

УДК 519.816:004.021

А. Шинкаренко, Н. Богданова

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПОШУКУ НАЙКОРОТШОГО ШЛЯХУ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Анотація: У статті проаналізовано математичне забезпечення інформаційної системи, розробленої для пошуку найкоротшого шляху до об'єктів критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій. Фундаментом математичної моделі є інтеграція евклідового методу обчислення відстаней та методу аналізу ієрархій для багатокритеріального оцінювання об'єктів. Запропоновано методологію вибору найкращого шляху, беручи до уваги не тільки географічну близькість, а й параметри безпеки, доступності та рівня забезпечення. Наведено приклад реалізації моделі у веб-додатку.

Ключові слова: метод Сааті, аналіз ієрархій, евклідова відстань, маршрут, надзвичайна ситуація, карта укриттів, веб-застосунок, інформаційна система.

Вступ

У сучасному світі надзвичайні ситуації, що виникають через природні катастрофи, техногенні аварії чи військові конфлікти, вимагають від громадян швидкого і точного реагування. Одним з найважливіших аспектів в таких умовах є здатність швидко зорієнтуватися в просторі та знайти найближчий безпечний об'єкт, будь то сховище чи медичний заклад. Сучасні технології відкривають можливості для створення інформаційних систем, які автоматизують ці важливі процеси, полегшуючи прийняття критично важливих рішень.

Особливої важливості це питання набуває у контексті воєнного стану в Україні, де гостро постає необхідність в ефективній евакуації населення, доставці гуманітарних вантажів та оперативному реагуванні екстрених служб. За даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій, у період 2022–2024 років було зафіксовано понад дві тисячі випадків замінування територій, руйнування сотень доріг, мостів та інших об'єктів критичної інфраструктури [1]. Така ситуація значно ускладнює логістичні процеси та створює небезпечні умови для цивільного населення. У цих реаліях критично важливо враховувати змінні фактори, такі як заблоковані маршрути, зони активних бойових дій, пошкодження транспортної мережі та інші перешкоди, при плануванні шляхів евакуації або доставки допомоги.

Для розв'язання цієї проблеми розроблено веб-застосунок, який надає користувачам доступ до інтерактивної карти з позначеними об'єктами критичної

інфраструктури та дозволяє автоматично визначити найраціональніший маршрут до найближчого об'єкта. Система побудована на основі комбінованого математичного підходу. Первинно застосовується евклідова метрика, яка забезпечує швидкий пошук шляхів, а потім впроваджується метод Сааті, що дозволяє зробити остаточний вибір з урахуванням кількох важливих критеріїв, забезпечуючи максимальну безпеку та оптимізацію маршруту.

Матеріали та методи

У процесі розробки інформаційної системи для пошуку найкоротшого маршруту в умовах надзвичайних ситуацій було застосовано інтеграцію математичних методів, передових веб-технологій і просторового аналізу. Метою дослідження стало формалізування задачі знаходження оптимального шляху до об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням багатьох чинників, які впливають на безпеку та доступність переміщення в екстрених умовах. Математична основа системи передбачає дворівневий підхід до прийняття рішень.

На першому етапі проводиться евристична оцінка, що полягає у визначенні відстаней до всіх об'єктів, укриттів і медичних закладів, із використанням евклідової метрики за формулою:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2},$$

де x_u, y_u — координати користувача; x_i, y_i — координати об'єкта i .

Такий метод дозволяє оперативно ранжувати об'єкти за критерієм географічної віддаленості.

Другим етапом розробки стає багатокритеріальний вибір, здійснюваний за допомогою методу аналізу ієрархій або метод Сааті [2], який дозволяє проводити структурований підхід до прийняття рішень шляхом ідентифікації пріоритетів. Для даної роботи виділені наступні критерії: час, безпека, відстань, кількість укриттів поблизу, кількість обмежень на маршруті, кількість лікарень поблизу.

Першим кроком для методу Сааті є побудова ієрархічної структури задачі. Цей процес включає порівняння альтернатив за критеріями, оцінку їхніх переваг, а також узагальнення отриманих результатів у вигляді чітко визначених глобальних пріоритетів.

На останньому етапі потрібно обрати найкращу альтернативу, спираючись на глобальні пріоритети.

Якщо існує альтернатива, яка суттєво перевершує інші за значенням глобального пріоритету, саме вона вважається найкращим вибором.

У випадку, коли жодна альтернатива не має явно домінуючого глобального пріоритету, рішення приймається серед варіантів із найвищими значеннями глобальних пріоритетів, враховуючи прихильності та суб'єктивні уподобання особи, що приймає рішення.

Ілюстративний приклад

У межах даної системи ієрархія має три рівні:

Ієрархія складається з трьох основних рівнів, як показано на рис. 1:

- Мета — визначення оптимального маршруту.
- Критерії — наведені вище.
- Альтернативи — варіанти маршрутів М1–М5.



Рисунок 1. Ієрархічна структура вибору найкращого маршруту

МПП критеріїв та альтернатив відносно кожного із критеріїв наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Попарне порівняння критеріїв

	Час	Безпека	Відстань	Кількість укриттів	Кількість лікарень	Обмеження на шляху
Час	1	5	7	6	4	8
Безпека	1/5	1	2	2	1/2	4
Відстань	1/7	1/2	1	1/2	1/2	1/3
Кількість укриттів	1/6	1/2	2	1	1/2	1/7
Кількість лікарень	1/4	2	2	2	1	3
Обмеження на шляху	1/8	1/4	3	7	1/3	1

Обчислимо вагові коефіцієнти методом середніх геометричних за правилом:

$$v_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k d_{ij}},$$

де i - рядок, j - стовбець, k - кількість альтернатив.

Тоді маємо наступні результати:

$$v_1 = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k a_{1j}} = \sqrt[6]{\prod_{j=1}^6 a_{1j}} = \sqrt[6]{1 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 8} = \sqrt[6]{6720} = 4,34405$$

$$v_2 = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k a_{ij}} = \sqrt[6]{\prod_{j=1}^6 a_{2j}} = \sqrt[6]{0,2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 4} = \sqrt[6]{1,6} = 1,08148$$

$$v_3 = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k a_{ij}} = \sqrt[6]{\prod_{j=1}^6 a_{3j}} = \\ = \sqrt[6]{0,1429 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,33} = \sqrt[6]{1/168} = 0,425711$$

$$v_4 = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k a_{ij}} = \sqrt[6]{\prod_{j=1}^6 a_{4j}} = \\ = \sqrt[6]{0,1667 \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,1429} = \sqrt[6]{1/84} = 0,477845$$

$$v_5 = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k a_{ij}} = \sqrt[6]{\prod_{j=1}^6 a_{5j}} = \sqrt[6]{0,25 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3} = \sqrt[6]{6} = 1,34801$$

$$v_6 = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k a_{ij}} = \sqrt[6]{\prod_{j=1}^6 a_{6j}} = \sqrt[6]{0,125 \cdot 0,25 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 0,33 \cdot 1} = \sqrt[6]{7/32} = 0,776232$$

Знайдемо суму усіх рядків:

$$\sum_{j=1}^6 v_j = 4,34405 + 1,08148 + 0,425711 + \\ + 0,477845 + 1,34801 + 0,776232 = 8,453328$$

Здійснимо нормування, кожне середньгеометричне по рядку поділимо на суму усіх рядків за формулою:

$$\omega_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^k v_j}$$

Отримаємо результати:

$$\omega_1 = \frac{v_1}{\sum_{j=1}^k v_j} = \frac{v_1}{\sum_{j=1}^6 v_j} = \frac{4,34405}{8,453328} = 0,513886$$

$$\omega_2 = \frac{v_2}{\sum_{j=1}^k v_j} = \frac{v_2}{\sum_{j=1}^6 v_j} = \frac{1,08148}{8,453328} = 0,127935$$

$$\omega_3 = \frac{v_3}{\sum_{j=1}^k v_j} = \frac{v_3}{\sum_{j=1}^6 v_j} = \frac{0,425711}{8,453328} = 0,0503602$$

$$\omega_4 = \frac{v_4}{\sum_{j=1}^k v_j} = \frac{v_4}{\sum_{j=1}^6 v_j} = \frac{0,477845}{8,453328} = 0,0565274$$

$$\omega_5 = \frac{v_5}{\sum_{j=1}^k v_j} = \frac{v_5}{\sum_{j=1}^6 v_j} = \frac{1,34801}{8,453328} = 0,159465$$

$$\omega_6 = \frac{v_6}{\sum_{j=1}^k v_j} = \frac{v_6}{\sum_{j=1}^6 v_j} = \frac{0,776232}{8,453328} = 0,0918256$$

Одержали вектор відносних ваг : [0,514; 0,128; 0,05; 0,057; 0,16; 0,092].

Отже, критерій “Час” має найбільший вплив (51,4%), а критерій “Кількість укриттів” має найменший вплив (5%).

Обчислимо максимальне характеристичне число $\lambda_{\max}$ (власне значення матриці), обчислюється для довільного рядка і матриці парних порівнянь за формулою:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n a_{ij} (\omega_j / \omega_i).$$

$$\lambda_{\max} = 1 \cdot \left(\frac{4,34405}{8,453328} \right) + 5 \cdot \left(\frac{1,08148}{8,453328} \right) + 7 \cdot \left(\frac{0,425711}{8,453328} \right) + 6 \cdot \left(\frac{0,477845}{8,453328} \right) + 4 \cdot \left(\frac{1,34801}{8,453328} \right) + 8 \cdot \left(\frac{0,776232}{8,453328} \right) = 7,0147 > k$$

Обчислимо значення індексу узгодження:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - k}{k - 1} = \frac{7,0147 - 6}{6 - 1} = 0,2029$$

Відношення узгодженості визначається співвідношенням:

$$CR = \frac{CI}{CIS},$$

де CIS – середнє значення CR , обчислених для великої кількості випадковим чином згенерованих матриць парних порівнянь в фундаментальній шкалі.

$$CR = \frac{0,2029}{1,25} = 0,1623$$

Таблиця 2.

Попарне порівняння альтернатив по кожному із критеріїв

Час	M1	M2	M3	M4	M5
M1	1	5	2	6	4
M2	1/5	1	1/3	2	5
M3	1/2	3	1	1/7	1/4
M4	1/6	1/2	7	1	1/2
M5	1/4	1/5	4	2	1
$\lambda_{\max}=7,5824$; $CI=0,6456$; $CR=0,5816$					
Відстань	M1	M2	M3	M4	M5
M1	1	2	7	4	5
M2	1/2	1	3	2	4
M3	1/7	1/3	1	1/2	1/5
M4	1/4	1/2	2	1	1/9
M5	1/5	1/4	5	9	1
$\lambda_{\max}=5,9783$; $CI=0,2446$; $CR=0,2203$					
Кількість лікарень	M1	M2	M3	M4	M5
M1	1	4	5	7	1/2
M2	1/4	1	1/4	1/5	1/8
M3	1/5	4	1	3	6
M4	1/7	5	1/3	1	1/3
M5	2	8	1/6	3	1
$\lambda_{\max}=6,5409$; $CI=0,3852$; $CR=0,3471$					
Безпека	M1	M2	M3	M4	M5
M1	1	4	5	2	2
M2	1/4	1	1/3	2	1/2
M3	1/5	3	1	4	5
M4	1/2	1/2	1/6	1	7
M5	1/2	2	1/5	1/7	1
$\lambda_{\max}=6,2525$; $CI=0,3131$; $CR=0,2821$					
Кількість укриттів	M1	M2	M3	M4	M5
M1	1	3	5	8	2
M2	1/3	1	1/2	1/4	1/8
M3	1/5	2	1	4	7
M4	1/8	4	1/4	1	5
M5	1/2	8	1/7	1/5	1
$\lambda_{\max}=7,2253$; $CI=0,5563$; $CR=0,5012$					
Обмеження на шляху	M1	M2	M3	M4	M5
M1	1	2	8	7	7
M2	1/2	1	2	4	5
M3	1/8	1/2	1	1/6	3
M4	1/7	1/4	6	1	3
M5	1/7	1/5	1/3	1/3	1
$\lambda_{\max}=5,8246$; $CI=0,2062$; $CR=0,1857$					

Для кожної МПП альтернатив визначені локальні пріоритети за окремими критеріями, що відображені в табл. 3.

Таблиця 3.

Локальні пріоритети альтернатив за критеріями

	Час	Безпека	Відстань	Кількість укриттів	Кількість лікарень	Обмеження на шляху
M1	0,40244366	0,35998958	0,42508628	0,44422644	0,4137038	0,46572344
M2	0,1751187	0,143216	0,25928171	0,05176611	0,03624425	0,3095898
M3	0,11927366	0,10813188	0,04465263	0,24897938	0,09634834	0,05494898
M4	0,16112228	0,28791379	0,06981666	0,14253301	0,22134338	0,12231114
M5	0,14204169	0,10074875	0,20116272	0,11249506	0,23236023	0,04742664

Обчислимо глобальні ваги для кожного маршруту:

$$M1: 0,514 \cdot 0,40244366 + 0,128 \cdot 0,35998958 + 0,05 \cdot 0,42508628 + 0,056 \cdot 0,44422644 + 0,16 \cdot 0,4137038 + 0,092 \cdot 0,46572344 = 0,40812071;$$

$$M2: 0,514 \cdot 0,1751187 + 0,128 \cdot 0,143216 + 0,050 \cdot 0,25928171 + 0,056 \cdot 0,05176611 + 0,160 \cdot 0,03624425 + 0,092 \cdot 0,3095898 = 0,3095898;$$

$$M3: 0,514 \cdot 0,11927366 + 0,128 \cdot 0,10813188 + 0,050 \cdot 0,04465263 + 0,056 \cdot 0,09634834 + 0,160 \cdot 0,09634834 + 0,092 \cdot 0,05494898 = 0,1118598;$$

$$M4: 0,514 \cdot 0,16112228 + 0,128 \cdot 0,28791379 + 0,050 \cdot 0,06981666 + 0,056 \cdot 0,14253301 + 0,160 \cdot 0,22134338 + 0,092 \cdot 0,12231114 = 0,17773377;$$

$$M5: 0,514 \cdot 0,14204169 + 0,128 \cdot 0,10074875 + 0,050 \cdot 0,20116272 + 0,056 \cdot 0,11249506 + 0,160 \cdot 0,23236023 + 0,092 \cdot 0,04742664 = 0,14378052.$$

Таким чином, проведений аналіз показав, що серед критеріїв найбільшу важливість має час (вага 0,514), що свідчить про високу пріоритетність швидкості маршруту при ухваленні рішення щодо евакуації. тоді як відстань — 0,05 та кількість укриттів — 0,056 мають найменший вплив на процес прийняття рішення.

Застосування вагових коефіцієнтів до локальних пріоритетів альтернатив дозволило визначити глобальні оцінки ефективності кожного маршруту. У результаті агрегування з'ясовано, що маршрут M1 отримав найвищу інтегральну оцінку (0,4081), суттєво перевершивши інші альтернативи. Це вказує на його перевагу з урахуванням усіх зазначених факторів, особливо часу, безпеки та доступності лікарень.

Опис варіанті використання системи

Розроблена інформаційна система орієнтована на надання користувачам інструментів для швидкої орієнтації у просторі в умовах надзвичайних ситуацій, а також на забезпечення адміністраторів можливостями для керування критично важливою інфраструктурною інформацією.

Таблиця 4.

Актори та цілі веб-застосунку

Актори	Цілі
Адміністратор	Особи, які відповідають за наповнення та актуалізацію бази даних: додають нові укриття й лікарні, редагують інформацію, додають зображення та контролюють геоординати, опис та доступність об'єктів.
Користувач	Особа, яка в критичній ситуації шукає найближчий безпечний об'єкт для укриття або медичної допомоги, а також переглядає актуальну інформацію про об'єкти. Вона взаємодіє із мапою, обирає об'єкти та користується маршрутами.

Для демонстрації функціональних можливостей системи була створена use-case діаграма варіантів використання (рис. 2), яка відображає ключові сценарії взаємодії між користувачем та адміністратором з інформаційною системою.

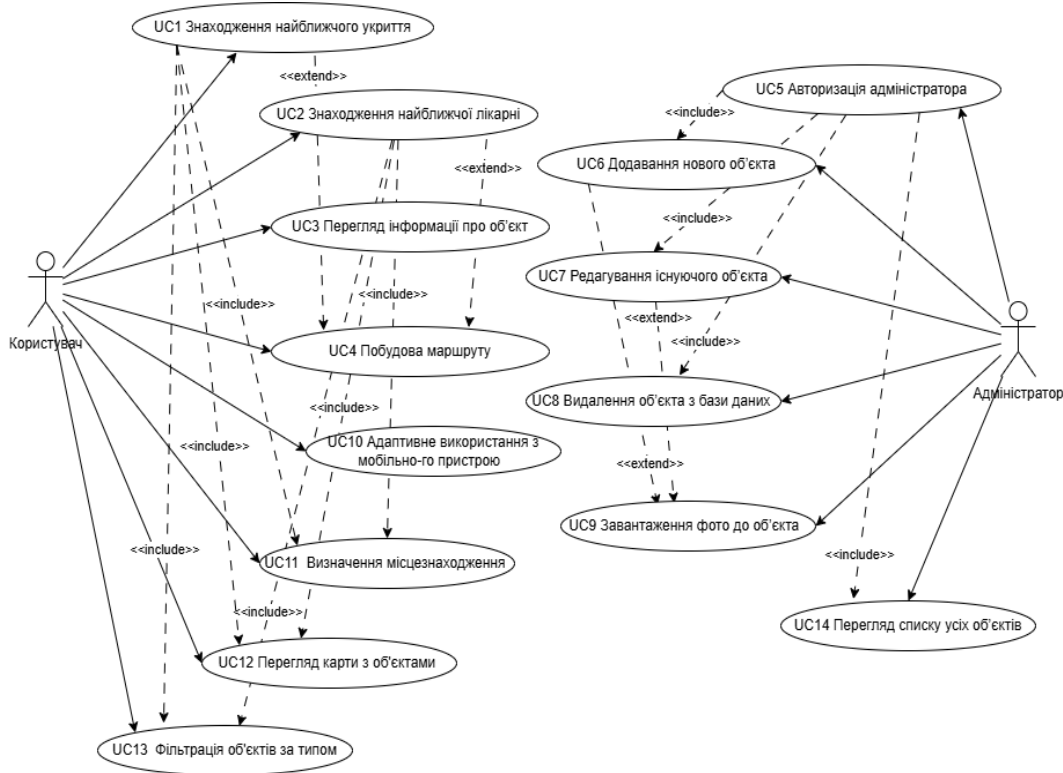


Рисунок 2. Use-case діаграма для користувача та адміністратора

Користувачу надано доступ до таких функцій, як перегляд мапи, фільтрація об'єктів, пошук маршрутів і перегляд детальної інформації щодо укриттів або медичних закладів. Адміністратор має можливість керувати об'єктами через панель управління, виконуючи такі дії, як додавання, редагування, видалення даних і налаштування зручностей. Дана діаграма чітко відображає розподіл ролей і доступ до функціоналу системи.

Інтеграція системи у сьогодення

Зважаючи на складну безпекову ситуацію в Україні, викликану повномасштабною війною, частота надзвичайних ситуацій природного, техногенного чи воєнного характеру постійно зростає. У таких умовах перед державними установами, волонтерами, громадськими організаціями та бізнесом постає важливе завдання – забезпечити громадян ефективними засобами оперативного реагування, особливо за допомогою сучасних технологій. Одним із перспективних рішень може стати створення інформаційної системи, яка дозволяє швидко знаходити найкоротші маршрути до укриттів, медичних установ або точок роздачі гуманітарної допомоги, формуючи таким чином повноцінний стартап-застосунок.

Цей стартап-проект спрямований на створення та запуск інноваційної веб і мобільної платформи, яка стане незамінним помічником для користувачів у пошуку найближчих безпечних локацій, адаптованих до їхніх поточних потреб і обставин. Застосунок покликаний забезпечити зручний, швидкий і комплексний доступ до важливої інформації. Його основні функції передбачають врахування кількох ключових критеріїв:

- по-перше, визначення геолокації користувача за допомогою технології GPS, що дозволить автоматично знаходити місця в безпосередній близькості від нього;
- по-друге, вибір типу шуканого об'єкта, серед яких можуть бути укриття для захисту в екстрених ситуаціях, лікарні для отримання медичної допомоги, або центри підтримки, де надають гуманітарну чи психологічну допомогу;
- по-третє, аналіз рівня безпеки району, який базується на актуальних даних про загрози чи небезпеки в конкретному місці;
- по-четверте, оцінка доступності об'єкта з урахуванням таких факторів, як його зручність, наявність необхідної інфраструктури, рівень заповненості людьми у конкретний момент часу та вплив добового режиму (день чи ніч);
- по-п'яте, персоналізація пошуку відповідно до специфічних потреб користувача, таких як наявність доступу для осіб з інвалідністю, особливі умови для дітей або інші індивідуальні запити. Таким чином, цей застосунок пропонує багатовимірний підхід, що забезпечує не тільки оперативність, але й високу ступінь адаптивності до унікальних обставин кожного користувача. Його функціонал сприятиме не лише підвищенню особистої безпеки людей у критичних ситуаціях, але й створенню відчуття впевненості та підтримки, що є особливо важливим у будь-яких складних умовах.

Висновки

У статті розглянуто концепцію створення інформаційної системи для визначення оптимального маршруту до об'єктів критичної інфраструктури, таких як укриття та медичні заклади, що є особливо актуальним в умовах надзвичайних ситуацій. Після проведеного аналізу предметної області було виявлено, що однією з ключових проблем є забезпечення оперативного та максимально безпечного доступу користувачів до необхідних об'єктів, причому особлива увага приділяється врахуванню широкого спектра просторових, якісних і зовнішніх факторів.

Технічна реалізація математичного забезпечення системи базується на інтеграції двох методів: евклідового підходу, який використовується для початкового відбору об'єктів з мінімальною відстанню до користувача, та методу аналізу ієрархій Сааті (АНР), що забезпечує більш детальну багатокритеріальну оцінку доступних маршрутів. Завдяки цьому рішенню враховуються не лише чинники географічної відстані, але й такі критерії, як рівень безпеки на маршруті, доступність об'єктів для різних категорій користувачів, ступінь їх облаштованості, забезпеченість базовими зручностями тощо.

Гнучкість та адаптивність запропонованої моделі дозволяє не лише легко масштабувати її функціонал, але й інтегрувати з актуальними даними і сучасними інформаційними джерелами під час кризових ситуацій.

Окремо було проаналізовано можливість реалізації даної системи у форматі стартапу з соціальною складовою. Така система може стати невід'ємною частиною міської цифрової інфраструктури безпеки, дозволяючи посилити координацію в умовах надзвичайних ситуацій.

Передбачена інтеграція з сервісами оповіщення, відкритими даними державних реєстрів і платформами для мобільних пристроїв створює потенціал для широкої практичної реалізації.

Напрямки подальших досліджень охоплюють кілька перспективних напрямів. Зокрема, планується удосконалити процедуру налаштування вагових коефіцієнтів у моделі аналізу ієрархій Сааті на основі реальних сценаріїв використання та врахування відгуків кінцевих користувачів; реалізувати функціонал динамічного побудови маршрутів для автоматичної адаптації шляху відповідно до поточних умов, наприклад, наявність блокувань, дорожньо-транспортні інциденти, бойові дії; розробити мобільний застосунок із можливістю інтеграції з популярними картографічними API, такими як Google Maps або Mapbox, для розширення функціональних можливостей системи.

Таким чином, запропонована інформаційна система демонструє значну прикладну цінність і може бути не лише масштабована до різних адміністративних рівнів, але й стати важливим елементом цифрової трансформації у сфері управління надзвичайними ситуаціями в Україні. Її впровадження сприятиме посиленню загальної рівня безпеки населення завдяки швидкому доступу до критичних ресурсів та покращенню ефективності реагування у кризових моментах.

Список використаних джерел

1. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Інформація щодо реагування на надзвичайні ситуації, розмінування та евакуації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dsns.gov.ua>
2. Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw Hill, 1980.