

А.С. Галкін, Г.О. Самчук, С.Е. Лифенко, А. О. Боцман, Н.М. Братерська,
О.О. Грекова, Є.М. Дроботова, І.О. Толмачов

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ОЦІНКА ПРОСТОРОВОЇ ДОСТУПНОСТІ УКРИТТІВ ДЛЯ КОРИСТУВАЧІВ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ МІСТА ХАРКОВА

У статті запропоновано комплексну оцінку 15-хвилинної пішохідної доступності укриттів у Харкові в трьох сценаріях: до повномасштабного вторгнення, під час вторгнення і «blackout». Методика поєднує транспортне моделювання в PTV VISUM із геопросторовим аналізом 348 транспортно-аналітичних зон, що дозволило зіставити густоту укриттів, частку покритої території та залишкові «білі плями» безпеки.

Ключові слова: укриття, просторово-часова доступність, транспортне моделювання, PTV VISUM, цивільний захист.

Постановка проблеми

Транспортна система великого міста – це просторовий «каркас» щоденної мобільності, що з'єднує житлові квартали з місцями роботи, навчання й дозвілля. У мирний час її ефективність традиційно оцінюють крізь призму швидкості та зручності переміщень; проте в умовах збройного конфлікту транспорт набуває додаткової, життєво важливої функції – забезпечення шляху до безпечного укриття. Актуальні дослідження доводять, що найбільш вразливою фазою будь-якої поїздки є очікування й пересування «першої/останньої милі», коли пасажир ще не перебуває в захищеному середовищі [1]. Саме в ці хвилини мешканці Харкова неодноразово потерпали від артилерійських та ракетних атак на відкритих зупинках громадського транспорту. Сучасні збройні конфлікти в міських агломераціях характеризуються високою вразливістю цивільного населення, що підтверджується статистикою: до 90% жертв у війнах припадає на цивільних осіб при застосуванні вибухової зброї в містах [2].

Загрозу посилює просторовий дисбаланс: історично створена мережа захисних споруд концентрувалася переважно у центрі (глибокі станції метро, протирадіаційні сховища підприємств), тоді як периферійні спальні райони, де щільність населення найвища, тривалий час лишалися без адекватного прикриття. Повномасштабна війна, яка почалась 2022 року, змусила міську владу екстрено мобілізувати підвальный фонд житлових будинків і спорудити низку залізобетонних «укриттів-зупинок», уперше запровадивши інтеграцію захисних споруд прямо в транспортну інфраструктуру. Це створило унікальну можливість проаналізувати, якою мірою швидко

перебудова мережі укриттів справді усуває прогалини безпеки в різних просторових і транспортних контекстах міста. В умовах України до початку повномасштабного вторгнення 2022 року питання розміщення і доступності укриттів не було належним чином регламентовано. Дослідники відзначають відсутність чітких стандартів щодо кількості, розподілу та якості укриттів у містах, що базувалися б на демографічних показниках і ймовірних загрозах [1]. В таких умовах питання оцінки доступності існуючих укриттів та планування нових набуло особливої актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Безпечний простір для населення стає критично важливою інфраструктурою, і система укриттів набуває особливого значення. У міському середовищі укриттями можуть слугувати різні типи споруд: від спеціально спроектованих сховищ і протирадіаційних укриттів до споруд подвійного призначення, наприклад, глибокі станції метро, підземні переходи чи паркінги, а також найпростіших укриттів, тобто підвалів і цокольних приміщень житлових будинків [3].

Досвід багатьох країн демонструє, що інтеграція захисних споруд у повсякденну міську інфраструктуру підвищує стійкість міста до воєнних ризиків. Зокрема, в Ізраїлі з 1992 року закон зобов'язує облаштовувати в кожному новому житловому будинку захисну кімнату (MAMAD) із залізобетону, що поступово забезпечило наявність бомбосховищ безпосередньо в домівках значної частини населення [4]. Такий підхід породжує феномен «рутинної безпеки», коли готовність до надзвичайної ситуації стає частиною повсякденного життя [5].

Доступність укриттів визначається, з одного боку, просторовим розподілом захисних споруд, а з іншого – здатністю людей швидко дістатися до них у разі загрози. Основними показниками, що використовуються в літературі для оцінки доступності, є: радіус або час пішої досяжності укриття; частка території чи населення, що покривається цим радіусом (так зване охоплення укриттями); щільність укриттів (кількість сховищ на одиницю площі або населення); а також відповідність сумарної місткості укриттів кількості людей, які потенційно потребують захисту у даному районі.

Сучасна наукова література демонструє зростаючий інтерес до розташування укриттів та планування евакуації для різних сценаріїв. У статті [6] обговорюється аналіз розташування укриттів з урахуванням змінного в часі попиту для надзвичайних ситуацій. У роботах [7, 8] розглядаються події, пов'язані з повеннями, досліджується модель прийняття рішень щодо розміщення міських укриттів та інтеграція вибору місця для укриття та аналізу доступності. Проблеми розташування укриттів у сценаріях землетрусів представлені в дослідженнях [9-11]. У дослідженні [12] пропонується нечітка багатокритеріальна модель планування для укриттів та евакуації в районах, постраждалих від стихійних лих. Також багатоцільова модель для планування укриттів у районах, схильних до цунамі, представлена в [13]. У статті [14] запропоновано концептуальну основу з трьома рівнями екстреної допомоги, при цьому здійснюється прогнозування кількості евакуйованих і потреби в матеріалах, розташування укриттів та розміщення евакуйованих, а також розподіл матеріалів.

Новітні технології, такі як цифрові двійники, також застосовуються для управління евакуацією у разі стихійних лих [15, 16]. Науковці досліджують проблему розподілу місць розташування укриттів та поєднують метод епсилон-обмежень та штучну нейронну мережу для прийняття рішень [17].

У зарубіжних дослідженнях з планування надзвичайних ситуацій широко застосовуються методи геопросторового аналізу та моделювання для визначення оптимального розміщення і розрахунку зон досяжності укриттів. Наприклад, для районів, схильних до природних катастроф, використовуються ГІС-моделі розміщення сховищ і сценарії евакуації пішки, а також моделі оптимального розміщення шелтерів та призначення шляхів евакуації з урахуванням невизначеностей. Автори дослідження [18] зосереджуються на розробці мережі укриттів на основі ризиків для районів, схильних до повеней, використовуючи ГІС та математичне програмування.

Прикметно, що традиційні підходи часто оперують фіксованим радіусом обслуговування укриття (наприклад, вважається, що сховище «накриває» певну зону довкола себе). Однак такий спрощений підхід ставиться під сумнів. Зокрема, дослідники з Китаю зазначають, що розподіл укриттів лише за фіксованим радіусом може бути науково необґрунтованим, і пропонують доповнювати оцінку імітаційними моделями евакуації [19]. Більш точний аналіз потребує врахування реальної вуличної мережі, бар'єрів та динамічних факторів, що впливають на рух пішоходів під час надзвичайної ситуації. Для цього використовуються інструменти моделювання транспортної мережі та ГІС, які дозволяють будувати ізохрони (зони досяжності) навколо укриттів за заданий час (наприклад, 5 чи 15 хвилин пішої ходи).

За останні роки з'являються перші наукові роботи, присвячені безпосередньо оцінці доступності укриттів у контексті збройного конфлікту в Україні. Зокрема, автори [1] запропонували методику аналізу пішохідних зон доступності укриттів залежно від типу ракетно-балістичної загрози (на прикладі м. Миколаєва). Було визначено зони, які можуть бути охоплені укриттями за різного часу підльоту снарядів, і оцінили достатність наявних сховищ. Результати цього дослідження виявили, що існуюча мережа укриттів Миколаєва не забезпечує необхідної швидкої доступності та не має достатньої місткості для укриття навіть половини населення міста. Це свідчить про гостру потребу у створенні нових захисних споруд. Подібні висновки підкреслюють, наскільки недосконалою була система цивільного захисту в українських містах до повномасштабної війни та наскільки важливо її переглянути з позицій сучасних викликів.

Проведений аналіз інформаційних ресурсів з цивільного захисту виявив низку недоліків: брак оцінки ризиків та необхідної місткості сховищ, відсутність нормативів щодо радіусу доступності укриттів та єдиних критеріїв захисних властивостей. У сукупності це призводило до неналежного рівня захищеності населення і могло спричинити збільшення жертв серед мирних мешканців [1].

У цьому дослідженні зосереджено увагу на місті Харкові – великому мегаполісі, що зазнав масованих обстрілів, з метою оцінити, як змінилася доступність укриттів у ході війни та які висновки для міського планування можна зробити на основі цього аналізу.

Мета статті

Метою статті є кількісно оцінити 15-хвилинну пішохідну доступність укриттів у Харкові до повномасштабного вторгнення, під час і в умовах відсутності електроенергії («black-out») та виявити просторові закономірності її еволюції крізь призму транспортної мережі. Комбінуючи детальне зонування (348 транспортно-аналітичних зон (TAZ)), ГІС-аналіз і моделювання в PTV VISUM, ми визначаємо, які райони залишаються найменш захищеними, та формуємо рекомендації для подальшого інтегрування принципів цивільного захисту в транспортне й містобудівне планування.

Виклад основного матеріалу

Дослідницький підхід базується на інтегрованому просторово-мережевому аналізі, що поєднує три ключові компоненти: 1) транспортне моделювання пішохідної доступності; 2) зонування міської території для агрегації показників; 3) картографічну візуалізацію результатів для підтримки планувальних рішень.

Для обробки й відображення просторових шарів використано QGIS: у середовищі ГІС виконано геокодування укриттів, перетин ізохрон із межами зон, а також формування теплокарт покриття. Отримані дані та карти лягли в основу кількісного порівняння трьох аналітичних сценаріїв (до повномасштабного вторгнення, під час вторгнення і «blackout») та формування рекомендацій щодо подальшого розвитку мережі укриттів.

Територію міста було поділено на дрібні райони (транспортно-аналітичні зони), що дозволяє агрегувати та порівнювати показники доступності між різними частинами Харкова. У дослідженні використано 348 TAZ, які покривають усе місто (переважно суміщені з планувальними кварталами або групами кварталів). Такий рівень деталізації узгоджується з наявними даними транспортного моделювання міста і є достатнім для виявлення просторових диспропорцій. Для побудови графа вуличної мережі було використано відкриті дані про вулично-дорожню інфраструктуру Харкова (включно з пішохідними шляхами). Кожному відрізу (ребру графа) присвоєно характеристику – довжину та допустимий режим переміщення. Оскільки основна увага приділяється пішохідній доступності, усі шляхи моделі були параметризовані для пішохода: зокрема, швидкість руху взято постійною 5 км/год (≈ 83 м/хв). Таким чином, вагові коефіцієнти часу для кожного сегмента обчислені як його довжина, поділена на середню швидкість ходьби.

Найважливішим шаром даних є база укриттів. Інформацію про місця розташування захисних споруд було отримано з офіційного міського геопорталу (портал «Smart City»), де станом на кінець 2022 року перелічено 1 212 укриттів різних типів. Цей перелік включає: сховища та протирадіаційні укриття (як правило, залишки радянської цивільної оборони, часто розташовані на підприємствах та в установах); споруди подвійного призначення – передусім станції метро, підземні переходи, підземні паркінги; а також численні найпростіші укриття – підвали й цокольні приміщення житлових будинків, офіційно внесені до фонду захисних споруд міста. Окремо до списку також потрапили спеціально збудовані в 2022 році залізобетонні укриття біля зупинок транспорту (так звані «укриття-зупинки»). Для кожного укриття в базі даних зазначено адресу, географічні координати та місткість (номінальну кількість осіб, яку укриття може вмістити). Враховуючи воєнний час, фактична перевірка стану та місткості не проводилась, тому в моделі використано декларативні параметри місткості як постійні (для цього дослідження показники місткості мають другорядне значення, адже акцент зроблено на територіальному охопленні сховищами, а не на їх заповненості).

З метою врахування різних умов, що впливають на доступність укриттів, аналіз проведено для трьох сценаріїв, які відображають ключові етапи розвитку міської інфраструктури та перебігу бойових дій: (1) довоєнний стан (на початок 2022 р., до вторгнення); (2) воєнний стан (середина–кінець 2022 р., активна фаза бойових дій, наявне енергоживлення); (3) «blackout»-сценарій (кінець 2022 р., бойові дії тривають, але місто переживає масштабні знеструмлення). Ці сценарії відрізняються як у переліку доступних укриттів, так і в умовах транспортної мережі, що побічно впливає на здатність населення дістатися сховищ. Зокрема, у довоєнному сценарії враховуються лише ті укриття, що офіційно існували і підтримувалися до 24 лютого 2022 року – переважно це глибокі станції метро та монолітні підземні переходи, які забезпечують високий рівень захисту. Більшість підвальних приміщень на той час не були підготовлені та не входили до переліку захисних споруд, тому в базовому сценарії вони не розглядаються. У воєнному сценарії (повномасштабне вторгнення) включено всі офіційно зареєстровані укриття, незалежно від їх типу і якості – тобто повний список з 1 212 позицій, описаний вище. Це відображає ситуацію після початку повномасштабного вторгнення, коли міська влада терміново розширила фонд захисних споруд, залучивши максимум наявних підвалів, паркінгів тощо. Окрім того, у 2022 році з'явилися нові

укриття біля зупинок транспорту: станом на грудень їх було споруджено близько двох десятків у різних районах міста. У blackout-сценарії перелік укриттів формально не відрізняється від воєнного (усі 1 212

припиняє роботу, отже дістатися деяких районів стає важче. Втім, у нашому дослідженні основний акцент зроблено на пішохідній доступності, тому обмеження транспортної системи мають відносно менший вплив – люди, як і раніше, можуть дійти пішки до укриття у своєму районі, якщо таке існує, хоча відсутність освітлення чи зв'язку потенційно ускладнює пересування вночі.

Для кожного зі сценаріїв було здійснено розрахунок зон доступності укриттів за допомогою PTV VISUM. Заданим порогом доступності є 15 хвилин – час, протягом якого людина може дістатися укриття пішки, рухаючись зі швидкістю 5 км/год. Результати моделювання були просторово поєднані з шаром TAZ для розрахунку узагальнених показників по зонах. Зокрема, обчислено щільність укриттів (кількість сховищ на 1 км²) в межах кожної зони, а також покриття зоною доступності – яку частку площі даної зони займає територія, що лежить в 15-хвилинній досяжності від найближчого укриття. Такі показники визначено для кожного з трьох сценаріїв, що дозволяє кількісно порівняти зміну ситуації між довоєнним та воєнними періодами. Для опрацювання даних (обчислення перетину ізохрон з межами зон, візуалізація) використано QGIS. Всі розрахунки проводились у єдиній системі координат, прив'язаній до

доступні), однак змінюються умови пересування: унаслідок знеструмлення електротранспорту значна частина маршрутів метро, трамвая і тролейбуса

електронної карти міста, що забезпечує коректність просторових вимірів.

Розширення мережі укриттів у Харкові внаслідок повномасштабної війни добре ілюструють кількісні показники. До 2022 р. в місті було дуже мало підготовлених захисних споруд – у середньому близько 0,25 укриття на 1 км². Фактично, на довоєнній карті були присутні лише поодинокі «острівці» безпеки – гілки метрополітену та кілька десятків стаціонарних сховищ, розташованих переважно в центрі. За підрахунками, укриття до вторгнення покривали лише близько 50–60% території міста (площа охоплення ~225 км²). Натомість станом на кінець 2022 р. ситуація кардинально змінилася. Міська влада залучила до фонду цивільного захисту сотні підвальних приміщень, паркінгів, інших об'єктів, які могли слугувати притулком від обстрілів. Загальна кількість укриттів зросла до 1212, що відповідає середній щільності ~1,56 укриття/км². Іншими словами, чисельність захисних споруд у розрахунку на одиницю площі збільшилась більше ніж у шість разів. На рис. 1 представлено карту Харкова з укриттями. Видно, що найбільша концентрація сховищ спостерігається в центральних та найбільш населених районах міста.

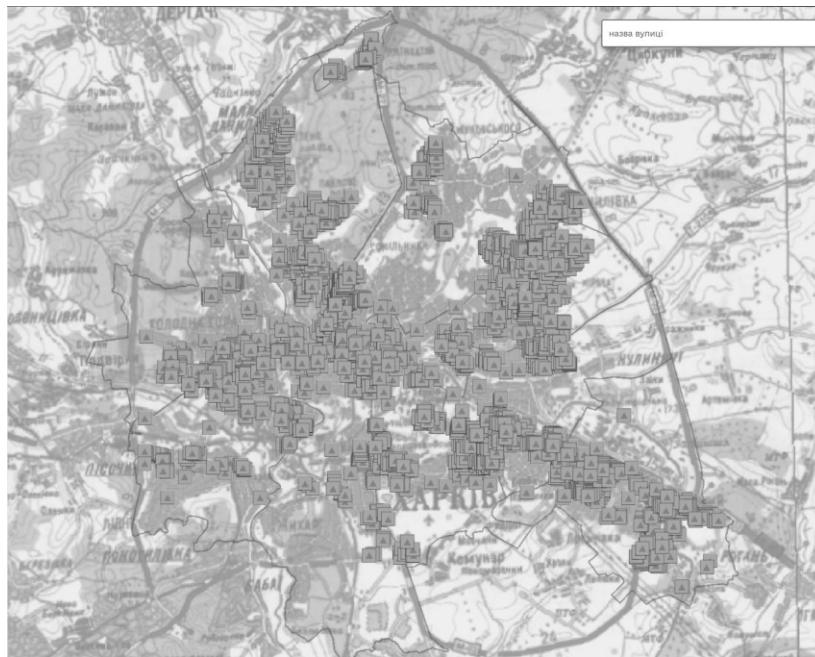


Рис. 1. Розташування укриттів на території м. Харків

Аналіз видів укриттів показує, що лівову частку нового фонду склали саме найпростіші

укриття – підвали житлових будинків. За даними моделі, густота підвальних укриттів у 2022 р.

становила $\sim 1,27$ од/км², що складає понад 80% від загальної щільності. Для порівняння, спеціально збудовані укриття-зупинки дали лише $\sim 0,04$ од/км² (тобто всього декілька відсотків), а частка метро і підземних переходів залишилась на рівні $\sim 0,25$ од/км². Таким чином, підвали та інші пристосовані приміщення житлового фонду забезпечили основний внесок у підвищення захищеності міста. Цей вимушений крок значно підвищив густоту укриттів у спальних районах, таких як Салтівка, Олексіївка, Нові Будинки, де до війни сховищ бракувало. Водночас приватний сектор та околиці все ще мають нижчу концентрацію укриттів (на карті – світло-сірі зони із щільністю нижче 1 од/км²), подекуди там узагалі відсутні облаштовані укриття. Мешканцям таких місць доводиться розраховувати або на власні підвали, або на поїздку/перехід до найближчого району з багатоповерхівками, що, очевидно, є проблематичним під час раптового обстрілу [3].

Різке збільшення кількості укриттів мало наслідком суттєве розширення зон, з яких ці укриття досяжні за прийнятний час. За результатами моделювання, у довоєнному сценарії лише близько 50–60% площі Харкова було в пішій досяжності від якогось укриття (часом навіть умовного, на кшталт метро). Іншими словами, майже половина міських територій не мала жодного сховища поблизу, куди можна було б встигнути дійти за чверть години. Ці незахищені зони переважно збігалися з периферійними районами, де низька густота забудови і відсутнє метро. З початком повномасштабного вторгнення ситуація докорінно змінилася: покриття території укриттями різко зросло. У сценарії 2022 р. (воєнний, мережа електротранспорту працює) близько 85–90% міської площі опинилося в межах 15-хвилинної пішохідної доступності хоча б від одного укриття. Тобто зона прикриття фактично охопила майже всю житлову забудову міста (~ 300 км²), тоді як раніше покривала лише ~ 225 км². Візуально це проявилось у тому, що на карті доступності практично зникли великі прогалини – більшість районів стали «темнішими», тобто забезпеченими сховищами.

Необхідно зауважити, що навіть за таких умов деякі прогалини все ж залишаються. Переважно це околиці на північному сході, заході та півдні Харкова – історично приватна малоповерхова забудова, приєднані селища тощо. В цих місцевостях, як і раніше, частина жителів перебуває більш ніж за 1–1,5 км від найближчого офіційного укриття, отже за 15 хвилин середньому пішоходу важко подолати таку відстань. Крім того, доступність не завжди означає готовність: навіть якщо формально сховище розташоване в межах досяжності, мешканці можуть про нього не знати

або воно може бути зачиненим – такі проблеми відзначалися у 2022 р. в багатьох українських містах. Наше дослідження, однак, зосереджується саме на потенційній (нормативній) доступності, припускаючи інформованість населення і відкритість укриттів.

Для наочності рис. 2 ілюструє співвідношення площі районів (TAZ) та частки цієї площі, охопленої 15-хвилинними ізохронами від укриттів, у трьох сценаріях.



а)



б)



в)

Рис. 2. Охоплення території транспортних зон укриттями (15-хвилинна доступність) за різних сценаріїв (побудовано за результатами моделювання)

в PTV Visum): а) до повномасштабного вторгнення; б) під час повномасштабного вторгнення (з електроенергією); в) під час повномасштабного вторгнення (без електроенергії) «blackout»

На рис. 3 показано взаємозв'язок між площею районів та доступністю укриттів у межах 15 хвилин. Кожна точка на графіку відповідає одній зоні; її координати відображають розмір зони (по вертикалі, км²) і відсоток території зони, що покритий доступністю (по горизонталі, %). Розглянут 3 сценарії: до вторгнення, після повномасштабного вторгнення та сценарій blackout. Аналіз показує, що отримані дані, після 2022 р. зміщені значно правіше порівняно з даними до початку повномасштабного вторгнення, тобто для більшості зон показник охоплення укриттями у 2022 р. набагато вищий, ніж був до війни. Якщо у довоєнному стані багато районів мали покриття менше 50% (особливо це стосувалося великих за площею зон на околицях), то у воєнному сценарії переважна більшість зон досягли 80–100% охоплення. Значення за сценарієм blackout

практично збігаються з сценарієм після повномасштабного вторгнення, що означає: навіть за умов blackout територіальна доступність укриттів залишалася майже такою ж високою. Відключення електротранспорту та освітлення лише незначно вплинули на просторове охоплення – за нашими розрахунками, 15-хвилинна зона доступності у blackout-сценарії все ще покривала понад ~80% площі Харкова, лише трохи поступаючись показнику при працюючому міському електричному транспорті (85–90%). Це пояснюється тим, що фізично укриття нікуди не зникли і не втратили своїх захисних властивостей через брак енергії. Примітно, що усі нові укриття, створені протягом 2022 р., мають статичний характер (підвали, стаціонарні укриття-зупинки тощо) і не залежать від електрики; навіть метро в умовах відсутності поїздів лишалося доступним як сховище. Таким чином, міцна мережа укриттів, вибудована під час війни, продемонструвала стійкість до інфраструктурних збоїв – вона продовжувала захищати населення навіть за умов, коли транспорт і комунікації були частково недієздатні.

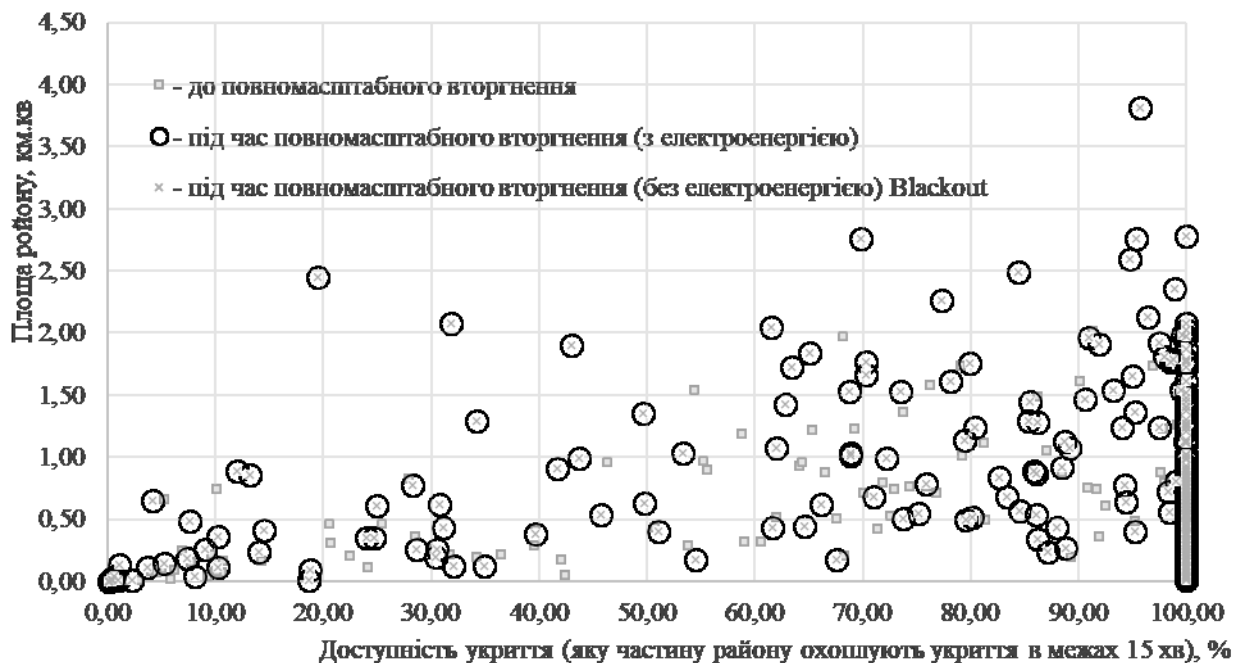


Рис. 3. Оцінка доступності укриттів у місті Харків у межах 15 хвилин

Разом з тим, динамічні аспекти доступності все ж зазнали впливу в blackout-сценарії. Якщо у 2022 р. (за наявності електротранспорту) мешканці могли потенційно скористатися громадським транспортом, щоб швидше дістатися віддаленого укриття, то під час блекауту ця можливість зникла. Практично це проявилось у зниженні показника щільності укриттів

поблизу зупинок, що при знеструмленні відсоток зупинок, з яких у пішій доступності є укриття, дещо знизився порівняно зі сценарієм працюючого електричного транспорту. Однак у контексті загальноміської доступності (коли ми не прив'язуємося до точки відправлення на зупинці) цей фактор не є визначальним – адже людина, почувши

сирену, скоріше сховається у найближчому підвалі, ніж чекатиме на транспорт. Тому територіальне покриття, як зазначалося, майже не змінилося.

Кількісні показники підтверджують надзвичайно позитивний ефект посилення мережі укриттів у Харкові. Площа міста, захищена в радіусі 15-хвилинної пішохідної доступності, збільшилась з приблизно 60% до ~85%. Іншими словами, якщо довоєнний Харків мав мало захищених локацій (здебільшого центр та кілька «острівців» на околицях), то наприкінці 2022 р. майже вся територія міста була охоплена мережею укриттів (рис. 2). Вперше з'явилися варіанти укриття для пасажирів громадського транспорту просто на зупинках – нехай їх і небагато, проте вони адресно вирішують проблему найбільш уразливих місць, де скупчуються люди. Такі нововведення, як укриття-зупинки, разом із використанням метро як бомбосховища, продемонстрували інноваційний підхід до цивільного захисту, коли звична інфраструктура набуває захисної функції.

Варто зазначити й обмеження проведеного аналізу. Модель рахує номінальну пішохідну доступність, тобто вона не враховує можливих затримок чи поведінкових факторів – реальний час реагування людей на тривогу, їхню обізнаність про укриття, наявність перепон на шляху тощо. Також ми не врахували фізичну місткість сховищ при оцінці покриття: якщо забагато людей з околиць одночасно рушать до одного підвалу, можливо, не всі зможуть розміститися, але з погляду моделі зона все одно вважається «захищеною». Попри ці спрощення, результати надають цінну картину територіальної безпеки і дозволяють виявити проблемні ділянки, що потребують уваги.

Отримані результати мають важливі наслідки як для теорії просторового планування в умовах воєнного стану, так і для практики управління міською інфраструктурою цивільного захисту. По-перше, наше дослідження продемонструвало кількісно, що екстрені заходи з облаштування нових укриттів у Харкові значно підвищили безпеку містян. Фактично, міська влада та мешканці здійснили «швидку урбаністичну адаптацію» – масове залучення існуючих підземних просторів (підвали, станції метро, переходи) для захисту життя. Це призвело до безпрецедентного зростання доступності укриттів на 30% після початку повномасштабного вторгнення. Такий стрибок у доступності не фіксувався раніше ні в одному з досліджених нами прикладів природних чи техногенних надзвичайних ситуацій. Для порівняння, плани оптимізації мережі укриттів при стихійних лихах зазвичай розраховані на роки і передбачають поступове будівництво нових сховищ або удосконалення шляхів евакуації. У Харкові ж воєнна загроза стала каталізатором негайних дій, які суттєво скоротили «білі плями» безпеки на мапі міста.

По-друге, аналіз показав, що залишаються осередки недостатньої захищеності – головним чином периферійні території з індивідуальною забудовою. Це системна проблема: такі райони історично не мали інфраструктури укриттів, і виправити ситуацію складніше, ніж у багатоповерхових кварталах. Адже в приватному секторі немає підвалів, розрахованих на масове укриття, а щільність населення нижча, тому створення стаціонарних сховищ видається менш пріоритетним в економічному плані. Тим не менш, з погляду рівності прав на безпеку, місто повинно приділити увагу «недосяжним» зонам. Наше дослідження надає конкретний перелік таких зон, вони ідентифіковані як ті, що мають низький відсоток охоплення (рис. 2). Можливі кроки це облаштування додаткових захисних споруд на межі цих районів, використання будівель соціальної інфраструктури (шкіл, лікарень) як опорних укриттів, а також забезпечення мешканців приватного сектору індивідуальними рішеннями (наприклад, модульні укриття у дворах). У низці випадків доцільним є встановлення мобільних або збірно-монолітних укриттів, які можна швидко розгорнути в місцях, де відсутні стаціонарні підвали. Таким чином, рекомендація для органів міського управління – на основі представлених карт доступності визначити перелік конкретних локацій, що нині не мають укриттів у пішій досяжності, і розробити програму їх оснащення захисними спорудами.

Теоретичний внесок дослідження полягає у поєднанні підходів транспортного планування, територіального аналізу та цивільного захисту в єдину методику оцінки «життєстійкості» міського простору. Ми застосували поняття доступності, базове для транспортної географії, в контексті безпеки, вимірявши, наскільки швидко населення може «доступитися» до укриття. Це нова інтерпретація концепції доступності, яка зазвичай використовується для оцінки під'їзду до роботи чи послуг, а не для евакуації під час обстрілу. Таким чином, наше дослідження розширює теоретичні рамки поняття міської стійкості: пропонується оцінювати її не лише через надійність інфраструктури або відновлення після удару, а й через безпосередню просторову захищеність людей в момент загрози. Цей підхід узгоджується з сучасними міждисциплінарними моделями вразливості (наприклад, концепція MOVE framework – Methods for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe [20]), що враховують не лише фізичні характеристики міст, але й можливості населення реагувати на небезпеку.

Висновки

На прикладі Харкова продемонстровано, що навіть за умов екстремального навантаження на місто можливо швидко підвищити рівень захищеності населення через раціональну мобілізацію наявних ресурсів і впровадження нових рішень. Кількість та доступність укриттів є критичною складовою безпеки: збільшення щільності укриттів у 6 разів дозволило охопити додатково близько 30–35% території міста в радіусі швидкого досягання. Це, без сумніву, врятувало багато життів і зменшило вразливість десятків тисяч мешканців. Водночас виявлено, що проблема «незахищених районів» все ще актуальна – їх потрібно брати до уваги у подальшому плануванні. Результати дослідження можуть бути використані як практичний інструмент для інших міст України та світу, що стикаються із загрозою обстрілів: запропонована методика дозволяє виявити «слабкі місця» у системі укриттів та обґрунтувати рішення щодо розміщення нових сховищ.

На загальнодержавному рівні доцільно розробити стандартизовані підходи до оцінки пішохідної доступності укриттів та впровадити їх у систему цивільного захисту. Це може включати створення постійно оновлюваних цифрових карт доступності для кожного міста (в режимі реального часу, з урахуванням стану укриттів), що допоможе оперативно інформувати населення і спрямовувати ресурси на усунення прогалин. Як підсумок, досвід Харкова слугує ілюстрацією того, що інтеграція принципів цивільного захисту в міське планування – це не опція, а необхідність. У світі, де міста все частіше стають полем бою або принаймні знаходяться під потенційною загрозою, планувальники повинні приділяти не меншу увагу бомбосховищам та евакуаційним шляхам, ніж дорогам, транспортним магістралям чи електромережам. Такий підхід сприятиме формуванню більш стійких і безпечних міст, здатних захистити своїх мешканців за будь-яких надзвичайних обставин.

Література

1. Нечаусов А. С. Методика аналізу зон пішої доступності укриттів залежно від типу балістичних снарядів за допомогою сучасних засобів геопросторового аналізу / А. С. Нечаусов, С. І. Горелик, С. М. Андрєєв, А. В. Лахтіна // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2024. – Т. 2, № 76. – С. 11–17. – Режим доступу: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/3343>.
2. Ninety per cent of war-time casualties are civilians, speakers tell Security Council as protection-of-civilians debate continues : Press Release / United Nations OCHA. – 2022. – May 25.
3. Бомбосховища Харків (Захисні споруди у Харкові: який реальний захист населення?) / Smart Media News. – 2021. – Режим доступу: <https://www.smartmedianews.org/post/%D0%B1%D0%BE%D0%BC%D0%B1%D0%BE%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B0-%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%BA%D1%96%D0%B2> (дата звернення: 19.07.2025)..
4. Shapiro M. Routinercy: Domestic securitization in contemporary Israel / M. Shapiro, N. Bird-David // Environment and Planning D: Society & Space. – 2017. – Vol. 35, № 4. – P. 637–655. – DOI: 10.1177/0263775816677550.
5. Bird-David N. Domesticating Spaces of Security in Israel / N. Bird-David, M. Shapiro // Spaces of Security / S. Low, M. Maguire (eds.). – NYU Press, 2019. – P. 163–184. – Режим доступу: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.18574/nyu/9781479863013.003.0008/pdf>.
6. Tun E. Emergency shelter location–allocation analysis with time–varying demand / E. Tun, T. Nishikiori, V. Varghese, M. Chikaraishi, M. Seike, A. Fujiwara // Asian Transport Studies. – 2024. – Vol. 10. – P. 100152. – DOI: 10.1016/j.eastsj.2024.100152.
7. de Albuquerque N. L. B. A multicriteria decision model to improve emergency preparedness: Locating–allocating urban shelters against floods / N. L. B. de Albuquerque, L. B. L. da Silva, M. H. Alencar, A. T. de Almeida // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2024. – Vol. 11. – P. 104695. – DOI: 10.1016/j.ijdr.2024.104695.
8. Zhonghui J. Integrated approach for flood shelter site selection and emergency response accessibility analysis at the provincial scale: a case study in Henan, China / J. Zhonghui, H. Zheng, Z. Jiaxuan // Journal of Water and Climate Change. – 2024. – Vol. 15, № 10. – P. 5291–5308. – DOI: 10.2166/wcc.2024.475.
9. Zhong G. Spatial Allocation of Shelters Considering the Blockage Effect on Roads during an Earthquake / G. Zhong, G. Zhai, W. Chen, X. Lin, W. Zhai // Natural Hazards Review. – 2024. – Vol. 25, № 1. – P. 04023050. – DOI: 10.1061/NHREFO.NHENG-1706.
10. Geng S. Two-stage multi-objective emergency evacuation and rescue strategy under earthquake disasters / S. Geng, X. Shi, Z. Zhou // Journal of Natural Disasters. – 2024. – Vol. 33, № 4. – P. 118–129. – DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0411.
11. Chang K.-H. Shelter location–allocation problem for disaster evacuation planning: A simulation optimization approach / K.-H. Chang, Y.-J. Pan, H. Chen // Computers and Operations Research. – 2024. – Vol. 171. – P. 106784. – DOI: 10.1016/j.cor.2024.106784.
12. Sirbiladze G. Humanitarian Relief Logistics Fuzzy Planning Model for the Shelters Location Selection and Evacuation of Victims in the Disaster Region / G. Sirbiladze, J. Kacprzyk, R. Khurodze, B. Ghvaberidze, B. Midodashvili, B. Matsaberidze, I. Khutsishvili // Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences. – 2024. – Vol. 18, № 2. – P. 44–51.
13. Sotelo-Salas C. A multi-objective optimization model for planning emergency shelters after a tsunami / C. Sotelo-Salas, C. A. Monardes-Concha, F. Pérez-Galarce, R. Santa González // Socio-Economic Planning Sciences. – 2024. – Vol. 93. – P. 101909. – DOI: 10.1016/j.seps.2024.101909.
14. Geng S. A dynamic multi-objective model for emergency shelter relief system design integrating the supply and demand sides / S. Geng, H. Hou, Z. Zhou // Natural

Hazards. – 2024. – Vol. 120, № 3. – P. 2379–2402. – DOI: 10.1007/s11069-023-06280-8.

15. Han T. Smart-Guided Pedestrian Emergency Evacuation in Slender-Shape Infrastructure with Digital Twin Simulations / T. Han, J. Zhao, W. Li // Sustainability (Switzerland). – 2020. – Vol. 12. – P. 1–18. – DOI: 10.3390/su12229701.

18. Relief Logistics / P. Praneetpholkrang, S. Kanjanawattana // International Journal of Knowledge and Systems Science (IJKSS). – IGI Global, 2021. – Vol. 12, № 2. – P. 52–68.

19. Sharbaf M. Risk-based shelter network design in flood-prone areas: An application to Haiti / M. Sharbaf, V. Bélanger, M. Cherkesly, M. Rancourt, G. M. Toglia // Omega. – 2025. – Vol. 131. – P. 103194. – DOI: 10.1016/j.omega.2024.103194.

20. Chen W. Assessing emergency shelter demand using POI data and evacuation simulation / W. Chen, Y. Fang, Q. Zhai, W. Wang, Y. Zhang // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2020. – Vol. 9, № 1. – P. 41. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/ijgi9010041>.

21. Birkmann J. Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework / J. Birkmann, O. D. Cardona, M. L. Carreño, A. H. Barbat, M. Pelling, S. Schneiderbauer, ... P. Zeil // Natural Hazards. – 2013. – Vol. 67, № 2. – P. 193–211. – DOI: 10.1007/s11069-013-0558-5.

References

1. Nechausov, A. S., Gorelik, S. I., Andreev, S. M., & Lakhtina, A. V. (2024). Methodology for analyzing pedestrian accessibility zones of shelters depending on the type of ballistic projectiles using modern geospatial analysis tools. *Systemy Upravlinnia, Navihatsii ta Zviazku. Zbirnyk Naukovykh Prats*, 2(76), 11–17. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/3343>.

2. United Nations OCHA. (2022, May 25). *Ninety per cent of war-time casualties are civilians, speakers tell Security Council as protection-of-civilians debate continues* [Press release].

3. Smart Media News. (2021). Bomb shelters Kharkiv (Protective structures in Kharkiv: What is the real protection for the population?). <https://www.smartmedianews.org/post/%D0%B1%D0%BE%D0%BC%D0%B1%D0%BE%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B0-%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%BA%D1%96%D0%B2>.

4. Shapiro, M., & Bird-David, N. (2017). Routinergency: Domestic securitization in contemporary Israel. *Environment and Planning D: Society & Space*, 35(4), 637–655. <https://doi.org/10.1177/0263775816677550>.

5. Bird-David, N., & Shapiro, M. (2019). Domesticating spaces of security in Israel. In S. Low & M. Maguire (Eds.), *Spaces of security* (pp. 163–184). NYU Press. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.18574/nyu/9781479863013.003.0008/pdf>.

6. Tun, E., Nishikiori, T., Varghese, V., Chikaraishi, M., Seike, M., & Fujiwara, A. (2024). Emergency shelter location-allocation analysis with time-varying demand. *Asian Transport Studies*, 10, 100152. <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2024.100152>.

7. de Albuquerque, N. L. B., da Silva, L. B. L., Alencar, M. H., & de Almeida, A. T. (2024). A multicriteria decision model to improve emergency preparedness: Locating-allocating urban shelters against floods.

16. Ariyachandra M. R. M. F. Digital Twin Smart Cities for Disaster Risk Management: A Review of Evolving Concepts / M. R. M. F. Ariyachandra, G. Wedawatta // Sustainability (Switzerland). – 2023. – Vol. 15.

17. Praneetpholkrang P. A Novel Approach for Determining Shelter Location-Allocation in Humanitarian

International Journal of Disaster Risk Reduction, 11, 104695. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104695>.

8. Zhonghui, J., Zheng, H., & Jiaxuan, Z. (2024). 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*, 15(10), 5291–5308. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.475>.

9. Zhong, G., Zhai, G., Chen, W., Lin, X., & Zhai, W. (2024). Spatial allocation of shelters considering the blockage effect on roads during an earthquake. *Natural Hazards Review*, 25(1), 04023050. <https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-1706>.

10. Geng, S., Shi, X., & Zhou, Z. (2024). Two-stage multi-objective emergency evacuation and rescue strategy under earthquake disasters. *Journal of Natural Disasters*, 33(4), 118–129. <https://doi.org/10.13577/j.jnd.2024.0411>.

11. Chang, K.-H., Pan, Y.-J., & Chen, H. (2024). Shelter location-allocation problem for disaster evacuation planning: A simulation optimization approach. *Computers and Operations Research*, 171, 106784. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106784>.

12. Sirbiladze, G., Kacprzyk, J., Khurodze, R., Ghvaberidze, B., Midodashvili, B., Matsaberidze, B., & Khutsishvili, I. (2024). Humanitarian Relief Logistics Fuzzy Planning Model for the Shelters Location Selection and Evacuation of Victims in the Disaster Region. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 18(2), 44–51.

13. Sotelo-Salas, C., Monardes-Concha, C. A., Pérez-Galarce, F., & Santa González, R. (2024). A multi-objective optimization model for planning emergency shelters after a tsunami. *Socio-Economic Planning Sciences*, 93, 101909. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.101909>.

14. Geng, S., Hou, H., & Zhou, Z. (2024). A dynamic multi-objective model for emergency shelter relief system design integrating the supply and demand sides. *Natural Hazards*, 120(3), 2379–2402. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06280-8>.

15. Han, T., Zhao, J., & Li, W. (2020). Smart-guided pedestrian emergency evacuation in slender-shape infrastructure with digital twin simulations. *Sustainability (Switzerland)*, 12, 1–18. <https://doi.org/10.3390/su12229701>.

16. Ariyachandra, M. R. M. F., & Wedawatta, G. (2023). Digital twin smart cities for disaster risk management: A review of evolving concepts. *Sustainability (Switzerland)*, 15.

17. Praneetpholkrang, P., & Kanjanawattana, S. (2021). A novel approach for determining shelter location-allocation in humanitarian relief logistics. *International Journal of Knowledge and Systems Science (IJKSS)*, 12(2), 52–68.

18. Sharbaf, M., Bélanger, V., Cherkesly, M., Rancourt, M., & Toglia, G. M. (2025). Risk-based shelter network design in flood-prone areas: An application to Haiti. *Omega*, 131, 103194. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103194>.

19. Chen, W., Fang, Y., Zhai, Q., Wang, W., & Zhang, Y. (2020). Assessing emergency shelter demand using POI data and evacuation simulation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1), 41. <https://doi.org/10.3390/ijgi9010041>.

20. Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Zeil, P. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework. *Natural Hazards*, 67(2), 193–211. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5>.

Рецензент: д-р техн. наук, доц. Д.П. Понкратов,

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ГАЛКІН Андрій Сергійович
доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – andriy.galkin@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3505-6170>

Автор: САМЧУК Ганна Олександрівна
кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – ganna.samchuk@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9890-6374>

Автор: ЛИФЕНКО Сергій Едуардович
аспірант кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – sergii.lyfenko@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9418-3033>

Автор: БОЦМАН Анастасія Олексіївна
аспірант кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – anastasiya.botsman@kname.edu.ua

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0308-0339>

Автор: БРАТЕРСЬКА Наталія Миколаївна
аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – nataliia.braterska@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3812-1219>

Автор: ГРЕКОВА Олеся Олександрівна
аспірант кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – olesia.hriekova@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2088-6828>

Автор: ДРОБОТОВА Євгенія Миколаївна
молодший науковий співробітник
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – yevheniia.drobotova@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0177-1290>

Автор: ТОЛМАЧОВ Ілля Олександрович
асистент кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – ilya.tolmachov@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6433-4630>

ASSESSMENT OF SPATIAL ACCESSIBILITY OF SHELTERS FOR TRANSPORT SYSTEM USERS IN CITY OF KHARKIV

A. Galkin, G. Samchuk, S. Lyfenko, A. Botsman, N. Braterska, O. Hriekova, Y. Drobotova, I. Tolmachov
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

This article presents a comprehensive assessment of the 15-minute walking accessibility of civil protection shelters in Kharkiv, Ukraine, across three critical scenarios: (i) before a full-scale invasion, (ii) during the invasion (the active war period with an operational power grid), and (iii) the wartime “black out” stage characterised by prolonged electricity shortages. The study integrates fine-grained urban zoning (348 transport analysis zones), GIS techniques, and network-based modelling performed in PTV VISUM. Each scenario was evaluated for shelter density (units/km²) and the proportion of zone area falling within a 15-minute pedestrian isochrone. Results reveal that the accelerated wartime expansion of the shelter stock, primarily through the mobilisation of residential basements and the installation of reinforced concrete “shelter stops”, increased the mean shelter density from 0.25 to 1.56 units/km² and raised the city-wide coverage of the 15-minute catchment from 60 % to 85 %. Underground metro stations and legacy Soviet bomb shelters, once the main protective resource, were rapidly complemented by hundreds of newly certified basements, effectively closing many spatial safety gaps. Yet, several low-density peripheral districts remain outside the normative walking radius, highlighting persistent spatial inequities. The proposed workflow enables municipal planners to pinpoint these residual vulnerabilities and to prioritise additional shelters or mobile protective modules. By embedding the criterion of safety accessibility into classic transport accessibility analytics, the paper contributes a novel operational layer to urban resilience theory and provides a transferable methodological template for conflict-affected cities worldwide. Findings underscore that civil protection objectives must be explicitly integrated into transport and land use planning if cities are to protect their residents throughout the entire travel chain – from origin to public transport stop, to destination under conditions of modern warfare. The study expands the classical concept of transport accessibility by incorporating the criterion of safe accessibility, thereby introducing a new dimension into the theory and practice of developing sustainable urban systems.

Keywords: shelter, space-time accessibility, transport modelling, PTV VISUM, civil protection.