

Галкін А.С.Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова**Самчук Г.О.**Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова**Лифенко С.Е.**Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова**Скрипін В.С.**Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова

ПРОСТОРОВО-МЕРЕЖЕВИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ПАСАЖИРІВ НА ЗУПИНОЧНИХ ПУНКТАХ

У статті запропоновано просторово-мережевий підхід до кількісної оцінки безпеки пасажирів перед пошкодою – на зупинках громадського транспорту, де у випадку повітряної тривоги «вікно попередження» вимірюється хвилинами. Вихідна постановка проблеми полягає у нормативно-операційній прогалині: на відміну від будівель і підземних станцій із формалізованими вимогами безпеки, зупинки зазвичай розглядаються як елементи благоустрою без гарантованої наявності поблизу захисних споруд. Мета дослідження – інтегрувати логіку цивільного захисту в транспортне планування та запропонувати метрику, що безпосередньо характеризує захищеність пасажирів на зупиночних пунктах. Ми побудували повторюваний аналіз на відкритих даних OSM, GTFS (2019/2024) та міському списку 1 212 укриттів. Для 348 транспортно-аналітичних зон Харкова обчислено Індекс захищеності пасажирів з урахуванням відстані до укриття (ІЗПР) як відношення кількості укриттів, досяжних у межах коротких пішохідних ізохрон від зупинок, до кількості зупинок у зоні. Ізохрони формувалися у VISUM на основі пішохідного графа, подальші етапи з агрегації та картографування виконувалися у QGIS/PostGIS. Порівняльний аналіз двох часових зрізів показав істотне підвищення середнього ІЗПР у місті (орієнтовно з 0,18 до 0,57) і зниження частки зон із нульовою захищеністю (з 63 % до 29 %), що відображає впровадження та інвентаризацію укриттів поблизу зупинок. Водночас зберігається виразний центр-периферійний градієнт: формується широкий пояс мінімальної захищеності (0–1) довкола центру, тоді як периферійні та промислові кластери лишаються «пустелями безпеки». Інтерпретація класів ІЗПР дає змогу ранжувати транспортноаналітичні зони (TAZ) за наступними напрямими втручань і дій: встановлення модульних зупинок-укриттів, нарощування місткості та покращення пішохідних підходів, корекція розміщення зупинок. Методика масштабована на інші міста/сценарії (воєнні, техногенні, терористичні), а сама метрика може стати новим ключевим показником ефективності (KPI) у Sustainable Urban Mobility Plan (SUMP) та програмах безпеки руху. Обмеження дослідження (номінальні координати та паспортна місткість укриттів, обмежене урахування бар'єрів доступності й поведінкових аспектів) окреслюють подальші кроки: ємнісно-чутливі розрахунки з урахуванням черг, диференціація за групами користувачів, інтеграція з «цифровим двійником» міста для оперативного перерахунку ризику. Отримані результати закривають критичну прогалину між транспортною доступністю та цивільним захистом і створюють практичну основу для адресної політики вирівнювання пасажирського ризику у просторі міста.

Ключові слова: Індекс захищеності пасажирів (ІЗПР), безпека громадського транспорту, зупинки-укриття, пішохідні ізохрони, транспортно-аналітичні зони (TAZ), доступність укриттів, цивільний захист, резильєнтність міської мобільності.

Постановка проблеми. Сучасні міста зазнають зростання ризиків, пов'язаних із воєнними діями, терористичними загрозами та техногенними інцидентами. У цих умовах зупинки громадського транспорту, – місця концентрації пасажирів у «передпосадковій» фазі, – перетворюються на критичні точки вразливості. На відміну від будівель і підземних станцій, для яких існують установлені норми безпеки, зупинки зазвичай регулюються як елементи благоустрою, без обов'язкових вимог щодо захисних споруд поблизу. Внаслідок цього виникає нормативно-операційна «сіра зона», коли відповідальність і засоби захисту пасажирів до моменту посадки залишаються не визначеними. Додатково проблему загострюють часові обмеження: у разі повітряної тривоги «вікно попередження» вимірюється хвилинами, а отже реальна безпека залежить від миттєвої пішохідної досяжності найближчого укриття від конкретної зупинки та від топології пішохідної мережі.

Наукове завдання полягає у формуванні відтвореного просторово-мережевого підходу, що кількісно оцінює захищеність пасажирів саме на зупинках. Недостатність спеціалізованих метрик, що прямо відбивають ймовірність та множинність «безпечних варіантів» для пасажирів в межах кількох хвилин ходи, обмежує можливості порівняння районів міста, ранжування пріоритетів і валідації рішень у динаміці.

Практичне завдання тісно пов'язане з міським плануванням і управлінням ризиками. Органам місцевого самоврядування, перевізникам та службам цивільного захисту необхідні інструменти, що дозволяють: оперативно виявляти «просторові пустелі безпеки» в мережі зупиночних пунктів; обґрунтовувати розміщення додаткових укриттів (зокрема модульних зупинок-укриттів) і підвищення місткості наявних споруд; коригувати розташування зупинок і пішохідні підходи; інтегрувати алгоритми оповіщення з маршрутизацією пасажирів до найближчих безпечних точок; формувати стандарти мінімально допустимої захищеності у Sustainable Urban Mobility Plan (SUMP) та інших політиках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження безпеки пасажирів під час очікування громадського транспорту лежить на перетині двох масивних наукових традицій – планування транспортних систем та цивільного захисту. У межах другої традиції домінують моделі розміщення укриттів і планування евакуації, що використовують оптимізаційні постановки, ГІС-аналіз і методи багатокритеріальної оцінки. Показовими

є роботи, у яких поєднують дизайн мережі з розміщенням захисних споруд і маршрутизацією, щоб одночасно мінімізувати витрати та час евакуації [1–3]. Окремий напрям становлять дослідження з урахуванням часової мінливості попиту та невизначеностей у транспортному середовищі – від змінного попиту [4] і поведінкових сценаріїв [5; 6] до землетрусів [3] і масштабування доступності [6]. Новіші праці пропонують удосконалені підходи до вимірювання просторової доступності укриттів (Ga2SFCA та його модифікації), що підкреслюють диспропорції між районами та оптимізують радіуси обслуговування [7], а також огляди методів вибору місць для укриттів у різних типах небезпек [8], робастні оптимізаційні моделі для сейсмічно небезпечних територій [9] та імітаційні моделі, які враховують поведінку мешканців і пропускну спроможність укриттів [10]. У сукупності ці підходи дають зрілий інструментарій для оцінки місткості, розміщення та призначення укриттів при масовій евакуації, але здебільшого виходять з «домогосподарського» розподілу населення та не розглядають ризики людей, що перебувають у дорозі або очікують транспорт.

Паралельно розвивається література з доступності та безпеки зупинок громадського транспорту. Тут ключовими є праці про сприйняту безпеку пасажирів і чинники злочинності/комfortу на зупинках [11], вплив конструкції зупинки на кількість та тяжкість ДТП [12], індекси пішохідної безпеки навколо зупинок [13] і просторові моделі аварійності біля точок доступу до транспорту [14]. Для вимірювання доступності широко застосовують ГІС-методи (буферні зони, ізолінії, індекси крокової доступності, аналіз мережевих бар'єрів) [15], а також поєднання даних ГІС для оцінювання пішохідної доступності до зупинок [16]. Цей корпус робіт важливий для проектування «звичайної» безпеки та comfortу, однак у більшості випадків він не інтегрує цивільний захист у логіку транспортного проектування, не пов'язує топологію зупинкової мережі з реально доступними укриттями та рідко розглядає ситуації воєнного стану чи терористичних загроз.

Невирішені частини загальної проблеми, на яких фокусується стаття, такі: по-перше, бракує спеціалізованих метрик, що прямо вимірюють захищеність пасажирів на зупиночних пунктах з урахуванням відстані/часу до найближчого безпечного укриття й особливостей пішохідної мережі; наявні моделі здебільшого оптимізують розміщення укриттів або оцінюють «звичайну» транспортну доступність, не поєднуючи ці дві

площини [2; 7; 10; 15]. По-друге, у літературі фактично відсутнє врахування мережеских станів під час кризи (вимкнення електротранспорту, відхилення маршрутів, блекаути) та вікон попередження, які визначають реальні межі пішохідних ізохрон для пошуку укриття; це критично для міст, що переживають обстріли. По-третє, сучасні дослідження не досліджували розташування (зупинок) по відношенню до захисних споруд, відкалібрований на місцеві стандарти доступу/місткості, та не пропонують відтвореного робочого процесу на базі відкритих даних (OSM). По-четверте, у фокусі зазвичай опиняються системні або маршрутні показники, а просторове вирівнювання ризику на рівні транспортно-аналітичних зон і пріоритезація втручань за очікуваним додатковим ефектом (граничною віддачею) для пасажирів висвітлені недостатньо. Нарешті, для українських міст загалом і Харкова зокрема бракує емпіричних робіт, що спираються на офіційні реєстри укриттів і надають кількісну картину після початку повномасштабної війни (виняток – поодинокі просторові аналізи забезпеченості цивільними спорудами [16, 17]).

Постановка завдання. Мета статті – розробити та апробувати просторово-мережеский підхід до оцінювання безпеки пасажирів на зупинках громадського транспорту в умовах воєнних загроз. Для досягнення мети ставляться такі завдання: зібрати вихідні дані за допомогою відкритих і офіційних даних (OSM, GTFS, міський реєстр укриттів) для генерації пішохідних ізохрон; запропонувати метрику Індексу захищеності пасажирів (ІЗІП) з урахуванням відстані до укриття як відношення кількості досяжних укриттів до кількості зупинок у межах транспортно-аналітичної зони; здійснити порівняльне картографічне оцінювання для Харкова у двох часових зрізах: до початку повномасштабного вторгнення та після його початку, з виявленням просторових кластерів високого/низького ризику; інтерпретувати результати для вироблення пріоритетів інфраструктурних втручань (розміщення зупинок-укриттів, підвищення місткості чинних споруд).

Виклад основного матеріалу. Методологія спирається на інтегровану геобазу PostgreSQL/PostGIS, у якій зібрано всі шари, потрібні для обчислення індикаторів захищеності. Межі міста та 348 транспортно-аналітичних зон (TAZ) імпортовано з шейп-файлів, які були отримані в результаті розробки SUMP. Виконано топологічне очищення та перепроєкцію до WGS

1984 UTM Zone 37N. Пішохідний субстрат побудовано з витягу OpenStreetMap станом на 1 лютого 2024 р. Мережу громадського транспорту реконструйовано з EasyWay: 2019 р. – довоєнна «база», 2024 р. – воєнний стан із припиненнями та об'їздами; обидва фіди розібрано у PTV VISUM 2022. Географію укриттів отримано з міського геопорталу smart.citynet.kharkiv.ua: 1 212 записів (ПРУ, сховища подвійного призначення, зупинки-укриття) з номінальною місткістю; ці значення прийнято як фіксовані через обмеження воєнного часу. Додаткові шари (контури будівель, висоти стін) використовувалися лише для перевірок видимості вибухової хвилі й не входили до розрахунку індексів.

Оброблення даних здійснювалося у зв'язці VISUM–QGIS. У VISUM пішохідний граф із імпедансом (impedance) слугував основою для ізохрон «вікон попередження». Точки зупинок ортогонально «підсаджувалися» до найближчих вузлів графа, а центроїди укриттів під'єднувалися як синтетичні зони з нульовою внутрішньозонною вартістю. Одержані полігони експортувалися до QGIS, де їх розподіляли за часовими класами та виконували просторові приєднання «зупинка–ізохрона» і «TAZ – об'єкти укриття». Після агрегації підраховано кількість укриттів, досяжних хоча б із однієї зупинки кожної зони у межах заданого часу, та кількість зупинок у зоні; далі обчислено ІЗІП.

ІЗІП з урахуванням відстані до укриття було обчислено для кожної транспортно-аналітичної зони міста як відношення кількості досяжних укриттів до кількості зупинок громадського транспорту в межах зони:

$$ІЗІП_i(t_w) = \frac{N_i^S(t_w)}{N_i^N},$$

де N_i^S – число укриттів, що досяжні мережевою пішохідною відстанню за час t_w ($t_w = 10 \text{ хв}$), од.

N_i^N – число зупинок у TAZ i , од.

Значення ІЗІП класифіковано на інтервали, інтерпретації яких та відповідні управлінські дії зведено в табл. 1; саме ці класи й відображено на картах «до початку повномасштабного вторгнення» та «після початку повномасштабного вторгнення».

Картохема довоєнного стану (Рис. 1) фіксує чітку центр-периферійну поляризацію. У більшості периферійних TAZ індекс має нульове значення, тобто жодне укриття не потрапляє до ізохрони пішого доступу від зупинок у межах обраного вікна попередження. Підвищені зна-

Інтерпретація класів ІЗПР та орієнтовні управлінські дії

Клас ІЗПР	Зміст показника для зупинок у зоні	Характерна просторова картина	Орієнтовні першочергові дії
0	Укриття відсутні в пішій досяжності; зупинки фактично незахищені	Периферійні та промислові TAZ, фрагментована пішохідна мережа	Встановлення зупинок-укриттів, відкриття/приспосовування підвальних приміщень, створення мікрокластерів укриттів біля вузлів пересадок
0–1	Мінімальна доступність: поодинокі укриття або надмірна відстань/обхід	Середній міський пояс, коридори вздовж магістралей	Розширення мережі укриттів, пріоритезація пішохідних маршрутів підходів і навігації, інтеграція з інформаційним оповіщенням
1–2	Помірний рівень: на кожну зупинку припадає одне–два досяжні укриття	Внутрішні райони поза історичним центром	Підвищення місткості й безбар'єрності доступу, співрозміщення зупинок і укриттів, дрібні коригування локацій
2–3	Високий рівень: множинні альтернативи укриття	Центральні транспортні вузли та радіальні осі з підземними об'єктами	Підтримка стану та режимів доступу, регулярні аудити місткості, використання як опорних вузлів мережі
3–4	Дуже високий рівень: надлишок вибору та короткі підходи	Окремі центральні TAZ з концентрацією підземної інфраструктури	Утримання якості, стандартизація рішень і масштабування у зонах 0–1 через типові проекти

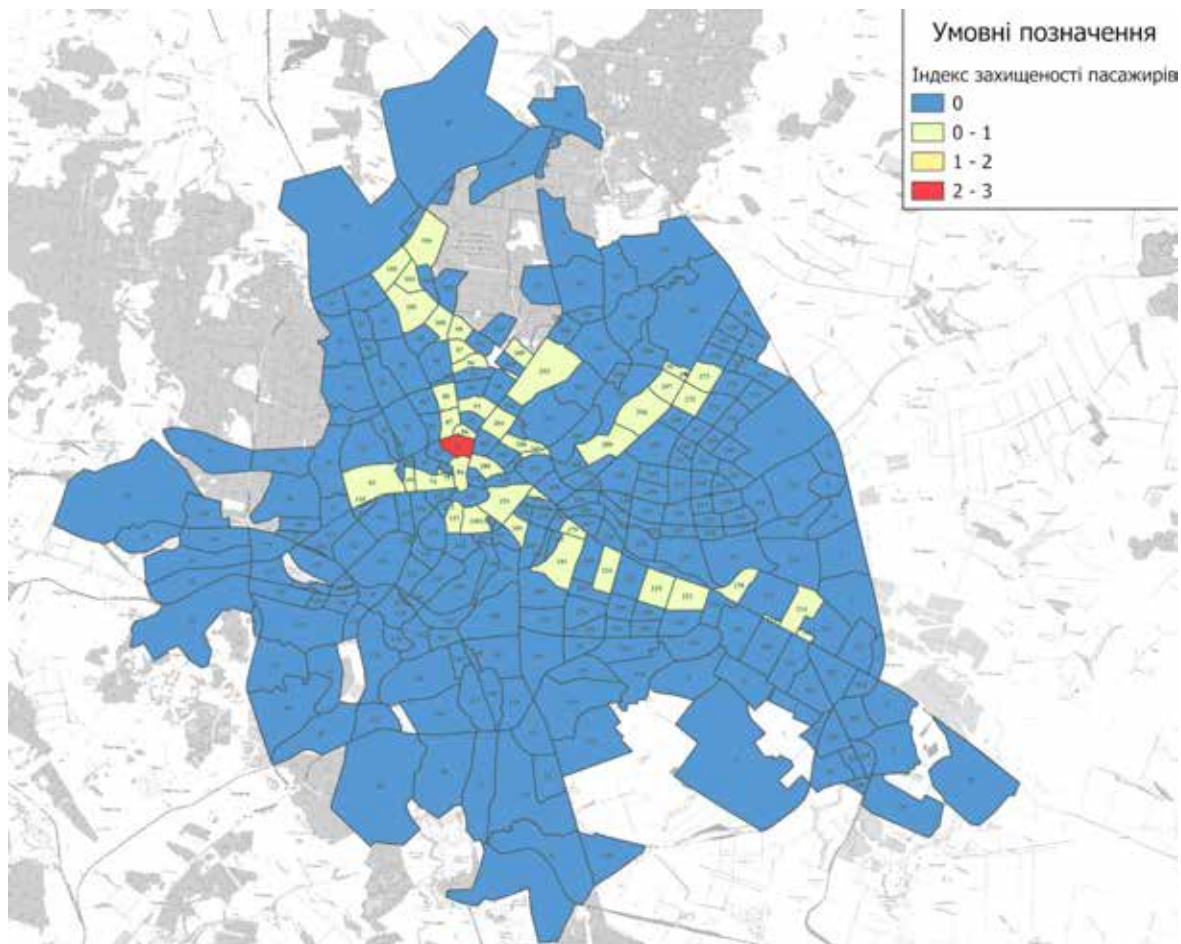


Рис. 1. Значення ІЗПР до початку повномасштабного вторгнення

чення формуються вузькими коридорами уздовж радіальних магістралей, де сконцентровані підземні об'єкти підвищеної міцності (передусім

станції метро й підземні переходи). Окремі центральні зони демонструють максимальні значення ІЗПР завдяки поєднанню високої щільності

зупинок і великої кількості потенційних укриттів у безпосередній близькості. Проте поза історичним ядром мапа перетворюється на суцільне поле незахищеності: навіть незначні розриви у пішохідній мережі та довгі квартальні фронти поза центром не дають сформувати зв'язні області захищеного очікування.

На карті воєнного стану (рис. 2) спостерігається помітна зміна просторового рисунка. Офіційна інвентаризація цивільних споруд захисту та поява спеціалізованих рішень, зокрема зупинок-укриттів, приводять до «потовщення» поясу базової захищеності навколо центру міста. Значна частина TAZ, що до того належала до класу 0, переходить до інтервалу 0–1; у низці центральних і транзитних районів фіксуються вищі інтервали до 3–4 завдяки множинності альтернативних укриттів на відстані короткого пішого підходу. Уточнене мережеве зіставлення зупинок та нових укриттів показує, що приріст індексу локалізується передусім у вузлах пересадок і вздовж магістралей із високою пасажиронапруженістю, тобто там, де співрозміщення цивільного захисту з транспортною інфраструктурою було цілеспрямовано реалізоване.

Порівняння двох часових зрізів демонструє, що середнє значення індексу за містом зросло з 0,18 у довоєнному стані до 0,57 у воєнному. При цьому медіана підвищилася з 0 (мода також дорівнювала нулю) до 0,42, а коефіцієнт варіації зменшився майже вдвічі, що свідчить про певне вирівнювання просторової нерівності. Частка TAZ із нульовим значенням показника скоротилася з 63 % до 29 %, натомість частка зон із ІЗПР між 0 і 1 зросла з 26 % до 48 %. Найвищі значення, понад 2 укриття на зупинку, зафіксовані лише у 4 центральних зонах до вторгнення, а після інвентаризації нових споруд таких зон уже 19; одна з них перевищує поріг 3, що в умовах воєнного конфлікту створює надлишок вибору та підвищує імовірність вільних міст у найближчому укритті.

Картографічний аналіз (рис. 1 та рис. 2) розкриває виразний центр-периферійний градієнт. До 24 лютого 2022 р. лише історичний центр і коридори уздовж станцій метро демонстрували помірний або високий рівень захищеності; решта міста залишалася практично незахищеною. Після розгортання мережі зупинок-укриттів і відкриття підвальних ПРУ утворився суцільний пояс

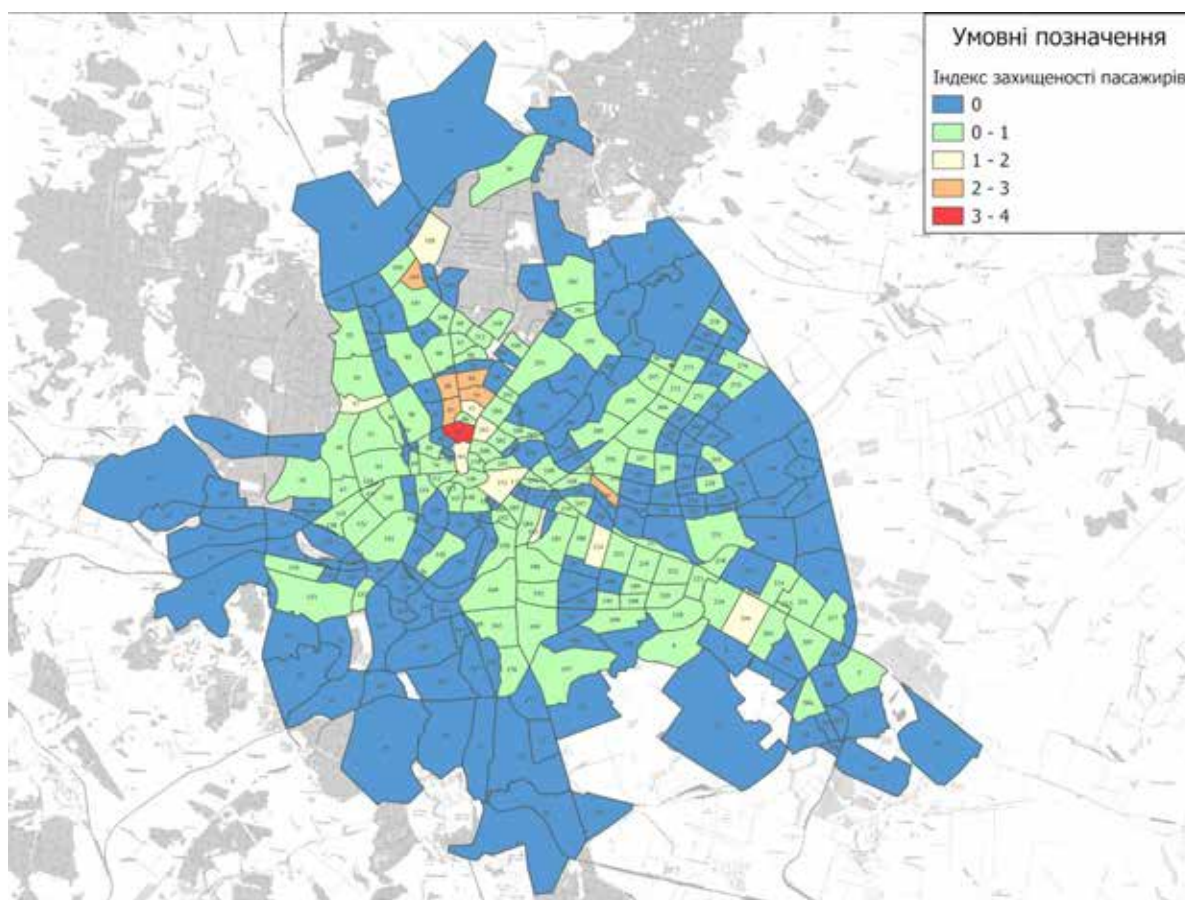


Рис. 2. Значення ІЗПР після початку повномасштабного вторгнення

мінімальної захищеності (клас 0–1) завширшки 3–4 км.

Проте навіть попри прогрес, периферійні та промислові кластери залишаються «блакитними плямами» (клас 0 на рис. 2). Сукупна площа цих зон становить близько 38 % міської території, але на них припадає лише 17 % усіх зупинок і менш ніж 6 % облікових укриттів. Така диспропорція посилюється фрагментованою пішохідною мережею: середня довжина найкоротшого шляху від зупинки до будь-якого потенційного укриття тут перевищує 680 м, що є недосяжним за двохвилинного попередження й граничним за п'ятихвилинного. Окремі промзони демонструють дистанцію понад 1 км, фактично виключаючи можливість дістатися до укриття пішки. Саме на такі вузли осередки вказує стовпець «Пріоритетні інфраструктурні заходи» (табл. 1), що пропонує перелік першочергових інфраструктурних дій.

Додатковим фактором, який пом'якшив просторову нерівність, стала поява тимчасових маршрутів громадського транспорту у 2022–2023 рр., електротранспорт через пошкодження інфраструктури та ризики енергопостачання працював зі скороченнями. Нова автобусна мережа частково покрила (закрила) колишні периферійні зони недостатньої доступності укриттів, але без прокладки нових захисних споруд ефект залишився обмеженим. Для підвищення практичної цінності індексу паралельно було проаналізовано близьку місткість кожного укриття. У центральних районах коефіцієнт місткості перевищує 1,2 відносно середньої годинної пасажиронавантаженості зупинок, тоді як на периферії показник падає нижче 0,4, а іноді виявляється близьким до нуля, коли єдине укриття в межах ізохроні не може прийняти навіть половини потенційних пасажирів. Це доповнює картину, побудовану лише на простому бінарному критерії наявності/відсутності укриття, та вказує на необхідність поєднати розгортання нових об'єктів із підвищенням місткості існуючих.

Якісна інтерпретація сукупних результатів узагальнена в табл. 1, де кожному класу ІЗПР співвіднесено характерне просторове положення в Харкові та рекомендований набір управлінських дій. Послідовне коригування транспортної мережі та мережі укриттів відповідно до цієї градації дозволило б за два роки знизити долю зон із нульовим індексом щонайменше удвічі й підняти середнє значення індексу до 0,8, тобто наблизитися до рівня європейських міст із розвинутою системою цивільної оборони.

Висновки. Дослідження показало, що пасажирська безпека є вимірюваною та керованою характеристикою транспортної системи за умови інтеграції логіки цивільного захисту у просторово-мережевий аналіз. Запропонований підхід дав змогу сформувати відтворювану метрику ІЗПР та картографічно виділити території з різним рівнем реальної захищеності. Емпірична апробація, на кейсі Харкова, продемонструвала суттєве покращення індикатора: після початку повномасштабної війни частина «нульових» зон перейшла у класи мінімальної й помірної захищеності завдяки появі та інвентаризації укриттів біля зупинок, тоді як периферійні та промислові кластери залишилися без змін.

Теоретичний внесок полягає у формуванні відтворюваного обчислювального механізму на відкритих і офіційних даних, придатного для масштабування на інші міста та сценарії. ІЗПР, на відміну від суто транспортних показників доступності, фокусується на ключовому для виживання питанні – наявності найближчого ефективного укриття в межах короткого «вікна попередження» – і тому може слугувати новим цільовим індикатором у SUMP, програмах безпеки дорожнього руху та муніципальних стандартах експлуатації зупинкової мережі. Практичний результат дослідження полягає у створенні кількісної бази для адресного зниження ризику для пасажирів: міські управлінці отримують інструмент і карту, що вказують, де розміщення укриття ближче до зупинки забезпечить найбільший додатковий ефект, а перевізники – підстави для перегляду конфігурації зупинок і пішохідних підходів із максимальним впливом на безпеку.

Перспективи подальших досліджень визначають із зазначених обмежень та з потреби зробити ІЗПР операційним стандартом. По-перше, доцільно розширити метрику до ємнісно-чутливої версії з призначенням пасажирів на укриття та урахуванням часу входу, черг і пропускної спроможності руху від зупинок до укриттів. По-друге, варто інтегрувати реальні профілі швидкості для різних груп населення, перекалібрувати ваги ребер пішохідної мережі з урахуванням якості інфраструктури та бар'єрів доступності, а також тестувати чутливість до різних часових інтервалів попередження та режимів оповіщення. Нарешті, метод слід масштабувати на інші українські міста й міжнародні приклади, що стикаються з ризиками воєнних або техногенних інцидентів, щоб сформувати порівняльні еталони (бенчмарки) та узгоджені регуляторні орієнтири.

Список літератури:

1. Hadas, Y.; Laor, A. Network Design Model with Evacuation Constraints // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2013. – Vol. 47. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.tra.2012.10.027.
2. Chen, W.; Fang, Y.; Zhai, Q.; Wang, W.; Zhang, Y. Assessing Emergency Shelter Demand Using POI Data and Evacuation Simulation // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol. 9. – Article 0041. – DOI: 10.3390/ijgi9010041.
3. Bayram, V.; Yaman, H. Shelter Location and Evacuation Route Assignment Under Uncertainty: A Benders Decomposition Approach // *Transportation Science*. – 2017. – Vol. 52. – P. 416–436. – DOI: 10.1287/trsc.2016.0720.
4. Tun, E.; Nishikiori, T.; Varghese, V.; Chikaraishi, M.; Seike, M.; Fujiwara, A. Emergency shelter location–allocation analysis with time-varying demand // *Asian Transport Studies*. – 2024. – Vol. 10. – Article 100152. – DOI: 10.1016/j.eastsj.2024.100152.
5. de Albuquerque, N. L. B.; da Silva, L. B. L.; Alencar, M. H.; de Almeida, A. T. A multicriteria decision model to improve emergency preparedness: Locating-allocating urban shelters against floods // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2024. – Vol. 11. – Article 104695. – DOI: 10.1016/j.ijdrr.2024.104695.
6. Zhonghui, J.; Zheng, H.; Jiaxuan, Z. Integrated approach for flood shelter site selection and emergency response accessibility analysis at the provincial scale: a case study in Henan, China // *Journal of Water and Climate Change*. – 2024. – Vol. 15, № 10. – P. 5291–5308. – DOI: 10.2166/wcc.2024.475.
7. Liang, Y.; Xie, Z.; Chen, S.; Xu, Y.; Xin, Z.; Yang, S.; Jian, H.; Wang, Q. Spatial Accessibility of Urban Emergency Shelters Based on Ga2SFCA and Its Improved Method: A Case Study of Kunming, China // *Journal of Urban Planning and Development*. – 2023. – Vol. 149. – Article 04023025. – DOI: 10.1061/jupddm.upeng-4325.
8. Ma, Y.; Xu, W.; Qin, L.; Zhao, X. Site Selection Models in Natural Disaster Shelters: A Review // *Sustainability*. – 2019. – Vol. 11, № 2. – Article 399. – DOI: 10.3390/su11020399.
9. Eriskin, L.; Karatas, M. Applying Robust Optimization to the Shelter Location–Allocation Problem: A Case Study for Istanbul // *Annals of Operations Research*. – 2024. – Vol. 339. – P. 1589–1635. – DOI: 10.1007/s10479-022-04627-1.
10. Yu, J.; Zhang, C.; Wen, J.; Li, W.; Liu, R.; Xu, H. Integrating Multi-Agent Evacuation Simulation and Multi-Criteria Evaluation for Spatial Allocation of Urban Emergency Shelters // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2018. – Vol. 32. – P. 1884–1910. – DOI: 10.1080/13658816.2018.1463442.
11. Abenoza, R. F.; Ceccato, V.; Susilo, Y. O.; Cats, O. Individual, Travel, and Bus Stop Characteristics Influencing Travelers' Safety Perceptions // *Transportation Research Record*. – 2018. – Vol. 2672. – P. 19–28. – DOI: 10.1177/0361198118758677.
12. Phillips, R. O.; Hagen, O. H.; Berge, S. H. Bus Stop Design and Traffic Safety: An Explorative Analysis // *Accident Analysis & Prevention*. – 2021. – Vol. 153. – Article 105917. – DOI: 10.1016/j.aap.2020.105917.
13. Ulak, M. B.; Kocatepe, A.; Yazici, A.; Ozguven, E. E.; Kumar, A. A Stop Safety Index to Address Pedestrian Safety around Bus Stops // *Safety Science*. – 2021. – Vol. 133. – Article 105017. – DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105017.
14. Samani, R. R.; Amador-Jimenez, L. Exploring Road Safety of Pedestrians in Proximity to Public Transit Access Points (Bus Stops and Metro Stations): A Case Study of Montreal, Canada // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 2023. – Vol. 50. – P. 536–547. – DOI: 10.1139/cjce-2022-0309.
15. Kraft, S. Measuring and modelling the spatial accessibility of public transport stops in GIS // *Hungarian Geographical Bulletin*. – 2016. – Vol. 65, № 1. – P. 57–69. – DOI: 10.15201/hungeobull.65.1.5.
16. Galkin, A., Samchuk, G., Lyfenko, S., Botsman, A., Braterska, N., Hriekova, O., Drobotova Ye. & Tolmachov, I. Planning passafeguard in conflict zones and assessment of public transport stop accessibility to shelters // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2025. – T. 201. – C. 104669. DOI: 10.1016/j.tra.2025.104669

Galkin A.S., Samchuk G.O., Lyfenk S.E., Skrypin V.S. SPATIAL-NETWORK APPROACH TO PASSENGER SAFETY ASSESSMENT ON STOPS

The paper proposes a spatial-network approach to quantitatively assess passenger safety in the before-boarding phase, at surface public transport stops where, during air-raid alerts, the “warning window” is measured in minutes. The core problem is a regulatory-operational gap: unlike buildings and underground stations governed by explicit safety standards, surface stops are typically treated as street furniture with no obligation to provide nearby protective shelters. Our objective is to embed civil-protection logic into transport planning and to introduce a metric that directly captures the safety of a person waiting at a stop. We develop a reproducible data pipeline combining open and official sources: an OSM-based pedestrian network (assumed walking speed 5 km/h with stair penalties), reconstructing stop layers for pre-invasion and conflict-time conditions, and the city registry of 1,212 civil-defence facilities (anti-radiation shelters, dual-use structures,

modular shelter-stops). For 348 Transport Analysis Zones (TAZ) in Kharkiv we compute the Passenger Protection Index (PPI) defined as the ratio of shelters reachable within short pedestrian isochrones from stops to the number of stops in the zone. Isochrones are generated in VISUM on the pedestrian graph; aggregation and mapping are performed in QGIS/PostGIS. A two-period comparison indicates a substantial improvement in city-wide protection: the mean PPI rises (approximately from 0.18 to 0.57) and the share of zones with zero protection declines (from 63 % to 29 %), reflecting the deployment and inventory of shelters near stops. Yet a pronounced centre-periphery gradient persists: a broad ring of minimal protection (0–1) encircles the inner city, while peripheral and industrial clusters remain “safety deserts.” Class-based interpretation of PPI enables prioritisation by marginal benefit and translates directly into an intervention portfolio: deploying modular shelter-stops, increasing facility capacity, improving pedestrian approaches, and adjusting stop locations. The method generalises to other cities and emergency contexts (war, terror, industrial incidents); the metric itself can serve as a new KPI within Sustainable Urban Mobility Plans (SUMP) and road-safety programmes. Study limitations, nominal stop/shelter coordinates and registry capacities, limited treatment of access barriers and behavioural responses, motivate future work on capacity-sensitive assignments with queuing, user-group-specific speeds and impedances, and integration with an urban digital twin for real-time risk precomputation. Overall, the proposed framework closes a critical gap between transport accessibility and civil protection, providing a practical basis for targeted policies that reduce spatial inequalities in passenger risk.

Key words: *Passenger Protection Index (PPI), public transport safety, shelter-stops, pedestrian isochrones, Transport Analysis Zones (TAZ), shelter accessibility, civil defense, urban mobility resilience.*

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 08.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025