УДК 528.9

ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ В УМОВАХ НАВІГАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Канд. техн. наук Є. М. Коростельов, канд. пед. наук Л. М. Коваленко

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR OPTIMAL ROUTE DETERMINATION UNDER NAVIGATION LIMITATIONS

PhD (Tech.) Ye. Korostelov, PhD (Ped.) L. Kovalenko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336637

Анотація. *У статті висвітлено методологічні та практичні засади побудови автономної геоінформаційної системи для визначення оптимальних маршрутів пересування в умовах урбанізованої території за відсутності або обмеженого доступу до сучасних навігаційних сервісів. Дослідження спрямовано на підвищення рівня безпеки та мобільності населення в надзвичайних ситуаціях (зокрема під час повітряних тривог, аварійних чи воєнних обставин), коли стає неможливим використання онлайн-картографічних платформ чи GPS-навігації. Запропоновано алгоритм формування структурованої бази геоданих із використанням відкритих джерел і муніципальних реєстрів, обґрунтовано вибір основних тематичних шарів (дорожня мережа, укриття, зупинки громадського транспорту, об'єкти критичної інфраструктури). Наведено детальний опис технологічного процесу побудови маршрутів у середовищі QGIS із урахуванням просторової доступності укриттів, фактичного стану транспортної інфраструктури, альтернативних шляхів евакуації та*

особливостей пішохідного і транспортного сполучення. Особливу увагу приділено порівнянню міжнародного досвіду щодо впровадження автономних ГІС у кризових ситуаціях, аналізу актуальних обмежень, викликів впровадження та перспектив подальшого розвитку системи у вітчизняній практиці. Результати роботи можуть бути використані органами місцевого самоврядування, екстреними службами, волонтерськими організаціями для підвищення рівня готовності міського середовища до надзвичайних ситуацій і забезпечення оперативної навігаційної підтримки населення.

Ключові слова: *геоінформаційна система, оптимальний маршрут, укриття, навігація, QGIS, транспортна інфраструктура, безпека, урбанізована територія, кризові ситуації.*

Abstract. *The article explores both theoretical and applied aspects of developing an autonomous geographic information system (GIS) for determining optimal routes in urban environments, particularly under conditions of restricted or absent navigation services. In the context of modern challenges facing Ukrainian cities–such as military threats, air raid alerts, infrastructure disruptions, or technological failures–the ability to generate safe and effective routes for urban mobility becomes critical for protecting civilians and supporting the work of emergency responders. The research presents a methodology for building a structured geospatial database that integrates data from open sources and municipal registries, including layers for road networks, civil protection shelters, public transport stops, and objects of critical infrastructure. Special attention is devoted to the selection and verification of spatial data, ensuring its relevance and completeness under dynamic crisis conditions.*

The technological workflow is described in detail, with a focus on practical implementation in the QGIS environment. This includes data import and harmonization, spatial analysis for shelter accessibility, road network assessment, creation of buffer zones, and the design of offline route-finding algorithms that prioritize both distance minimization and safety. Scenarios for user interaction are presented, ranging from individual city residents to local authorities and volunteer groups. A comparative analysis is conducted with international approaches to autonomous GIS deployment in crisis management, highlighting best practices in data updating, user communication, and multi-format delivery (digital, print, mobile).

Key limitations, such as data incompleteness, the necessity for regular updates, digital literacy barriers, and information security risks, are critically examined. The results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed system for increasing urban resilience, enabling timely evacuation, and improving the preparedness of local communities. The article concludes with recommendations for integrating such solutions into the broader emergency response framework of Ukrainian cities and suggests directions for further research, including the development of mobile applications and integration with official alert systems. This work may serve as a methodological reference for municipalities, rescue services, and researchers working on urban safety and crisis GIS applications.

Keywords: *geographic information system, urban safety, optimal routing, civil protection shelters, offline navigation, QGIS, crisis management, spatial analysis, emergency preparedness.*

Вступ. В умовах ескалації воєнних загроз, терористичних атак і зростання кількості надзвичайних ситуацій питання безпеки міського простору набувають особливої актуальності. Забезпечення своєчасної та безпечної мобільності мешканців великих міст – критично важливе завдання для органів місцевого самоврядування, служб цивільного захисту і фахівців у галузі геодезії та просторового планування. Досвід останніх років в Україні, зокрема події у Харкові та інших містах, переконливо продемонстрував таке: за умов повітряних тривог, масових обстрілів,

руйнування інфраструктури або тотальних перебоїв зв'язку можливість отримати актуальну інформацію про безпечні шляхи переміщення стає питанням не лише комфорту, а й виживання населення [1].

Особливо гострою ця проблема постає для маломобільних категорій громадян – людей похилого віку, осіб з інвалідністю, сімей із дітьми, а також персоналу екстрених служб і волонтерів, які забезпечують оперативну допомогу в зоні ризику. Втрата доступу до онлайн-навігації, GPS і мобільного інтернету суттєво обмежує можливості самостійного планування маршрутів до укриттів, пунктів евакуації або медичних установ. Це створює додаткові загрози в динамічних кризових умовах, коли кожна хвилина має значення.

На сучасному етапі розвитку геоінформаційних технологій особливе значення мають автономні рішення, здатні працювати офлайн, базовані на актуальних просторових даних і максимально доступні для широкого кола користувачів [2]. Впровадження таких систем у практику дає змогу:

- підвищити рівень захищеності міського населення;
- мінімізувати ризики під час переміщення в надзвичайних ситуаціях;
- забезпечити оперативний доступ до перевіреної картографічної інформації незалежно від стану комунікаційної інфраструктури;
- оптимізувати маршрути евакуації з урахуванням наявних укриттів, стану дорожньої мережі і транспортної доступності [3].

У цій статті подано комплексний підхід для розроблення та впровадження автономної геоінформаційної системи для міського середовища. Запропоновано детальний алгоритм її створення, принципи побудови бази просторових даних, механізми адаптивної маршрутизації та приклади практичного використання для потреб населення, органів влади і рятувальних служб. Окрему увагу приділено аналізу міжнародного досвіду, оцінюванню наявних обмежень і перспектив подальшого розвитку таких систем у вітчизняній практиці просторового планування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку просторових технологій особливо важливими є питання застосування геоінформаційних систем для підвищення ефективності управління міським середовищем в умовах надзвичайних ситуацій. Світова наукова спільнота накопичила значний досвід впровадження ГІС для навігації, аналізу доступності та оптимізації транспортних потоків у кризових умовах. Так, у роботі Lu D. [1] автор наголошує на важливості інтеграції просторово-часових моделей для підтримки ухвалення рішень у містах із високою динамікою подій. Дослідження Saraf M. H. M. [2] і Yalpir S. [3] підтверджують ефективність використання ГІС для планування евакуації, оптимізації маршрутів громадського транспорту, урахування реальних інфраструктурних обмежень, стану дорожнього покриття і розміщення основних об'єктів інфраструктури.

Особливе місце займають праці, присвячені кризовому управлінню, у яких проаналізовано застосування ГІС для побудови альтернативних маршрутів у разі стихійних лих, масових техногенних аварій чи бойових дій. Наприклад, у роботах Ayedun C. A. [5] і Taha M. M. [6] розглянуто алгоритми маршрутизації з урахуванням доступності укриттів, часових вікон евакуації, транспортних коридорів і потенційних зон ризику.

Вітчизняний науковий доробок у цьому напрямі, на жаль, ще не набув належного рівня системності. Більшість досліджень зосереджені на кадастрових, земельно-ресурсних чи екологічних аспектах геоінформаційних технологій (Губар Ю. [7], Лященко А. [8], Воронова В. [9]), тоді як проблематика автономної

навігації, адаптивного маршрутизування та убезпечення пересування у великих містах України в умовах обмеженої роботи навігаційних сервісів вивчена недостатньо. Слід також зазначити поодинокі проєкти, що спрямовані на створення цифрових карт укриттів і поширення інструкцій для населення (Степаненко П. [10]), але їх застосування переважно має фрагментарний характер і не інтегровано в цілісні ГІС-системи для кризового реагування.

Отже, актуальність тематики зумовлена не лише сучасними викликами воєнного часу, а і відсутністю комплексних досліджень, які поєднують просторове моделювання, аналіз інфраструктурних обмежень і практичну реалізацію автономних навігаційних рішень для міського середовища. Саме заповнення цієї наукової прогалини і становить основну мету цієї статті, яка покликана запропонувати новий інноваційний підхід щодо побудови безпечних маршрутів у кризових ситуаціях для великих міст України.

Визначення мети та завдання дослідження. Головною метою дослідження є розроблення і впровадження автономної геоінформаційної системи, призначеної для побудови оптимальних маршрутів у межах міста Харкова з урахуванням наявних навігаційних обмежень, структури транспортної мережі, розташування захисних споруд (укриттів) і актуального стану міської інфраструктури. Такий підхід покликаний не лише забезпечити безпечне та оперативне пересування містом у кризових ситуаціях, а й надати ефективний інструмент для планування дій як пересічним мешканцям, так і оперативним службам чи волонтерським організаціям.

Для досягнення поставленої мети в рамках дослідження визначено такі основні завдання:

- здійснити комплексний збір, систематизацію та аналіз геопросторових даних щодо дорожньої мережі, розташування укриттів, транспортних зупинок і основних об'єктів міської інфраструктури Харкова [13];
- сформувати повноцінну базу просторових даних у середовищі QGIS із використанням відкритих джерел інформації (зокрема OpenStreetMap [11], офіційних муніципальних реєстрів і відомчих порталів);
- розробити і апробувати алгоритм побудови маршрутів, який дає змогу функціонувати в автономному режимі (офлайн), забезпечує гнучке врахування безпекових критеріїв і оперативно адаптується до змін ситуації на місцевості;
- візуалізувати результати просторового аналізу шляхом створення наочних картографічних матеріалів, інструктивних схем і цифрових додатків для різних категорій користувачів (мешканців, рятувальників, служб підтримки);
- експертно оцінити потенціал та перспективи практичного використання розробленої системи в типових сценаріях надзвичайних ситуацій різного характеру – від повітряних тривог і масових евакуацій до локальних інцидентів на транспортній інфраструктурі.

Реалізація цих завдань має сприяти підвищенню готовності міського середовища до викликів надзвичайного стану та забезпечити стійкість функціонування критично важливих об'єктів інфраструктури у Харкові.

Методика дослідження. Методологічною основою дослідження стало використання сучасного програмного забезпечення з відкритим кодом – QGIS, яке забезпечує широкий функціонал для створення, обробки, візуалізації та аналізу просторових даних у міському середовищі. Для формування вихідної інформаційної бази були використані як загальнодоступні просторові дані з міжнародної платформи OpenStreetMap, так і офіційні відкриті ресурси Харківської міської ради та Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), що дало змогу

максимально деталізувати структуру транспортної мережі та розташування об'єктів критичної інфраструктури [12-14].

Основні етапи дослідження включали таке.

Формування багатошарової бази геоданих, яка охоплює дорожню мережу міста, локалізацію всіх доступних укриттів, зупинки громадського транспорту, адміністративні межі районів та основні соціально важливі об'єкти.

Імпорт і попередня обробка даних у середовищі QGIS, виконання топологічного контролю для виявлення помилок у просторових зв'язках між об'єктами, створення та наповнення атрибутивних таблиць, що містять характеристики кожного елемента інфраструктури.

Побудова буферних зон (Buffer) навколо укриттів та інших важливих точок для оцінювання зони їх досяжності в пішохідному або транспортному режимі, що дає змогу визначити «білі плями» на мапі доступності.

Геокодування та верифікація координат за допомогою сервісу Nominatim і ручної перевірки точності для критично важливих об'єктів (у тому числі через співставлення з муніципальними реєстрами та польовими даними) [15].

Використання плагіна RoadGraph для побудови маршрутів у режимі офлайн із можливістю налаштування критеріїв оптимальності – мінімізація довжини шляху, максимальна кількість доступних укриттів на маршруті, доступність громадського транспорту на шляху евакуації [16].

Комплексне оцінювання оптимальності та безпеки запропонованих маршрутів із застосуванням просторового аналізу, включаючи врахування щільності забудови, транспортних вузлів і наявність альтернативних шляхів.

Візуалізація отриманих результатів у вигляді інтерактивних картографічних схем, інструктивних матеріалів для мешканців і друкованих карт для служб порятунку, а також створення рекомендацій щодо розміщення маршрутних схем у громадських місцях.

Завдяки такому підходу було забезпечено комплексність, достовірність і актуальність моделі міського простору для вирішення завдань навігації та безпечної евакуації населення в надзвичайних ситуаціях.

Виклад основного матеріалу дослідження. Створення повноцінної, надійної та актуальної бази геоданих є основним етапом у розробленні будь-якої геоінформаційної системи, орієнтованої на завдання кризового планування та навігації. Для забезпечення комплексного відображення міського простору було зібрано і систематизовано просторову інформацію з кількох незалежних джерел, що підвищило надійність і точність кінцевого продукту.

Перш за все визначено основні тематичні шари, які мають безпосередній вплив на мобільність мешканців у надзвичайних умовах (табл. 1).

Дорожня мережа міста – базовий лінійний шар, який містить інформацію про всі вулиці, провулки, пішохідні зони і транспортні артерії. Атрибутивний склад включає назву, категорію, тип покриття, стан проїзної частини, довжину та призначення (основна магістраль, другорядна, внутрішньодворова тощо).

Пункти укриттів і захисних споруд – точковий шар, що містить дані про місцезнаходження об'єктів цивільного захисту різних типів (підвали, сховища, підземні переходи), їхню місткість, рівень облаштування, стан доступності та режим роботи. Джерела: ДСНС, офіційні муніципальні ресурси.

Зупинки громадського транспорту – точковий шар з інформацією про розташування, назву, тип (автобусна, трамвайна, тролейбусна), наявність накриття, доступність для маломобільних груп.

Основні об’єкти критичної інфраструктури – комбінований шар (точки/полігони), що охоплює лікарні, школи, дитячі садки, адміністративні будівлі, пожежні частини, пункти поліції тощо.

Адміністративні межі та райони – полігональні шари, які допомагають орієнтуватися в межах міста і спрощують зональний аналіз.

Дані збирали поетапно.

Імпорт основної транспортної мережі та інфраструктурних об’єктів з OpenStreetMap з подальшою перевіркою їхньої актуальності за допомогою локальних відкритих ресурсів та офіційних сайтів міської ради.

Завантаження і оновлення даних про укриття із загальнодоступних реєстрів та інтеграція їх у загальний проєкт QGIS із подальшим геокодуванням і ручною верифікацією місцезнаходження.

Створення атрибутивних таблиць із максимальною деталізацією: до кожного об’єкта додавали не лише просторові координати, а і додаткові характеристики, що мають значення для ухвалення рішень у кризових умовах (наприклад час роботи укриття, кількість входів, наявність засобів комунікації тощо).

Формування буферних зон навколо укриттів і основних об’єктів із заданим радіусом для аналізу досяжності в пішохідному і транспортному режимах.

Для зручності користувачів усі шари містили чіткі ідентифікатори, атрибути для фільтрації та сортування, а також були інтегровані в загальний просторовий проєкт QGIS із можливістю швидкої актуалізації даних у разі появи нової інформації. Особливу увагу приділяли коректності топології: очищення від дубльованих об’єктів, злиття суміжних ліній, перевірка замкненості полігонів.

Отже, база геоданих дає змогу проводити складний просторовий аналіз і забезпечує основу для побудови адаптивних маршрутів з урахуванням різних сценаріїв надзвичайних ситуацій.

Таблиця 1

Основні тематичні шари ГІС для автономної навігації

Номер з/п	Назва шару	Опис шару	Джерело/Примітка
1	Дорожня мережа	Вулиці, дороги, пішохідні зони, проїзди	OpenStreetMap, місцеві БД
2	Будівлі	Контури будівель і споруд	Державний земельний кадастр
3	Укриття	Об'єкти цивільного захисту, підземні укриття	ДСНС, місцева влада
4	Медичні заклади	Лікарні, аптеки, пункти невідкладної допомоги	Офіційні портали міст
5	Комунікації	Лінії електропередач, водопроводи, газопроводи	Міські служби
6	Громадський транспорт	Зупинки, маршрути транспорту	Міські транспортні БД
7	Рельєф	Висотні відмітки, ізолінії	Геопортал України
8	Межі районів	Адміністративні межі, квартали	Кадастрова карта

Вирішення завдання формування оптимального маршруту в умовах обмеженої навігаційної доступності потребує комплексного підходу щодо використання ГІС-інструментів, що дають змогу поєднати аналіз просторової структури міста із критеріями безпеки та доступності. З огляду на потенційні перебої з онлайн-сервісами, побудова маршруту здійснюється автономно, тобто без залучення зовнішніх серверів чи постійного підключення до інтернету.

На першому етапі користувач (мешканець, співробітник служби порятунку чи волонтер) попередньо завантажує необхідні картографічні шари – дорожню мережу, укриття, зупинки транспорту – у локальний проєкт QGIS. Такий підхід гарантує незалежність роботи системи навіть у разі повного зникнення зв'язку.

Далі діє послідовний алгоритм:

Задавання параметрів маршруту. Користувач у середовищі QGIS вибирає початкову та кінцеву точки переміщення (наприклад місце свого перебування і найближче рекомендоване укриття або пункт евакуації). Для цього передбачено ручне або автоматизоване введення координат, використання пошуку за адресою чи інтерактивний вибір на карті.

Налаштування критеріїв оптимізації. Окрім мінімізації довжини шляху, система дає змогу враховувати додаткові фактори: максимізацію кількості доступних укриттів уздовж маршруту, наявність зупинок громадського транспорту, мінімізацію проходження через зони підвищеної щільності забудови чи потенційної небезпеки. Можлива пріоритизація маршрутів, які проходять поруч із критичними об'єктами інфраструктури або мають кращу доступність для маломобільних груп населення.

Автоматизований розрахунок маршруту. За допомогою спеціалізованого плагіна RoadGraph у QGIS будують оптимальний маршрут за заданими критеріями, як показано на рисунку. Перевагою цього підходу є повна автономність: маршрутизацію виконують локально на комп'ютері чи мобільному пристрої користувача без необхідності онлайн-доступу до зовнішніх картографічних сервісів.

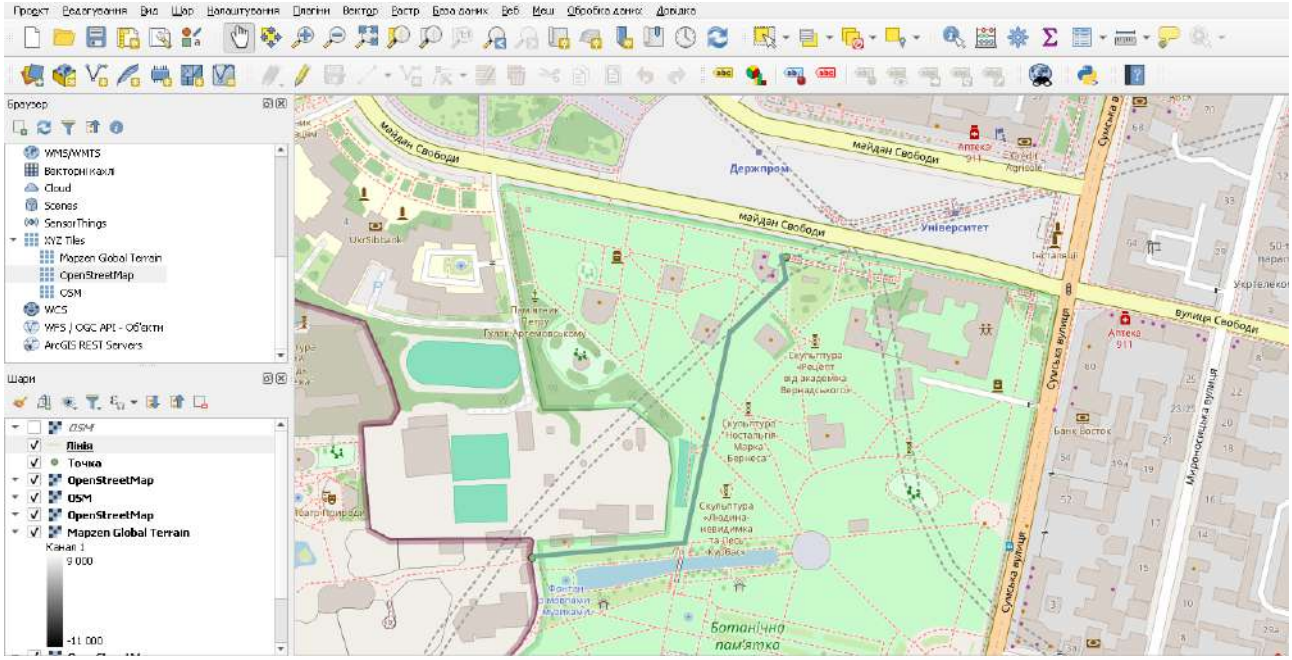

Рис. Приклад побудови маршруту до укриття в QGIS

Аналіз та експортування результату. Отриманий маршрут можна детально переглянути на карті, проаналізувати доступність укриттів, визначити альтернативні шляхи в разі блокування певних ділянок дорожньої мережі. Система дає змогу експортувати маршрут у форматах, придатних для друкування, передавання іншим користувачам або збереження на фізичному носії.

Створення спеціалізованих схем. Для потреб маломобільних груп населення, людей похилого віку, соціальних працівників чи екстрених служб система генерує друковані схеми руху з підписами та графічними підказками. Такі матеріали рекомендовано розміщувати у громадських місцях, житлових будинках, навчальних закладах і медичних установах для забезпечення широкої доступності інформації.

Упровадження цього підходу забезпечує можливість швидкої адаптації до змін ситуації, оперативної побудови маршрутів з урахуванням поточних обмежень і потреб різних груп користувачів, а також підвищує загальний рівень безпеки і стійкості міського середовища за надзвичайних обставин.

Запропонована автономна геоінформаційна система на базі QGIS має універсальний характер і може бути адаптована до потреб різних категорій користувачів у реальних надзвичайних умовах. Через особливості міського середовища було виділено кілька типових сценаріїв застосування, кожен із яких вирішує специфічне завдання та ілюструє переваги інтегрованого підходу щодо навігації у кризових ситуаціях (табл. 2).

1. Евакуація мешканця під час повітряної тривоги. У разі оголошення повітряної тривоги мешканці міста змушені максимально швидко орієнтуватися у просторі та вибирати безпечний маршрут до найближчого укриття. За допомогою автономної ГІС користувач має змогу:

- оперативно визначити найближче захисне спорудження з урахуванням наявних обмежень дорожньої мережі (перекриття, аварійні ділянки, ремонтні роботи);
- вибрати маршрут, що мінімізує час перебування на відкритому просторі;
- отримати інструкцію із зазначенням критичних точок (місця переходу дороги, вхідні групи до укриття, наявність зупинок транспорту тощо);
- роздрукувати схему або зберегти її для використання на мобільному пристрої навіть без інтернету.

2. Волонтерська допомога маломобільним групам населення. Для людей похилого віку, осіб з інвалідністю або сімей із дітьми особливо актуальним є отримання доступної, наочної та зрозумілої інформації про безпечні шляхи евакуації. Волонтери та соціальні працівники можуть заздалегідь сформувати і розповсюдити друковані маршрутні схеми для конкретних житлових масивів чи будинків. Це дає можливість:

- знизити рівень дезорієнтації у стресових ситуаціях;
- уникати маршрутів із крутими підйомами, сходами, складними переходами;
- ураховувати наявність укриттів, які обладнані для потреб маломобільних осіб;
- інтегрувати додаткову інформацію (телефони екстрених служб, адреси пунктів медичної допомоги).

3. Діяльність екстрених служб за надзвичайних обставин. Рятувальники, пожежники, медичні працівники та поліція часто стикаються з необхідністю швидкого доступу до місця події навіть у випадку часткового руйнування або блокування певних ділянок транспортної мережі. Автономна ГІС дає змогу:

- швидко формувати альтернативні маршрути з урахуванням інформації про непрохідність чи пошкодження окремих вулиць і перехресть;
- координувати дії кількох підрозділів, розраховуючи оптимальні шляхи для різних типів техніки та спецтранспорту;

- здійснювати просторовий аналіз для пошуку обхідних шляхів, мінімізуючи затримки у прибутті на місце події;
- оперативно оновлювати дані про стан інфраструктури й обмінюватися схемами з іншими службами.

Отже, розроблена система є ефективним інструментом підтримки ухвалення рішень у надзвичайних ситуаціях, підвищує загальний рівень безпеки населення та сприяє координації дій усіх залучених сторін у кризовий період.

Таблиця 2

Типові сценарії використання автономної ГІС

Номер з/п	Сценарій використання	Короткий опис ситуації	Основні функції системи
1	Екстрена евакуація під час повітряної тривоги	Виявлення оптимального маршруту до найближчого укриття	Автоматична побудова маршруту, друкована схема
2	Робота соціальних служб	Доставлення допомоги маломобільним громадянам у кризових умовах	Планування маршруту з урахуванням особливих потреб
3	Навігація для служб порятунку	Оперативне переміщення екстрених служб до місця події	Оновлення маршрутів з урахуванням блокувань, аналіз альтернатив
4	Індивідуальна підготовка громадян	Ознайомлення з укриттями, прокладання маршрутів у разі НС	Інтерактивна карта, збереження маршрутів
5	Проведення навчальних евакуацій	Організація тренувальних заходів у школах, лікарнях, офісах	Генерація схем для різних груп користувачів
6	Підтримка роботи волонтерських штабів	Координація доставлення гуманітарної допомоги в міські райони	Аналіз доступності, прокладання оптимальних маршрутів

Процес упровадження автономних геоінформаційних систем у міське середовище, особливо в контексті кризового планування й навігації, супроводжений низкою важливих технічних, організаційних і соціальних бар'єрів, які суттєво впливають на ефективність і сталість функціонування таких рішень [4].

Актуальність і повнота просторових даних. Використання відкритих джерел, зокрема OpenStreetMap, муніципальних реєстрів, даних ДСНС, хоча й дає змогу швидко сформувати базу геоданих, не гарантує повної актуальності й достовірності відомостей про розташування укриттів, стан дорожньої мережі чи наявність транспортних обмежень. Постійна урбанізація, інфраструктурні зміни, сезонні ремонти й навіть стихійні руйнування в умовах воєнних дій призводять до швидкого «старіння» картографічної інформації. Це потребує організації регулярного оновлення даних, залучення волонтерських спільнот, тісної співпраці з місцевими органами влади.

Офлайн-функціонування та цифрова грамотність. Запуск автономної ГІС передбачає роботу з локальною базою даних, що зберігається на пристрої користувача. Проте не всі мешканці міста мають достатній рівень цифрової грамотності або доступ до сучасних пристроїв для самостійного завантаження, оновлення й використання картографічної інформації в режимі офлайн. Особливої уваги потребують маломобільні групи, для яких необхідно створювати максимально прості у використанні рішення – друковані картосхеми, стенди з інструкціями, спеціальні інформаційні пункти в житлових будинках і місцях масового перебування.

Доступність інформації для різних категорій користувачів. Інтерфейс ГІС має бути адаптований під потреби людей різного віку, із різним рівнем підготовки та фізичними можливостями. Особливо гостро стоїть питання для людей похилого віку, осіб з інвалідністю, батьків із маленькими дітьми. У таких випадках необхідно забезпечити альтернативні способи донесення інформації – через друковані довідники, стенди в під'їздах, інфографіку в публічних місцях, телефони гарячих ліній, консультаційні пункти тощо.

Питання інформаційної безпеки. Публікація повних координат усіх захисних споруд, маршрутів евакуації та чутливих об'єктів інфраструктури у відкритому доступі несе ризик для безпеки міста в цілому. Надмірна відкритість таких даних може бути використана уразливими сторонами або створити додаткову небезпеку для цивільного населення. Тому дуже важливо впроваджувати обмеження щодо поширення критично важливої інформації, застосовувати диференційований доступ для різних категорій користувачів і співпрацювати з органами влади з питань кіберзахисту.

Технічна підтримка та оновлення системи. Ще одним викликом є необхідність постійної технічної підтримки платформи, оперативного реагування на повідомлення про помилки чи зміни в міській інфраструктурі. Для цього доцільно залучати ІТ-спільноту, розвивати мережу локальних адміністраторів і забезпечити швидкі канали зворотного зв'язку з користувачами.

Успішне впровадження автономної ГІС потребує не лише сучасних технічних рішень, а і системного підходу для організації оновлення даних, навчання користувачів, захисту інформації та соціальної адаптації. Подолання цих бар'єрів є передумовою для забезпечення стійкості й ефективності кризової навігації у великих містах України.

Порівняння з міжнародним досвідом впровадження автономних ГІС для кризової навігації. Міжнародна практика зазначає високу ефективність впровадження автономних геоінформаційних систем для вирішення завдань навігації, евакуації та інформування населення в надзвичайних ситуаціях різного походження – від стихійних лих і техногенних аварій до терористичних загроз і воєнних дій. Розвинуті країни, зокрема США, Японія, Ізраїль і держави Європейського Союзу, накопичили значний досвід створення і підтримки подібних систем, які мають високу технологічність, постійну інтеграцію новітніх інформаційних рішень, орієнтовані на користувача.

Наприклад, у Сполучених Штатах Америки та Японії автономні ГІС використовують як елемент державної системи цивільного захисту. Однією з характерних рис є наявність багатомовної підтримки (англійська, японська, іспанська, китайська та інші мови), що дає змогу інформувати різноетнічне населення навіть у стресових ситуаціях. Такі системи інтегровані з каналами екстреного сповіщення, зокрема SMS, push-нотифікаціями на мобільні пристрої та голосовими сервісами, що істотно підвищує охоплення та швидкість передавання важливої інформації у кризовий момент [17, 18].

У країнах ЄС, а також Ізраїлі велику увагу приділяють розробленню інтерактивних офлайн-карт евакуації, щоб мешканці орієнтувалися навіть у разі відключення електромережі або інтернету. Використовують мобільні застосунки з інтегрованими маршрутними алгоритмами, які дають змогу завантажити останню актуальну версію карт на пристрій для подальшого використання без доступу до мережі [19].

Важливою особливістю західного підходу є залучення до процесу оновлення даних не лише офіційних структур, а й волонтерських спільнот, муніципальних працівників і активістів. Регулярне оновлення інформації про стан доріг, укриття, наявність перешкод чи блокпостів здійснюють за допомогою відкритих платформ або чат-ботів, що сприяє оперативному реагуванню на зміни обстановки та підвищує точність просторових даних у реальному часі.

Крім того, сучасні ГІС-системи за кордоном підтримують можливість друкування карт та інструкцій для людей похилого віку, дітей і маломобільних груп, а також розміщення інформаційних стендів у публічних місцях – на вокзалах, у лікарнях, адміністративних будівлях. Це забезпечує доступність інструкцій навіть для тих, хто не користується цифровими технологіями.

Отже, зарубіжний досвід демонструє доцільність широкої інтеграції автономних ГІС у систему цивільного захисту, орієнтацію на багатоформатне інформування населення та залучення громади до постійного удосконалення інструментів кризової навігації. Застосування цих підходів в українських реаліях має значний потенціал для підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації та забезпечення захищеності мешканців великих міст.

Висновки. У результаті проведеного дослідження запропоновано та впроваджено новий підхід щодо створення автономної геоінформаційної системи для побудови оптимальних маршрутів у міських умовах з урахуванням обмежень навігації, реального стану інфраструктури та доступності захисних споруд. Наукова новизна роботи полягає в розробленні алгоритмів автономної маршрутизації, які не потребують доступу до онлайн-сервісів, а також поєднанні багатошарової просторової бази даних із можливістю залучення волонтерських ініціатив для її актуалізації. На відміну від відомих зарубіжних систем кризової навігації (наприклад у країнах ЄС, Японії, Ізраїлі), запропонована система орієнтована на специфічні умови українських міст під час воєнних дій, містить локалізовані шари даних про захисні споруди та функціонує повністю автономно, що забезпечує її стійкість навіть за відсутності інтернету.

Апробація системи на прикладі міста Харкова засвідчила її практичну дієвість: побудовано багатошарову базу геоданих, реалізовано алгоритми маршрутизації з урахуванням безпекових критеріїв, створено картографічні схеми для різних категорій користувачів, у тому числі маломобільних груп населення. Це дає змогу підвищити рівень захищеності мешканців, оптимізувати роботу екстрених служб і органів влади в умовах надзвичайних ситуацій і підвищити стійкість міського простору до раптових загроз. Запропонований підхід може бути адаптований для інших міст України з урахуванням місцевої специфіки та інформаційних ресурсів.

Подальші дослідження спрямовані на розроблення мобільних додатків для автономної навігації, інтеграцію із системами екстреного сповіщення, удосконалення механізмів оновлення геоданих у режимі реального часу та масштабування системи для широкого впровадження у практику кризового планування.

Список використаних джерел

1. Lu D., Weng Q. Spatiotemporal Analysis of Urban Growth. *GIScience & Remote Sensing.* 2020. Vol. 57, No. 5. P. 599–616.

2. Saraf M. H. M., Suhaili W. S. H., Yusof M. M. GIS-Based Emergency Response Management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, No. 4. Article 221.

3. Yalpir S., Kucukali S. GIS-based shelter allocation during crisis. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 78. Article 103643.

4. Yang J. P., Liu Y. H. Urban Navigation in Crisis: GIS Application. *Journal of Transport Geography*. 2019. Vol. 76. P. 85–94.

5. Ayedun C.A., Akinyemi O.J. Crisis Mapping with OpenStreetMap. *Journal of Urban Technology*. 2021. Vol. 28, No. 2. P. 3–19.

6. Taha M. M., Harb A. M. Urban Evacuation Routing with GIS. *Alexandria Engineering Journal*. 2020. Vol. 59, No. 6. P. 4571–4580.

7. Губар Ю.В. ГІС для управління міською інфраструктурою. *Геоінформатика*. 2020. № 2. С. 33–41.

8. Лященко А. С. Геоінформаційні моделі безпеки міста. *Вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*. 2022. № 11. С. 71–76.

9. Воронова В. І. ГІС в кризовому управлінні містом. *Проблеми сучасної геодезії.* 2021. № 3. С. 91–96.

10. Степаненко П. Г. Цифрові карти укриттів міста. Харків: Вид-во ХНУМГ, 2023. 76 с.

11. OpenStreetMap: офіційний сайт. URL: https://www.openstreetmap.org/.

12. Харківська міська рада. Реєстр укриттів. URL: https://city.kharkov.ua/.

13. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Портал захисних споруд. URL: https://dsns.gov.ua/.

14. QGIS Documentation. URL: https://qgis.org/.

15. Nominatim: OpenStreetMap Search API. URL: https://nominatim.openstreetmap.org/.

16. RoadGraph plugin for QGIS. URL: https://plugins.qgis.org/plugins/roadgraph/.

17. FEMA. Emergency Management and Evacuation Maps. URL: https://www.fema.gov/.

18. Disaster Prevention GIS, Japan. URL: https://www.gsi.go.jp/.

19. Alert4All Project, EU. URL: https://alert4all.eu/.

Коростельов Євген Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. Тел.: +38 (099) 78-59-524. E-mail: korostelov@kart.edu.ua.
Коваленко Любов Миколаївна, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет. ORCID iD: 0000-0002-7955-2056. Тел.: +38 (099) 78-59-524. E-mail: klm180248@btu.kharkov.ua.

Korostelov Ye., PhD (Tech.), Associate Professor at the Department of Surveying and Design of Transport Routes, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. Tel.: +38 (099) 78-59-524. E-mail: korostelov@kart.edu.ua.
Kovalenko L., PhD (Pedagogy), Associate Professor at the Department of Land Resources Management, Geodesy and Cadastre, State Biotechnological University. ORCID iD: 0000-0002-7955-2056. Tel.: +38 (099) 78-59-524. E-mail: klm180248@btu.kharkov.ua.

Статтю прийнято 27.06.2025 р.