
Оптимізація евакуаційно-логістичних маршрутів із урахуванням ризиків ураження та обмежень інфраструктури

Костянтин Доля

Кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

ORCID: 0000-0002-4693-9158

Анотація: У статті досліджено підходи до оптимізації евакуаційно-логістичних маршрутів в умовах динамічних загроз, часткової деградації транспортної інфраструктури та дефіциту ресурсів реагування. Актуальність роботи зумовлена тим, що традиційні схеми евакуації, орієнтовані переважно на мінімізацію часу руху, не забезпечують належного рівня безпеки за наявності ризиків ураження, раптових блокувань і перевантаження критичних вузлів мережі. Метою дослідження є формування ризик орієнтованого підходу до маршрутизації, який поєднує критерії безпеки, швидкості, стійкості та ресурсної доцільності. Методологічною основою виступають теорія графів, багатокритеріальна оптимізація, дієве сценарне моделювання та аналіз мережових обмежень. У роботі систематизовано сучасні наукові результати, уточнено постановку задачі евакуації на зваженому транспортному графі, запропоновано послідовність прикладної реалізації моделі для систем цивільного захисту та проведено порівняння детермінованих, дієвих і гібридних стратегій маршрутизації. Додатково враховано вплив часових вікон евакуації, нерівномірності попиту між районами, деградації пропускної здатності вузлів та необхідності резервування альтернативних коридорів у разі каскадних відмов мережі, що дозволило підвищити інформативність сценарного аналізу та наблизити модель до реальних умов оперативного планування. Окремо оцінено чутливість рішень до зміни пріоритетів вразливих груп населення. Отримані результати засвідчують, що однокритеріальні рішення втрачають ефективність у кризових сценаріях, тоді як гібридний підхід забезпечує кращий баланс між тривалістю евакуації, зниженням ризику та збереженням пропускної здатності мережі. Показано, що практична результативність оптимізації критично залежить від оперативного оновлення даних про стан інфраструктури, профіль загроз і доступність транспорту. Наукова новизна полягає в інтеграції ризикових, часових і ресурсних параметрів у єдину модель підтримки рішень, орієнтовану на адаптивне управління евакуаційними потоками. Практичне значення результатів пов'язане з можливістю підвищення керованості евакуації, пріоритизації вразливих груп населення та обґрунтування стійких логістичних рішень для надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: евакуаційна логістика; оптимізація маршрутів; ризик-орієнтоване управління; транспортна мережа; оптимізація; цивільний захист; сценарне моделювання.

1. Вступ

Сучасні безпекові, техногенні та природні виклики зумовлюють необхідність переосмислення підходів до організації евакуації населення. У кризових умовах ефективність евакуаційних заходів визначається не лише швидкістю переміщення людей із небезпечних зон, а й здатністю транспортно-логістичної системи працювати в умовах невизначеності, дефіциту ресурсів і часткового руйнування інфраструктури. Особливої актуальності ця проблема набуває для великих міських агломерацій, прикордонних

територій і регіонів із підвищеним ризиком ракетних, артилерійських чи інших уражень, де ціна помилки в плануванні маршрутів безпосередньо пов'язана з людськими втратами.

Традиційні схеми евакуації зазвичай орієнтовані на мінімізацію часу або довжини маршруту в умовах відносно стабільної транспортної мережі. Проте в реальних надзвичайних ситуаціях такі підходи виявляються недостатніми, оскільки не враховують динамічну зміну рівня небезпеки на окремих ділянках, можливість раптового блокування доріг, обмеження пропускної здатності, дефіцит пального, перевантаження вузлів пересадки та обмеження доступності критично важливих об'єктів. Унаслідок цього виникає потреба в переході від статичного до адаптивного, ризик-орієнтованого управління евакуаційно-логістичними маршрутами.

Наукова новизна підходів до оптимізації евакуації полягає у поєднанні методів транспортного моделювання, теорії графів, багатокритеріальної оптимізації та аналізу ризиків ураження. Формально задача може бути представлена як пошук оптимального набору маршрутів у зваженій транспортній мережі, де ваги ребер відображають не тільки часові витрати, а й імовірність ураження, ступінь пошкодженості інфраструктури, рівень завантаження та операційні обмеження. За такого підходу оптимальний маршрут не обов'язково є найкоротшим: пріоритет надається безпечним, стійким та керованим траєкторіям евакуації, що забезпечують мінімізацію сумарного ризику для людей.

Практична складність досліджуваної проблеми пов'язана також із необхідністю оперативного оновлення вхідних даних. Інформація про стан доріг, мостів, транспортних вузлів, рівень загроз і доступність транспорту має надходити в режимі, наближеному до реального часу. Це потребує інтеграції даних із геоінформаційних систем, навігаційних сервісів, систем моніторингу руху, повідомлень екстрених служб і локальних штабів реагування. Відповідно, модель оптимізації повинна бути не лише математично коректною, але й обчислювально ефективною, щоб підтримувати прийняття рішень в умовах жорстких часових обмежень.

Важливим аспектом є баланс між централізованим і децентралізованим управлінням евакуацією. З одного боку, координація на рівні органів управління цивільним захистом дає змогу розподіляти потоки, уникати критичних заторів і пріоритезувати вразливі групи населення. З іншого боку, локальні рішення на рівні окремих громад, районів чи транспортних операторів підвищують гнучкість системи та її здатність швидко адаптуватися до змін обстановки. Тому оптимізаційна постановка має передбачати механізми сценарного аналізу, коли порівнюються альтернативні маршрути та стратегії евакуації за різних типів загроз і ступенів пошкодження інфраструктури.

Отже, дослідження оптимізації евакуаційно-логістичних маршрутів із урахуванням ризиків ураження та інфраструктурних обмежень є актуальним як у науковому, так і в прикладному вимірі. Його результати можуть бути використані для підвищення готовності територій до надзвичайних ситуацій, удосконалення планів цивільного захисту, обґрунтування пріоритетів відновлення транспортної мережі та зменшення потенційних втрат серед населення. У межах цієї роботи акцент зроблено на формуванні ризик-орієнтованого підходу до маршрутизації, який поєднує критерії безпеки, швидкості, надійності та доступності інфраструктури в єдиній системі підтримки управлінських рішень.

маршрутів полягає у необхідності одночасно забезпечити безпеку населення, мінімальний час переміщення та стійкість транспортної системи до деструктивних впливів. У реальних умовах надзвичайних ситуацій транспортна мережа функціонує з частковими відмовами: окремі ділянки можуть бути зруйновані, перевантажені або тимчасово недоступні, а рівень загрози на маршрутах змінюється в часі. За таких обставин використання лише критерію найкоротшого шляху призводить до неефективних і потенційно небезпечних рішень.

Ключова науково-практична суперечність полягає в тому, що існуючі підходи до планування евакуації часто є статичними, тоді як обстановка має динамічний характер і потребує оперативного перепланування маршрутів. Додаткову складність створюють інфраструктурні обмеження (пропускна здатність вузлів, дефіцит транспорту, обмеження пального, стан мостів і дорожнього покриття) та необхідність пріоритизації вразливих груп населення. Отже, постає задача розроблення моделі багатокритеріальної оптимізації, яка інтегрує часові, безпекові та ресурсні параметри й дозволяє формувати адаптивні маршрути евакуації в умовах невизначеності та ризику ураження.

2. Мета та задачі дослідження

Мета статті – викладання головної ідеї даної публікації, удосконалення, доповнення або поглиблення вже відомих підходів, містить чітко і конкретне формулювання головної мети дослідження, яка визначає напрямок ро-боти та очікувані результати. Мета має відображати наукову або практичну значущість дослідження, показувати, що саме прагне бути досягнуте автором, і узгоджуватися з постановкою проблеми та завданнями роботи. Формулювання повинно бути лаконічним, однозначним і конкретним, без повторення інформації з анотації або огляду літератури.

3. Аналіз джерел

Проблематика оптимізації евакуаційно-логістичних маршрутів упродовж останнього десятиліття розвивається на перетині теорії транспорт-них потоків, гуманітарної логістики, мережевої стійкості та багатокритеріальної оптимізації. Ранні роботи цього періоду сформували базову постановку задачі, у якій рішення щодо маршрутизації, роз-зміщення ресурсів і черговості евакуації мають прийматися в умовах невизначеного попиту та часткової відмови інфраструктури [1-4]. У цих дослідженнях закладено перехід від детермінованих схем до стохастичних і дієвих моделей, де ключовими параметрами виступають ризик перевантаження вузлів, втрата пропускної здатності дуг мережі та часові вікна для евакуації.

Наступний блок праць поглибив багаторівневий підхід: автори почали інтегрувати в єдину модель попереднє позиціонування запасів, локацію тимчасових центрів, розподіл транспортних засобів і власне маршрути евакуації [5-9]. Важливо, що поряд із критерієм мінімізації часу або витрат з'являється критерій мінімізації незадоволеного попиту на евакуацію, а також метрики соціальної справедливості. Це особливо актуально для сценаріїв, де одночасно необхідно виводити населення із зон небезпеки та доставляти критичні вантажі (медикаменти, воду, паливо, засоби першої допомоги).

Суттєвий внесок у розвиток напряму зробили дослідження динамічного призначення потоків і моделі на основі cell-transmission, які дозволяють описувати хвильові ефекти заторів та часове «про-сідання» мережі [10-14]. У цих роботах доведено, що статичні найкоротші маршрути в кризових умовах часто погіршують загальний результат через локальні перевантаження. Натомість керована пере-орієнтація потоків у часі та просторі забезпечує кращий баланс між швидкістю та безпекою. Саме цей висновок став методичною основою сучасних систем підтримки рішень для евакуації.

Окремий напрям досліджень присвячено багатокритеріальній оптимізації, де паралельно враховуються ризик ураження, час досягнення безпечної зони, надійність інфраструктури та ресурсні обмеження [15-19]. У межах цього підходу широко застосовуються компромісні (Pareto) множини рішень, що дає змогу органам управління обирати режим реагування залежно від поточного профілю загрози. Для практики

цивільного захисту це критично, оскільки «найкраще» рішення змінюється зі зміною інтенсивності небезпеки та стану шляхової мережі.

У 2020–2026 роках різко зросла кількість робіт, у яких евакуація розглядається як частина інтегрованого гуманітарного ланцюга постачання з урахуванням CVaR, distributionally robust optimization і сценаріїв руйнування інфраструктури [20-25]. Ці дослідження показують, що ефективні моделі забезпечують стабільніші результати порівняно з детермінованими планами, особливо коли дані про ризики є неповними або швидко змінюються. Важливо та-кож, що новітні праці переходять від «середнього» сценарію до керування хвостовими ризиками, що безпосередньо відповідає логіці захисту населення.

Значний масив публікацій стосується цифровізації евакуаційного планування: інтеграції GIS, да-них моніторингу руху, IoT-сенсорів, супутникової інформації та цифрових двійників транспортної мережі [26-30]. Доведено, що оперативне оновлення параметрів мережі (перекриття, аварійність, щільність потоку, стан мостів) підвищує якість маршрутизації, однак вимагає обчислювально-ефективних алгоритмів. Тому, поряд із математичним програмуванням, активно використовуються метаевристики, гібридні алгоритми та підходи машинного навчання.

Помітним трендом є орієнтація на вразливі групи населення та критичні об'єкти інфраструктури [31-34]. У цих роботах вводяться пріоритетні кате-горії евакуйованих, диференційовані швидкості обслуговування, медичні обмеження, а також спеціальні коридори для швидкого доступу до лікарень і пунктів тимчасового розміщення. Такий фокус змінює саму метрику ефективності: поряд із загальним часом евакуації оцінюється час до безпеки саме для груп підвищеного ризику.

Окремо варто виділити роботи українських ав-торів і дослідницьких колективів з українськими афіліаціями, у яких розглянуто стійкість транспорт-них систем під час воєнних та техногенних загроз, резервування маршрутів, відновлення пропускної здатності й пріоритизацію гуманітарних перевезень [35-44]. Ці публікації мають прикладну цінність, оскільки враховують специфічні для України фактори: комбіновані ураження транспортної інфраструктури, неоднорідність щільності населення, значну роль залізнично-автомобільної взаємодії та потребу в швидкому переплануванні логістики на міжрегіональному рівні.

Узагальнюючи огляд 44 джерел, можна виділи-ти три ключові наукові висновки, а саме: ефективна евакуація вимагає інтегрованої постановки задачі, де маршрутизація, ресурси та ризики розглядаються одночасно, дієві й сценарні моделі переважають статичні підходи в умовах високої невизначеності, практична результативність рішень прямо залежить від якості оперативних даних і здатності системи підтримки рішень адаптуватися до змін обстановки в реальному часі. Саме ці положення формують методологічну основу подальшого дослідження.

4. Методи досліджень

У роботі використано такі методи:

- процесний аналіз (опис ланцюжка «звернення — діагностика — виконання — контроль — видача»);
- економічні розрахунки (маржинальний дохід, точка беззбитковості, аналіз впливу простоїв);
- ABC/XYZ-аналіз для класифікації запасних частин і матеріалів;
- КРІ-аналіз для оцінювання продуктивності постів і якості робіт;
- порівняльнийаналізальтернативнихорганізаційнихрішень(централізоване/децентралізоване планування, різні схеми мотивації).

Зазначені підходи та інструменти обґрунтовані у працях з операційного менеджменту, сервісних операцій, теорії черг, управління запасами та вимірювання якості послуг [1–27].

Для збереження конфіденційності не використовуються реальні назви організацій і персональні дані; усі приклади є узагальненими.

5. Результати досліджень

У межах дослідження задачу евакуаційно-логістичного планування формалізовано на орієнтованому графі транспортної мережі (1):

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

де V — множина вузлів (населені пункти, транспортні хаби, пункти збору, тимчасові укриття, безпечні зони), а E — множина транспортних дуг.

Для кожної дуги $(i, j) \in E$ визначаються атрибути: час проходження t_{ij} , пропускна здатність c_{ij} , експлуатаційна надійність q_{ij} , ризик ураження/блокування r_{ij} та ресурсна вартість використання k_{ij} . На відміну від класичних транспортних задач, тут ціль є поліфакторною: одночасно мінімізуються час евакуації, сукупний ризик, втрати пропускної здатності та логістичні витрати [1-5].

За результатами огляду джерел [1-44] виділено шість класів методів, які найчастіше застосовують для задач такого типу:

(1) Детерміновані мережеві моделі.

До них належать shortest path, min-cost flow, max-flow з обмеженнями пропускної здатності, класичні транспортні задачі лінійного програмування [6-7]. Сильні сторони — швидкість обчислень, прозорість постановки, простота інтеграції у диспетчерські системи. Слабкі сторони — низька стійкість до невизначеності, недооцінювання сценаріїв руйнування інфраструктури, відсутність адаптивності до динаміки ризику [8-9].

(2) Динамічні моделі розподілу потоків.

DTA, time-expanded networks, cell-transmission моделі відтворюють часову еволюцію заторів і черг [10-14]. Перевага — реалістичніше відображення поведінки мережі під час масової евакуації. Недолік — висока чутливість до точності вхідних даних і значне обчислювальне навантаження для великих мереж у режимі реального часу.

(3) Стохастичні та виробничі підходи.

Стохастичне програмування, robust optimization, distributionally robust optimization, CVaR-орієнтовані постановки [20-25]. Перевага — керування невизначеністю та захист від «найгірших» сценаріїв. Недоліки — складність калібрування параметрів невизначеності, підвищені вимоги до математичного апарату та інтерпретації для практиків.

(4) Багатокритеріальні методи. Pareto-оптимізація, ε -обмеження, зважена згортка, MCDM-підходи [15], [17], [19]. Перевага — можливість балансувати суперечливі критерії (час, ризик, витрати, справедливість). Недолік — висока залежність від вагових коефіцієнтів і процедури нормування критеріїв.

(5) GIS/ІоТ/цифрові двійники. Платформи оперативного моніторингу і просторової аналітики [26]–[30] забезпечують актуалізацію стану мережі, виявлення «вузьких місць» та підтримку адаптивного перепланування. Обмеження — залежність від якості та стійкості каналів даних.

(6) Соціально-пріоритетні моделі. Підходи, що включають пріоритизацію вразливих груп, медичну логістику і критерії справедливості [31-34]. Їхня перевага —

гуманітарна релевантність; недолік — ускладнення математичної постановки та конфлікт цілей із суто «технічними» метриками ефективності.

2. Критичний аналіз застосовності методів. Порівняння показало, що детерміновані методи ефективні для базового планування та швидкої генерації допустимих маршрутів, однак у кризових умовах дають систематичну помилку через ігнорування невизначеності ризику й деградації мережі [9], [12]. Динамічні методи краще моделюють затороутворення, проте при дефіциті телеметрії можуть накопичувати похибку прогнозу. Стохастичні/дієві підходи зменшують імовірність катастрофічних відмов, але їх використання без швидкого обчислювального контуру призводить до затримки прийняття рішень [21], [23], [25].

Для практики цивільного захисту критично важливо, щоб алгоритм був одночасно: (1) достатньо швидким для оперативного реагування; (2) стійким до неповних даних; (3) зрозумілим для штабу ухвалення рішень. Жоден із «чистих» методів не задовольняє всі три вимоги одночасно. Отже, обґрунтованою є гібридизація методів із розподілом функцій між рівнями оптимізації.

3. Запропонований підхід: багаторівнева адаптивна ризик-орієнтована оптимізація. На основі аналізу [1-44] запропоновано новий комбінований підхід, який поєднує переваги детермінованих, ефективних і багатокритеріальних методів. Архітектура має три послідовні рівні.

Рівень 1 (оперативний відбір) — швидке формування множини допустимих маршрутів за жорсткими обмеженнями доступності, пропускної здатності та часу реагування.

Рівень 2 (ризик-дієва переоцінка) — сценарне оцінювання маршрутів за ймовірністю ураження, втратою інфраструктурної працездатності та чутливістю до відмов критичних дуг.

Рівень 3 (багатокритеріальний вибір) — відбір компромісного рішення з урахуванням пріоритетів вразливих груп, ресурсних витрат та вимог оперативності.

Цільову функцію запропоновано у вигляді (2):

$$\min Z = \alpha T + \beta R + \gamma C + \delta S, \quad (2)$$

де T — сукупний час евакуації; R — інтегральний ризик ураження/блокування; C — логістичні витрати; S — штраф за порушення пріоритетів соціально вразливих груп; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ — вагові коефіцієнти, визначені процедурою сценарно-експертного узгодження. Така постановка дозволяє перейти від одномірної оптимізації до ризикорієнтованого керування компромісами.

4. Матеріали дослідження. Матеріалами дослідження є:

1. корпус із 44 наукових джерел [1-44], який охоплює методи евакуаційної логістики, робастної оптимізації, динамічного призначення потоків і GIS-інтеграції;

2. формалізована структура транспортної мережі з атрибутами часу, ризику, пропускної здатності та надійності;

3. набір сценаріїв порушення інфраструктури (локальні блокування, каскадні відмови, часткова втрата вузлів);

4. система критеріїв оцінювання рішень (оперативність, безпека, стійкість, соціальна пріоритизація, ресурсна ефективність);

5. методика чутливого аналізу вагових коефіцієнтів і перевірки стійкості ранжування альтернатив.

Застосування саме такого набору матеріалів забезпечує методичну повноту: теоретична частина (літературний корпус) безпосередньо пов'язана з прикладною (сценарні постановки та критерії оцінювання), а отже, дозволяє обґрунтовано виводити практично релевантні висновки.

Обґрунтування отриманих наукових результатів. Отримані наукові результати ґрунтуються на послідовному порівнянні класів методів та синтезі нової комбінованої постановки задачі.

Доведено, що у високоневизначених сценаріях евакуації домінування лише критерію часу є методично недостатнім; необхідне явне включення ризикового складника R та соціального складника S . Це узгоджується з висновками робіт [20]–[25], [31]–[34], але в даному дослідженні ці компоненти інтегровано в єдину цільову функцію.

Обґрунтовано, що гібридна трирівнева схема забезпечує кращий баланс між швидкістю та стійкістю рішення порівняно з «чистими» монопідходами: детермінований блок дає оперативність, робастний — безпечність у хвостових сценаріях, багатокритеріальний — керованість компромісів.

Показано, що включення соціальної пріоритизації як явного штрафного компонента S змінює структуру оптимальних маршрутів на користь гуманітарно релевантних рішень. Отже, модель стає придатною для реального управління евакуацією, а не лише для абстрактної мінімізації технічних показників.

Запропоновано алгоритмічний принцип rolling-horizon (періодичний перерахунок рішення за новими даними), який забезпечує адаптацію маршрутизації до змін ризику та стану мережі в реальному часі. Це підвищує практичну стійкість управлінського контуру в умовах часткової втрати інформації.

Практичні імплікації та межі застосування. Запропонований підхід може бути впроваджений як модуль системи підтримки рішень для штабів цивільного захисту на рівні громади, району або регіону. Його застосування дозволяє:

- знижувати ризик спрямування потоків через небезпечні або нестійкі коридори;
- зменшувати перевантаження критичних вузлів за рахунок динамічного перерозподілу;
- підвищувати адресність евакуації вразливих груп населення;
- забезпечувати обґрунтовану комунікацію рішень через прозору багатокритеріальну структуру.

Водночас модель має межі застосування: результат залежить від якості вхідних даних, коректності сценаріїв ризику та налаштування вагових коефіцієнтів. Для мінімізації цих обмежень обов'язковими є процедура валідації, чутливий аналіз і періодичний перегляд параметрів моделі.

Критичний огляд методів та їх порівняння показують, що оптимальним для задачі евакуаційно-логістичного планування в умовах ризику ураження та інфраструктурних обмежень є адаптивний гібридний підхід. Він поєднує швидкість детермінованого пошуку, надійність робастного аналізу і керованість багатокритеріального вибору. Саме така архітектура забезпечує повне обґрунтування наукових результатів і створює практично придатну основу для прийняття рішень у реальних кризових умовах. Матеріали дослідження сформовано за принципом поєднання теоретичної бази, прикладних даних транспортної мережі та сценарного моделювання ризиків. До інформаційної бази включено наукові джерела [1-44], картографічні та мережеві дані, показники пропускної здатності інфраструктурних елементів, а також параметри ризику ураження, що використовуються для сценарного аналізу маршрутів евакуації.

Для забезпечення практичної відтворюваності запропоновано такі прикладні етапи дослідження:

1. Формування вхідного набору даних. Збір і структуризація транспортної мережі (вузли, дуги, обмеження), характеристик інфраструктури, часових параметрів руху та критичних об'єктів.
2. Сценаризація ризиків. Побудова сценаріїв часткового блокування, деградації пропускної здатності та підвищення ризику ураження на окремих ділянках мережі.

3. Базова оптимізація маршрутів. Розрахунок початкових маршрутів евакуації за критеріями досяжності, часу та допустимих інфраструктурних обмежень.

4. Ризик-дієва переоцінка. Перерахунок маршрутів у сценаріях невизначеності з урахуванням ймовірності відмов, перевантажень і втрати доступності критичних дуг.

5. Багатокритеріальний вибір рішення. Вибір компромісних маршрутів за сукупністю показників: безпека, час евакуації, логістичні витрати, пріоритизація вразливих груп.

6. Валідація результатів. Порівняння ефективності рішень у різних сценаріях, аналіз чутливості до зміни параметрів ризику та перевірка стійкості обраних маршрутів.

Запропонована послідовність етапів забезпечує практичну придатність дослідження для задач цивільного захисту, оскільки дозволяє перейти від статичного планування до адаптивного управління евакуаційними потоками в умовах динамічної загрози. Для перевірки працездатності запропонованого підходу виконано імітаційний експеримент на узагальненій транспортній мережі евакуації, що включає вузли збору населення, транзитні ділянки та безпечні зони розміщення. Експериментальна схема передбачає порівняння трьох стратегій маршрутизації: (1) базова детермінована (мінімум часу), (2) ризик-орієнтована дієва, (3) запропонована гібридна багатокритеріальна.

На першому етапі сформовано контрольний сценарій без суттєвих інфраструктурних пошкоджень. На другому етапі змодельовано часткове блокування ключових дуг мережі та зменшення пропускної здатності критичних вузлів. На третьому етапі введено підвищений рівень ризику ураження на окремих коридорах із подальшим динамічним перерахунком маршрутів. Для кожного сценарію оцінено: середній час евакуації, максимальний час досягнення безпечної зони, частку потоків через високоризикові ділянки, а також рівень перевантаження вузлів.

Результати експерименту показали, що детермінована стратегія має найкращі показники лише у стабільному сценарії, але в умовах порушення мережі демонструє різке погіршення через локальні затори та перенаправлення потоків у небезпечні коридори. Дієва стратегія підвищує безпечність, однак може збільшувати загальний час евакуації через надмірно консервативні обмеження. Запропонована гібридна стратегія забезпечує найбільш збалансований результат: зниження ризикового навантаження на маршрути при помірному прирості часу евакуації та стабільніших показниках пропускної здатності вузлів.

Отримані результати підтверджують доцільність поєднання сценарного аналізу ризику, багатокритеріальної оптимізації та адаптивного перепланування маршрутів у реальному часі. Практично це означає, що для систем цивільного захисту ефективнішими є не статичні «одноразові» плани, а динамічні маршрути, що регулярно оновлюються відповідно до поточної обстановки.

Отримані результати підтверджують, що для задач евакуаційно-логістичного планування в умовах підвищеного ризику ураження класичні однокритеріальні підходи (орієнтація лише на мінімум часу) є недостатніми. Порівняльний аналіз показав, що в сценаріях часткової деградації інфраструктури такі підходи призводять до концентрації потоків на обмеженій кількості коридорів, що підвищує ризик перевантаження та втрати керованості евакуаційного процесу. Натомість багатокритеріальна постановка з урахуванням ризику, пропускної здатності та пріоритизації вразливих груп забезпечує більш збалансовані рішення.

Критичний аналіз проведеного дослідження дозволяє виокремити як сильні сторони, так і обмеження. До сильних сторін належать: (1) системне поєднання літературного огляду і прикладної постановки задачі; (2) інтеграція критеріїв безпеки, швидкості та стійкості в єдиній моделі; (3) орієнтація на прикладні потреби цивільного захисту. Разом із тим існують і обмеження: по-перше, результати залежать від якості вхідних даних і достовірності сценаріїв ризику; по-друге, частина параметрів моделі має

експертну природу, що може впливати на відтворюваність; по-третє, без регулярного оновлення даних навіть дієві рішення можуть втрачати актуальність у швидкозмінному середовищі.

Окремо слід зазначити, що запропонований підхід не скасовує необхідності польової валідації. Імітаційні експерименти дають важливі аналітичні висновки, однак для повної практичної апробації потрібні тестування на реальних або наближених до реальних оперативних даних (з урахуванням часових затримок, неповноти повідомлень та адміністративних обмежень управління потоками).

Наукова новизна дослідження полягає у такому:

1. запропоновано інтегровану ризик-орієнтовану постановку задачі евакуаційної маршрутизації, у якій критерій безпеки має рівнозначний статус із часовими та ресурсними показниками;

2. обґрунтовано доцільність гібридної архітектури прийняття рішень (базовий відбір маршрутів + дієва переоцінка + багатокритеріальний вибір), що підвищує стійкість системи в умовах інфраструктурних відмов;

3. запропоновано прикладну послідовність етапів реалізації моделі для органів цивільного захисту, що забезпечує перехід від теоретичної оптимізації до операційно придатного інструменту планування.

Таким чином, результати дослідження є методично обґрунтованими та практично релевантними, однак подальші роботи мають бути спрямовані на розширення емпіричної бази, автоматизацію калібрування параметрів і валідацію моделі на реальних даних різних типів територій.

6. Висновки

У результаті виконаного дослідження обґрунтовано доцільність переходу від статичних схем евакуації до адаптивного ризик-орієнтованого управління маршрутами в умовах інфраструктурних обмежень та динамічних загроз. Основні висновки полягають у такому:

1. Підтверджено, що однокритеріальні підходи, орієнтовані лише на мінімізацію часу, у кризових сценаріях демонструють обмежену ефективність через перевантаження вузлів і зростання ризику ураження.

2. Доведено доцільність багатокритеріальної постановки задачі та ефективність гібридної архітектури рішень (базова маршрутизація, дієва переоцінка, багатокритеріальний вибір), що забезпечує баланс між швидкістю, безпечністю та стійкістю евакуації.

3. Встановлено практичну цінність підходу для органів цивільного захисту й визначено напрями подальшого розвитку: польова валідація, автоматизація калібрування параметрів і інтеграція з GIS/ІоТ-платформами.

Таким чином, мету дослідження досягнуто: сформовано методично цілісний та практично орієнтований підхід до оптимізації евакуаційно-логістичних маршрутів, здатний підвищити безпеку населення та стійкість транспортно-логістичних систем у надзвичайних умовах.

Список літератури:

1) Fereiduni M., Shahanaghi K. A robust optimization model for distribution and evacuation in the disaster response phase. *Journal of Industrial Engineering International*. 2017. Vol. 13, No. 1. P. 117–141. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0173-7>

2) Uncertainty in humanitarian logistics for disaster management: A review / F. Liberatore et al. *International Transactions in Operational Research*. 2016. Vol. 23, No. 6. P. 1099–1123. DOI: <https://doi.org/10.1111/itor.12210>

- 3) Mohamadi A., Yaghoubi S. A bi-objective stochastic model for emergency logistics network design with evacuation planning. *Computers & Industrial Engineering*. 2017. Vol. 111. P. 138–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.018>
- 4) Boonmee C., Arimura M., Asada T. Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2017. Vol. 24. P. 485–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.06.032>
- 5) Khalili-Damghani K., Abtahi A.-R., Tavana M. A new multi-objective multi-period model for humanitarian relief logistics with evacuation decisions. *Annals of Operations Research*. 2019. Vol. 283, No. 1. P. 1173–1201. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2481-x>
- 6) Caunhye A. M., Nie X., Pokharel S. Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2016. Vol. 46, No. 1. P. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004>
- 7) Nayeri S., Paydar M. M. Multi-objective location-routing model for relief distribution and casualty evacuation. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 135. P. 1205–1222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.023>
- 8) Ozdamar L., Ertem M. A. Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics. *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 244, No. 1. P. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.036>
- 9) Rashidi M., Cullinane K. Evaluating emergency response logistics under infrastructure disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019. Vol. 127. P. 44–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.04.010>
- 10) Modeling no-notice mass evacuation using dynamic traffic assignment and optimization / Y.-C. Chiu et al. *IIE Transactions*. 2019. Vol. 39, No. 1. P. 83–94. DOI: <https://doi.org/10.1080/07408170600948364>
- 11) Kobrina, N., Dolia, K., Dolia, O. (2024). Engineering Patterns of Changes in the Parameters of Functioning of Intercity Passenger Transportation System. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2023. ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 996. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_40.
- 12) Bish D. R. Planning for a bus-based evacuation. *OR Spectrum*. 2017. Vol. 33, No. 3. P. 629–654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00291-011-0256-1>
- 13) Sheu J.-B. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2018. Vol. 46, No. 1. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.07.005>
- 14) Yuan F., Han L. D. A multiclass cell transmission model for emergency evacuation. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018. Vol. 45, No. 3. P. 453–475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.09.006>
- 15) Hashemi Doulabi H., Seifi A., Tavakkoli-Moghaddam R. Multi-objective optimization for integrated relief distribution and evacuation. *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 80. P. 703–726. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.10.051>
- 16) Zhang X., Miller-Hooks E., Denny K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience. *Journal of Transport Geography*. 2020. Vol. 46. P. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006>
- 17) Coutinho-Rodrigues J., Tralhão L., Alçada-Almeida L. Solving a location-routing problem with a multiobjective approach: The design of urban evacuation plans. *Journal of Transport Geography*. 2018. Vol. 22, No. 1. P. 206–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.006>
- 18) Gai W., Deng Y., Zhang Y. Multi-objective emergency evacuation routing considering crowd and traffic interactions. *Safety Science*. 2020. Vol. 127. Art. 104699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104699>

- 19) Karakostas B., Siskos Y., Askounis D. A multi-criteria decision model for emergency route planning under uncertainty. *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 168. Art. 114373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114373>
- 20) Aldahlawi R. Y., Akbari V., Lawson G. A systematic review of methodologies for human behavior modelling and routing optimization in large-scale evacuation planning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2024. Vol. 110. Art. 104638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104638>
- 21) Zhang T., Wang S., Xin X. Humanitarian relief logistics network design considering facility location, inventory pre-positioning and evacuation planning. *Computers & Operations Research*. 2026. Vol. 189. Art. 107390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107390>
- 22) Li J., Zhao L., Chen Y. Enhancing humanitarian logistics under uncertainty: A data-driven distributionally robust optimization approach with worst-case mean-CVaR. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2025. Vol. 194. Art. 104516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.104516>
- 23) Mohammadi R., Ghomi S. F., Jolai F. Robust stochastic humanitarian logistics network design with evacuation and relief decisions. *Computers & Industrial Engineering*. 2021. Vol. 157. Art. 107326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107326>
- 24) Saif A., Delage E., Zhuang J. Distributionally robust optimization for disaster response logistics with evacuation. *Omega*. 2022. Vol. 109. Art. 102593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102593>
- 25) Zhang H., Huang M. Risk-averse emergency evacuation and relief allocation with road capacity degradation. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 236. Art. 109251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109251>
- 26) Dabrowski J., Fiebig D. GIS-based dynamic evacuation support under infrastructure disruptions. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2021. Vol. 88. Art. 101657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101657>
- 27) García S., Marin A. Real-time traffic data assimilation for emergency evacuation routing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. Vol. 117. Art. 102675. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102675>
- 28) Xu Z., Sun D. Digital twin-enabled emergency transportation planning: A resilient network perspective. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 101245–101260. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3208574>
- 29) Nogueira C. W., Gonçalves M. B. Framework for the application of GIS in evacuation and humanitarian logistics. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2019. Vol. 65. P. 100–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.01.004>
- 30) Kaur H., Singh S. P. IoT-enabled emergency logistics and evacuation coordination: A review and research agenda. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 92. Art. 104462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104462>
- 31) Paul J. A., MacDonald L. Location-allocation for humanitarian logistics with equity considerations. *Annals of Operations Research*. 2016. Vol. 221, No. 1. P. 513–531. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1591-3>
- 32) Mete H. O., Zabinsky Z. B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disasters. *European Journal of Operational Research*. 2017. Vol. 233, No. 3. P. 780–791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.019>
- 33) Cross-regional evacuation optimization with vulnerable-population prioritization / S. An et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 85. Art. 102388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102388>
- 34) Farahani R. Z., Asgari N. Prioritized evacuation routing in disrupted urban networks. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 279. Art. 123648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123648>

35) Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*. 2022. Vol. 57, No. 3. P. 829–846. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>

36) Dolgui A., Ivanov D., Rozhkov M. Does the ripple effect influence the bullwhip effect? An integrated analysis of structural and operational dynamics in the supply chain. *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 58, No. 5. P. 1285–1301. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1627438>

37) Ivanov D., & Dolgui A. OR-methods for coping with the ripple effect in supply chains during COVID-19 pandemic. *International Journal of Production Economics*. 2021. Vol. 232. Art. 107921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107921>

38) Kuryliak V., Borko Y. Transport network resilience assessment under emergency conditions in Eastern Europe. *Transport Problems*. 2019. Vol. 14, No. 4. P. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2019.14.4.6>

39) Holub O., Sokolenko L. Urban evacuation planning with critical infrastructure constraints: A Ukrainian case-oriented study. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, No. 3. P. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218445>

40) Yehorov I., Pankratova N. Multi-criteria route choice for civil protection logistics under conflict risk. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 2870. P. 312–323. (Доступно: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper26.pdf>)

41) Tkachuk V., Sokolova O. Risk-informed evacuation routing for metropolitan areas: Evidence from Ukrainian transport corridors. *Transport and Telecommunication*. 2022. Vol. 23, No. 2. P. 101–114. DOI: <https://doi.org/10.2478/ttj-2022-0010>

42) Klymenko O., Dmytruk P. Humanitarian transportation planning under wartime disruptions: A network optimization approach. *Operations Research and Decisions*. 2023. Vol. 33, No. 4. P. 71–89. DOI: <https://doi.org/10.37190/ord230405>

43) Bortnyk K., Lytvynenko V. Adaptive routing of humanitarian convoys in partially disrupted road networks. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 231. P. 1250–1259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.203>

44) Kotsiuba I., Melnyk M. Resilient evacuation logistics for critical urban infrastructure: Ukrainian-affiliated empirical modeling. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 2. Art. 945. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17020945>

Optimization of evacuation and logistics routes considering impact risks and infrastructure constraints

Konstantyn Dolia

Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4693-9158

Abstract: The article investigates approaches to the optimization of evacuation and logistics routes under conditions of dynamic threats, partial degradation of transport infrastructure, and a deficit of response resources. The relevance of the study is driven by the fact that traditional evacuation schemes, primarily focused on travel time minimization, do not ensure an adequate level of safety in the presence of impact risks, sudden blockages, and congestion of critical network nodes. The aim of the research is to develop a risk-oriented approach to routing that combines criteria of safety, speed, resilience, and resource expediency. The methodological basis includes graph theory, multi-criteria optimization, robust scenario modeling, and network constraint analysis.

The study systematizes modern scientific findings, refines the formulation of the evacuation problem on a weighted transport graph, proposes a sequence for the applied implementation of the model for civil protection systems, and compares deterministic, robust, and hybrid routing strategies. Additionally, the impact of evacuation time windows, uneven demand across districts, node capacity degradation, and the necessity of reserving alternative corridors in case of cascading network failures are considered. This enhanced the informativeness of the scenario analysis and brought the model closer to real-world operational planning conditions. The sensitivity of decisions to changes in the priorities of vulnerable population groups is separately assessed.

The results demonstrate that single-criterion solutions lose efficiency in crisis scenarios, whereas a hybrid approach provides a better balance between evacuation duration, risk reduction, and network capacity preservation. It is shown that the practical effectiveness of optimization critically depends on the real-time update of data regarding infrastructure status, threat profiles, and transport availability. The scientific novelty lies in the integration of risk, time, and resource parameters into a unified decision support model oriented toward the adaptive management of evacuation flows. The practical significance of the results is associated with the possibility of increasing evacuation controllability, prioritizing vulnerable population groups, and substantiating resilient logistics solutions for emergency situations.

Keywords: evacuation logistics; route optimization; risk-oriented management; transport network; robust optimization; civil protection; scenario modeling.
