32447/20784643.29.2024.15 (in Ukr.)

5. Prydatko O., Liaskovska S., Martyn Ye., Khlevnoi O. Modeliuvannia bahatoparametrychnykh system. Lviv: LDU BZhd, 2021. 245 s. (in Ukr.)

6. Martyn Y., Smotr O., Burak N., Prydatko O., Malets I. Software for Shelter's Fire Safety and Comfort Levels Evaluation. *Data Stream Mining & Processing*. 2020. pp.457-469. (in Eng.)

7. Tryhuba A. M., Ratushnyi A. R., Demchyna V. R., Koval L. S. Osoblyvosti upravlinnia proiektamy vidnovlennia transportnoi ta bezpekovoii infrastruktury silskykh hromad u pisliavoiennyi period. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiedialnosti*, 2023, 28, 44–54. Refrieved from: <https://doi.org/10.32447/20784643.28.2023.05> (in Ukr.)

8. Yang Z. Z., Guo L., Yang Z. Emergency logistics for wildfire suppression based on forecasted disaster evolution. *Annals of Operations Research*. 2019. 283(1). P. 385–412. Refrieved from: <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2598-9>. (in Eng.)

9. Tryhuba A., Zachko O., Grabovets V., Berladyn O., Pavlova I., Rudynets M. Examining the effect of production conditions at territorial logistic systems of milk harvesting on the parameters of a fleet of specialized road tanks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5(3). P. 59-70. Refrieved from: [gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_5\(3\)_7](https://gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_5(3)_7). (in Eng.)

10. Tryhuba A., Ratushny R., Bashynsky O., Shcherbachenko O. Identification of firefighting system configuration of rural settlements. *Fire and Environmental Safety Engineering. MATEC Web Conf. FESE 2018*. 247. Refrieved from: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700035>

11. Sikora, L., Lysa, N., Tkachuk, R., Fedevych, O. Informational and Procedural Description of an Energy-active Control Object Behavior Under Active Threats Conditions. *CEUR Workshop Proceedings*, 2023, 3373, pp. 507–517. (in Eng.)

12. He Q., Xue L., Yang Y., Ding P., Liu M. Research on Chinese fire station optimal location model based on fire risk statistics: Case study in Shanghai. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2024, 14(5), 2052. Refrieved from: doi.org/10.3390/app14052052 (in Eng.)

13. Zhou Y., Liu H., Wang N., Gu Y. Lagrangian relaxation-based approaches for cooperative location and assignment of emergency responders. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 107, 225–234. Refrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.07.030> (in Eng.)

14. Danshyna S., Nechausov A. Method of information technology for structure analysis of urban network fire-rescue units. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2023, (4), 171–183. Refrieved from: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.4.12> (in Eng.)

15. Yu D., Wang Z., Yue C., Wang J. Spatial modeling of brine level and salinity in the Qarhan Salt Lake using GIS and automated machine learning algorithms. *Journal of Hydrology: Regional Studies*,

2025, 58, 102195. Retrieved from: doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102195 (in Eng.)

16. Setiawan E., Kusuma J. V., Sulistyawan G. A., Astuti S. P. Optimising household solid waste collection facility in autonomous regions of developing countries: A case study on Karanganyar Regency, Indonesia. *Forum Geografi*, 2024, 38(3), 317–328. Retrieved from: doi.org/10.23917/forgeo.v38i3.4313 (in Eng.)

17. Volakakis V., Mahmassani H. S. Vertiport infrastructure location optimization for equitable access to urban air mobility. *Infrastructures*, 2024, 9(12), 239. Retrieved from: doi.org/10.3390/infrastructures9120239 (in Eng.)

18. Mohamed A. G., Alqahtani F. K., Ismail E. R., Nabawy M. Synergizing GIS and genetic algorithms to enhance road management and fund allocation with a comprehensive case study approach. *Scientific Reports*, 2025, 15(1), 4634. Retrieved from: https://doi.org/10.1038/s41598-025-88760-4 (in Eng.)

19. Belhadj C., Riahi R., Sebei A., Sifi S., Rebai N. Advanced groundwater potential and contamination vulnerability assessment using integrated GIS-based AHP techniques: A case study from the Bizerte watershed, Tunisia. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2025, 26, 100597. Retrieved from: doi.org/10.1016/j.indic.2025.100597 (in Eng.)

20. Al-Sabbagh T. A., Almuqataf M. M., Elsaed E. L., Elkadeem M. R., Kotb K. M. Advanced GIS and fuzzy logic integration for strategic fire station placement in Yanbu industrial city, Saudi Arabia. *GeoJournal*, 2025, 90(2), 59. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/s10708-025-11304-w (in Eng.)

21. OpenStreetMap. Retrieved from: https://www.openstreetmap.org/ (in Eng.)

22. Metodichni rekomendatsii dlia orhaniv mistsevoho samovriaduvannia shchodo orhanizatsii ta zabezpechennia pozhezhnoi bezpeky na terytorii obiednanykh terytorialnykh hromad. Kyiv, 2016. 32 s. Retrieved from: https://hromady.org/ (in Ukr.)

© А. М. Тригуба, Р. Т. Ратушний,
А. Р. Ратушний, Л. С. Коваль,
А. І. Івануса 2025.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 01.04.2025.

Прийнято до публікації 04.06.2025.