

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра соціально-економічної географії та регіонознавства
імені Костянтина Нємця

*До захисту допущено
кафедрою соціально-економічної географії та регіонознавства
імені Костянтина Нємця,
протокол № _____ від _____*

завідувач кафедри _____ Катерина СЕГІДА

« ____ » _____ 2026 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

**ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНЦЕПЦІЇ РОЗУМНОГО МІСТА У
ПІСЛЯВОЄННОМУ ВІДНОВЛЕННІ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА В
УКРАЇНІ**

Спеціальність 106 Географія

Освітня програма Економічна, соціальна географія та регіональний
розвиток

Виконавець _____ Олег ДЗЮБА

Науковий керівник _____ Сергій КОСТРІКОВ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ДОСТУПНОСТІ ТА МОЖЛИВОСТІ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ SMART MOBILITY	10
1.1. Концепція Smart City та smart mobility у сучасних містах.....	10
1.2. Транспортна доступність як складова сталого міського розвитку	14
РОЗДІЛ 2. ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ТА ІНТЕГРАЦІЯ ДАНИХ ДЛЯ ПРОЄКТІВ «ЦИФРОВЕ МІСТО».....	18
2.1. Теоретичні основи геопросторового аналізу в контексті цифрового міста	18
2.2. Використання Карт Глобального Покриття (КГП) та геоситуаційний аналіз.....	20
2.2.1. OpenStreetMap (OSM) та інструменти агрегації даних (Overpass Turbo)	20
2.2.2. Динаміка та статика урбаністичних геоситуацій: концептуалізація ...	22
2.2.3. Застосування Change Detection (CD) для моніторингу змін	23
2.3 Аналіз транспортної інфраструктури за допомогою ГІС-аналізу	24
РОЗДІЛ 3. ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ДОСТУПНОСТІ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ м. ХАРКІВ.....	28
3.1. Джерела даних та інструменти дослідження	28
3.2. Підготовка та обробка даних	29
3.3. Методика геопросторового аналізу	31
3.4. Аналіз доступності по адміністративних районах міста.....	35
3.5. Результати аналізу транспортної доступності	37
3.6. Висновки та рекомендації.....	38
ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	43

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі досліджено транспортну доступність міста Харків у контексті реалізації концепції Smart City із використанням геоінформаційних систем та відкритих геопросторових даних.

Метою роботи є оцінка просторової доступності громадського транспорту м. Харків на основі геоінформаційного аналізу з використанням відкритих геопросторових даних, виявлення територіальних особливостей транспортного забезпечення міста та визначення просторових відмінностей транспортної доступності в умовах реалізації концепції Smart City.

Об'єктом дослідження є транспортна інфраструктура міста Харків.

Предметом дослідження є геопросторові особливості доступності громадського транспорту та методи їх аналізу засобами GIS.

У роботі використано методи геоінформаційного аналізу, зокрема буферний аналіз, просторове моделювання, операції просторового перетину, картографічну візуалізацію даних та порівняльно-географічний метод. Інформаційною базою дослідження стали відкриті геопросторові дані платформи OpenStreetMap, сервісу Overpass Turbo та програмне забезпечення QGIS.

У результаті дослідження сформовано базу просторових даних транспортної інфраструктури міста Харків та проведено аналіз транспортної доступності адміністративних районів міста. Встановлено нерівномірність транспортного покриття території міста: найвищий рівень транспортної доступності характерний для центральних районів, тоді як периферійні території мають нижчий рівень забезпеченості громадським транспортом. Визначено, що в умовах воєнних викликів транспортна система міста набуває особливого значення для забезпечення мобільності населення та підтримання функціонування міського середовища.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання результатів дослідження для планування розвитку транспортної інфраструктури, оптимізації маршрутної мережі громадського транспорту та реалізації принципів Smart City у міському управлінні.

Ключові слова: Smart City, геоінформаційні системи, GIS-аналіз, транспортна доступність, громадський транспорт, OpenStreetMap, QGIS, геопросторовий аналіз, транспортна інфраструктура, цифрове місто.

ABSTRACT

The qualification paper examines the transport accessibility of the city of Kharkiv in the context of the implementation of the Smart City concept using geographic information systems and open geospatial data.

The aim of the study is to assess the spatial accessibility of public transport in Kharkiv based on geoinformation analysis using open geospatial data, to identify territorial features of the city's transport provision, and to determine spatial differences in transport accessibility within the framework of the Smart City concept.

The object of the study is the transport infrastructure of the city of Kharkiv.

The subject of the study is the geospatial features of public transport accessibility and methods of their analysis using GIS technologies.

The study applies methods of geoinformation analysis, including buffer analysis, spatial modeling, spatial overlay operations, cartographic data visualization, and the comparative-geographical method. The information base of the research includes open geospatial data from the OpenStreetMap platform, the Overpass Turbo service, and QGIS software.

As a result of the study, a spatial database of Kharkiv's transport infrastructure was created and an analysis of transport accessibility within the administrative districts of the city was conducted. The research revealed an uneven distribution of transport coverage across the city: the highest level of transport accessibility is characteristic of the central districts, while peripheral areas demonstrate a lower level of public transport provision. It was determined that under wartime conditions the city's transport system acquires particular importance in ensuring population mobility and maintaining the functioning of the urban environment.

The practical significance of the study lies in the possibility of using the obtained results for planning the development of transport infrastructure, optimizing public transport routes, and implementing Smart City principles in urban management.

Keywords: Smart City, geographic information systems, GIS analysis, transport accessibility, public transport, OpenStreetMap, QGIS, geospatial analysis, transport infrastructure, digital city.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

CD — Change Detection

GIS – Geoinformation System

IoT — Internet of Things

LoD — Level of Detail

OSM — OpenStreetMap

ГІС — геоінформаційні систем

КГП — карт глобального покриття

ПЦМ — проект цифрового міста

ВСТУП

В умовах сучасної урбанізації міста відіграють дедалі важливішу роль у соціально-економічних та технологічних перетвореннях. Зростання чисельності міського населення, ускладнення міських процесів та підвищення навантаження на інфраструктуру формують потребу у впровадженні ефективних механізмів управління міським середовищем [3,58]. Одним із ключових й дуже перспективних напрямів сучасного урбаністичного розвитку є реалізація концепції Smart City (Розумного Міста), яка передбачає використання цифрових технологій, геоінформаційних систем та відкритих даних для підвищення ефективності функціонування міста та покращення якості життя населення [7,8,13,14,28,38,50, 51].

Важливим компонентом функціонування Розумного Міста є транспортна система, оскільки саме транспортна доступність значною мірою визначає рівень мобільності населення, ефективність міської інфраструктури та просторову організацію міського середовища [10,33]. Ефективне функціонування громадського транспорту є необхідною умовою сталого розвитку міста, зниження транспортного навантаження та забезпечення комфортного міського середовища.

У сучасних урбаністичних дослідженнях особливого значення також набуває використання геоінформаційних систем (ГІС) та відкритих геопросторових даних для аналізу міської транспортної інфраструктури. Геоінформаційні технології дозволяють здійснювати просторовий аналіз транспортних мереж, оцінювати рівень покриття територій громадським транспортом, виявляти проблемні ділянки міського середовища та формувати інформаційну основу для прийняття управлінських рішень [25,42].

Одним із найбільш доступних джерел відкритих геопросторових даних є платформа карт глобального покриття (КГП) OpenStreetMap, яка забезпечує можливість отримання актуальної інформації про транспортну інфраструктуру міста. Використання відкритих даних у поєднанні з геоінформаційними

системами створює ефективний інструментарій для реалізації принципів Smart City та розвитку цифрового міського середовища [25, 46].

Особливо актуальним є дослідження транспортної доступності великих міст України, які характеризуються складною просторовою структурою, значною територіальною диференціацією та високим рівнем навантаження на транспортну систему. Зазначені обставини в умовах війни додатково ускладнюються руйнуванням транспортної інфраструктури, змінами у функціонуванні маршрутної мережі, підвищенням навантаження на окремі види транспорту та необхідністю забезпечення стійкості транспортного сполучення в умовах безпекових викликів. У цьому контексті місто Харків є важливим об'єктом дослідження, оскільки характеризується розвиненою мережею громадського транспорту та розгалуженою структурою транспортних зв'язків.

У зв'язку з цим актуальним є проведення геопросторового аналізу доступності громадського транспорту м. Харків із використанням сучасних геоінформаційних методів та відкритих геопросторових даних.

Об'єкт дослідження

Транспортна інфраструктура міста Харків у воєнний час

Предмет дослідження

Геопросторові особливості доступності громадського транспорту та методи їх аналізу засобами ГІС у площині майбутньої реалізації концепції Smart City

Мета дослідження

На основі геоінформаційного аналізу з використанням відкритих геопросторових даних оцінити просторову доступність громадського транспорту м. Харків в умовах війни, виявити її просторові особливості та визначити територіальні відмінності в контексті майбутньої реалізації концепції Smart City для цього міста.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні підходи до концепції Smart City;

2. Дослідити роль геоінформаційних систем у розвитку цифрового міста;
3. Охарактеризувати можливості використання відкритих геопросторових даних OpenStreetMap;
4. Здійснити збір та підготовку даних про транспортну інфраструктуру м. Харків;
5. Провести буферний аналіз транспортної доступності у прифронтовому місті;
6. Оцінити рівень покриття громадським транспортом адміністративних районів міста;
7. Визначити територіальні відмінності транспортної доступності м. Харків.

Теоретичною основою дослідження стали наукові праці, присвячені концепції Smart City, цифровому місту, урбаністичним дослідженням та використанню геоінформаційних систем у вказаних предметних галузях. У роботі використано дослідження N. Komninos, A. Caragliu, M. Batty, M. Haklay, а також праці українських дослідників у сфері урбаністики та геоінформаційного аналізу.

Методичною базою дослідження є методи просторового ГІС-аналізу, зокрема буферний аналіз, просторове моделювання, операції просторового перетину, картографічна візуалізація даних та порівняльно-географічний метод.

Інформаційну базу роботи становили відкриті геопросторові дані платформи OpenStreetMap, дані сервісу Overpass Turbo, а також програмне забезпечення вільного розповсюдження – ГІС-платформа QGIS (3.44.8).

Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування для аналізу транспортної доступності, планування розвитку транспортної інфраструктури, оптимізації маршрутної мережі громадського транспорту та реалізації різноманітних проєктів у рамках концепції Розумного Міста.

РОЗДІЛ 1. Теоретико-методологічні основи дослідження транспортної доступності та можливості імплементації Smart Mobility

1.1. Концепція Smart City та smart mobility у сучасних містах

У ХХІ столітті процеси урбанізації, стрімке зростання населення міст і збільшення навантаження на міську інфраструктуру зумовили необхідність пошуку нових підходів до управління міським середовищем. Однією з найбільш поширених концепцій сучасного міського розвитку стала концепція «Smart City» («розумне місто»), яка передбачає інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у систему управління містом з метою підвищення якості життя населення, ефективного використання ресурсів та забезпечення сталого розвитку [9,10, 33].

Згідно із сучасними підходами, Smart City визначається як місто, у якому цифрові технології, інформаційно-комунікаційні системи та автоматизовані інструменти управління використовуються для оптимізації функціонування міської інфраструктури, транспортних систем, енергетичних мереж, комунальних послуг та адміністративного управління [2,12,23,27,30,37,41,45,47,57,60]. Основною метою концепції є формування комфортного, безпечного та екологічно збалансованого міського середовища.

У науковій літературі поняття Smart City не має єдиного універсального визначення та часто розглядається як багатокомпонентна і міждисциплінарна концепція. Деякі дослідники характеризують Smart City як «fuzzy concept» — поняття з нечіткими межами та широким спектром трактувань, що поєднує технологічні, економічні, соціальні та управлінські аспекти міського розвитку. Зокрема, А. Caragliu, С. Del Bo та Р. Nijkamp наголошують, що концепція Smart City охоплює не лише впровадження цифрових технологій, а й розвиток людського капіталу, соціальної взаємодії, креативної економіки та сталого використання міських ресурсів [10]. У зв'язку з цим Smart City доцільно розглядати як комплексну модель розвитку міста, що поєднує технологічні інновації із соціально-економічними та екологічними цілями.

У сучасних дослідженнях Smart City також розглядається як цілісна (holistic) модель міського розвитку [2], у межах якої цифрові технології інтегруються з міською інфраструктурою, економічною діяльністю, екологічними системами та сферою міських послуг. Такий підхід передбачає взаємодію транспортної інфраструктури, систем управління, енергетичних ресурсів, безпеки, охорони здоров'я, освіти та інших міських сервісів у межах єдиного міського середовища. Особлива увага приділяється розвитку інтелектуальної інфраструктури, сталому використанню ресурсів, просторовій організації міста та підвищенню якості життя населення [4].

В межах цього бачення Michael Batty підкреслює, що сучасне місто необхідно розглядати як “обчислювану систему” (computable city), де просторові процеси можуть бути формалізовані та змодельовані за допомогою цифрових інструментів геоаналізу [42].

Додатково, у роботах Li, Batty та Goodchild зазначається, що розвиток real-time GIS дозволяє здійснювати аналіз міського середовища у режимі реального часу, що є ключовим елементом концепції Smart City. Це створює нові можливості для оперативного управління транспортом, інфраструктурою та міськими сервісами [44].

Однією з найбільш поширених моделей структурування Smart City є підхід, запропонований дослідниками Віденського технологічного університету [23], відповідно до якого Smart City включає шість основних складових: smart economy, smart mobility, smart environment, smart people, smart living та smart governance. Взаємодія цих компонентів забезпечує комплексний розвиток міського середовища та створює умови для підвищення ефективності управління містом, транспортної доступності, якості послуг і екологічної стійкості.

Концептуальна структура Smart City як цілісної системи міського розвитку представлена на рис. 1.1. Схема демонструє взаємозв'язок між основними складовими Smart City, серед яких mobility, infrastructure, ecosystem, urban services та economic activity. У центрі концепції перебуває людина та якість її життя, тоді як цифрові технології й інтелектуальна інфраструктура виступають

інструментами забезпечення сталого та ефективного функціонування міського середовища.

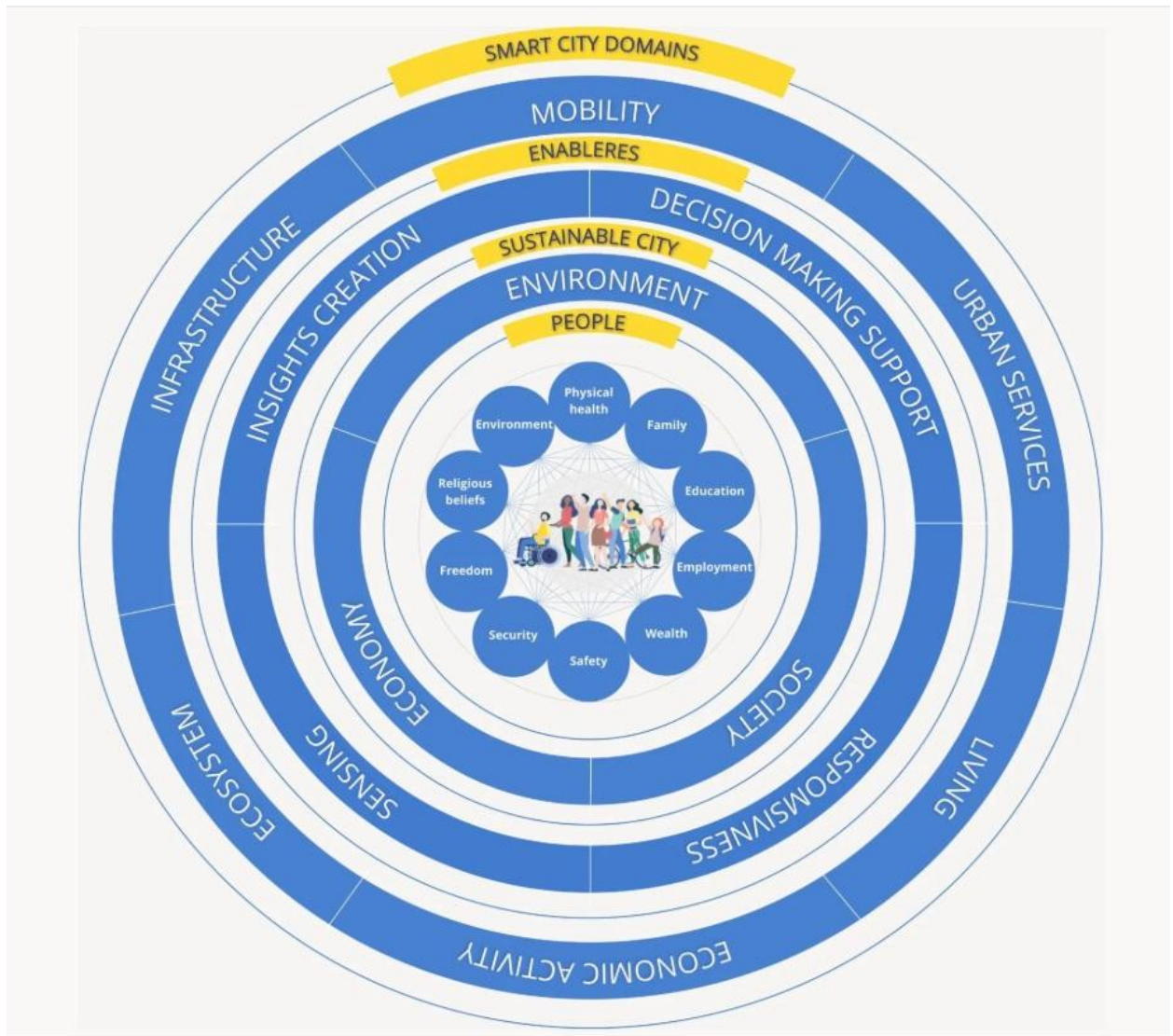


Рис. 1.1. Smart city ecosystem.

Джерело [4].

Важливу роль у функціонуванні Smart City відіграють технології Internet of Things (IoT), які забезпечують автоматизований збір, передачу та обробку даних у режимі реального часу [5]. У межах міського середовища IoT-технології використовуються для моніторингу транспортних потоків, управління вуличним освітленням, контролю споживання енергії та функціонування систем безпеки [31]. Використання цифрових платформ, сенсорних систем і автоматизованих механізмів управління формує основу так званої smart infrastructure —

інтелектуальної інфраструктури міста, що забезпечує координацію транспортних, енергетичних та інформаційних систем.

Одним із базових принципів концепції Smart City є також sustainable urban development — сталий міський розвиток [19, 48]. Його сутність полягає у забезпеченні балансу між економічним розвитком, соціальними потребами населення та збереженням навколишнього середовища. У межах концепції сталого розвитку особлива увага приділяється енергоефективності, розвитку громадського транспорту, скороченню викидів парникових газів, підвищенню транспортної доступності та формуванню комфортного міського простору [41].

Однією з ключових складових Smart City є smart mobility, яка охоплює не лише транспортне переміщення людей і вантажів, а й цифровий обмін інформацією в межах міського середовища [54]. У сучасних дослідженнях поняття mobility розглядається ширше, ніж традиційне розуміння транспорту, оскільки воно включає просторовий контекст переміщення, доступність інфраструктури та взаємодію транспортної системи з міським середовищем [4]. Такий підхід є особливо важливим для досліджень smart mobility, оскільки дозволяє розглядати транспортну систему як складову комплексного міського простору.

За підходом А. Orłowski та Р. Romanowska, основою smart mobility є використання інформаційно-комунікаційних технологій (ICT), які забезпечують збір, аналіз та передачу даних для оптимізації транспортних процесів [47]. До складових smart mobility належать інтелектуальні транспортні системи (ITS), цифрові сервіси громадського транспорту, системи спільної мобільності, велосипедна інфраструктура та інтеграція різних видів транспорту в єдину мультимодальну систему. Важливу роль у функціонуванні smart mobility відіграють big data, data analytics та автоматизовані системи управління, які дозволяють здійснювати моніторинг транспортних потоків у режимі реального часу та підвищувати ефективність функціонування транспортної мережі [16,29].

Сучасні підходи до smart mobility також передбачають орієнтацію на потреби населення та підвищення якості користувацького досвіду (user

experience). Реалізація smart mobility ґрунтується на взаємодії органів управління, транспортних операторів, бізнесу та мешканців міста у межах спільного бачення розвитку міської мобільності. Важливими напрямками розвитку smart mobility є скорочення транспортних витрат, зменшення заторів, зниження рівня забруднення та шумового навантаження, підвищення безпеки й забезпечення більш ефективного та комфортного пересування населення [44].

Важливу роль у функціонуванні smart mobility відіграють геоінформаційні системи (ГІС) та просторовий аналіз даних, які забезпечують можливість моделювання транспортних потоків, оцінки транспортної доступності та підтримки управлінських рішень у сфері міської мобільності [35]. Використання ГІС-технологій дозволяє аналізувати просторову структуру транспортної мережі, визначати проблемні ділянки транспортної інфраструктури та оцінювати ефективність функціонування міських транспортних систем на основі урбогеосистемного підходу [36].

Таким чином, концепція Smart City (Розумне Місто) є комплексною моделлю розвитку сучасного міського середовища, що передбачає інтеграцію цифрових технологій, інноваційних управлінських підходів та принципів сталого розвитку для підвищення якості життя населення і ефективності функціонування міських систем. У межах цієї концепції Smart Mobility виступає одним із ключових напрямів, оскільки забезпечує оптимізацію транспортних потоків, підвищення доступності та безпеки перевезень, зниження негативного впливу транспорту на довкілля, а також сприяє формуванню технологічно інтегрованого та стійкого міського простору.

1.2. Транспортна доступність як складова сталого міського розвитку

У сучасних підходах до сталого міського розвитку транспортна доступність розглядається не лише як характеристика переміщення населення, а як комплексний елемент функціонування міського середовища. На думку А. Orłowski та Р. Romanowska, ефективна система міської мобільності формується завдяки збалансованому розвитку технічної та інформаційної інфраструктури,

способів пересування населення, а також відповідного нормативно-правового забезпечення [47]. Дослідники наголошують, що всі складові системи мобільності є взаємопов'язаними, а їх розвиток має бути орієнтований насамперед на підвищення якості життя мешканців міста, а не лише на формування позитивного іміджу території.

У сучасних дослідженнях транспортна доступність розглядається як комплексна характеристика взаємодії транспортної системи, просторової структури міста та повсякденної діяльності населення. Доступність визначається не лише наявністю транспортної інфраструктури, а й можливістю мешканців швидко та зручно дістатися до місць роботи, навчання, отримання послуг, рекреаційних і соціальних об'єктів. Важливе значення при цьому має просторове розміщення основних центрів активності та рівень їх взаємозв'язку в межах міської транспортної мережі [38].

Сучасні підходи до аналізу транспортної доступності ґрунтуються на концепції мультимодальності, яка передбачає інтегроване функціонування різних способів пересування: громадського транспорту, пішохідного руху, велосипедного транспорту та приватних автомобілів. Ефективна транспортна система повинна забезпечувати високу частоту сполучень, зручність пересадок, узгодженість маршрутної мережі та інтеграцію транспорту з міською забудовою [4, 23, 47, 44].

Дослідники також наголошують на важливості так званого «мережевого ефекту», відповідно до якого ефективність транспортної системи визначається не окремими маршрутами, а рівнем взаємозв'язку між елементами мережі. Саме тому оцінювання транспортної доступності передбачає аналіз не лише географічної відстані, а й часу поїздки, кількості пересадок, інтенсивності транспортного сполучення та рівня зв'язаності міських територій [52].

Для комплексного дослідження транспортної доступності використовується система індикаторів, що дозволяє оцінити рівень забезпечення населення транспортними послугами, ефективність функціонування

транспортної мережі та ступінь інтеграції окремих територій у межах міського простору.

У межах даного дослідження доцільно зосередити увагу на тих індикаторах транспортної доступності, які найбільш повно відображають просторову організацію транспортної мережі, рівень забезпечення населення транспортними послугами та можливості повсякденної мобільності мешканців. Особливу цінність для дослідження мають показники, що можуть бути проаналізовані за допомогою ГІС-інструментів та дозволяють оцінити як територіальне охоплення транспортної системи, так і ефективність зв'язків між окремими елементами міського простору [39].

У контексті дослідження транспортної доступності як складової сталого міського розвитку найбільш релевантними є індикатори охоплення транспортної мережі (Network Coverage), 30-хвилинної доступності (Thirty-Minute Contour Catchments), просторової наближеності (Closeness Centrality), зв'язаності транспортної мережі (Degree Centrality) та вузлової зв'язаності (Nodal Connectivity) [11]. Зазначені показники дозволяють оцінити рівень доступності громадського транспорту для населення, ефективність транспортних зв'язків, зручність пересадок та ступінь інтегрованості міської транспортної системи.

Аналіз транспортної доступності має важливе практичне значення у процесах міського планування та управління розвитком територій. Результати таких досліджень можуть використовуватися під час стратегічного планування міського розвитку, визначення пріоритетів транспортної інфраструктури, оцінювання доступності житлових районів, а також при формуванні політики розвитку громадського транспорту, пішохідного та велосипедного руху. Крім того, аналіз доступності дозволяє оцінити рівень забезпечення населення доступом до основних міських функцій — місць праці, освіти, медичних та торговельних послуг [22,35,38]. Така результативна оцінка стає критичною для міста, як є функціонує під час воєнного стану.

У контексті сталого міського розвитку транспортна доступність розглядається як один із ключових чинників формування комфортного,

інтегрованого та соціально орієнтованого міського середовища, оскільки рівень доступності безпосередньо впливає на мобільність населення, ефективність використання міського простору та якість життя мешканців [3,47].

Одним із важливих аспектів транспортної доступності є її соціальний вимір. Рівень доступу до транспортних послуг значною мірою визначає можливості населення щодо працевлаштування, освіти, отримання медичних послуг та участі у суспільному житті. Нерівномірний розвиток транспортної інфраструктури може призводити до формування територій із обмеженою мобільністю населення та поглиблення соціально-просторової нерівності.

Особливого значення питання транспортної доступності набуває для маломобільних груп населення, осіб похилого віку, людей з інвалідністю та жителів периферійних районів міст. У цьому контексті забезпечення рівного доступу до транспортної системи розглядається як одна з передумов формування інклюзивного та соціально орієнтованого міського середовища.

Таким чином, транспортна доступність є однією з ключових складових сталого міського розвитку, оскільки визначає рівень мобільності населення, ефективність функціонування міського простору та доступ до основних міських функцій. Сучасні підходи до її дослідження базуються на комплексному аналізі транспортної мережі, мультимодальності та просторової організації міського середовища. Використання системи індикаторів і ГІС-технологій дозволяє здійснювати об'єктивне оцінювання транспортної доступності та формувати науково обґрунтовані підходи до планування й модернізації міської транспортної інфраструктури [10,19].

РОЗДІЛ 2. ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ТА ІНТЕГРАЦІЯ ДАНИХ ДЛЯ ПРОЄКТІВ «ЦИФРОВЕ МІСТО»

2.1. Теоретичні основи геопросторового аналізу в контексті цифрового міста

Концепція Smart City (Розумного Міста) упродовж останніх десятиліть стала одним із провідних підходів до модернізації міського середовища, орієнтованим на підвищення ефективності управління міськими системами, раціональне використання ресурсів та покращення якості життя населення шляхом упровадження інформаційно-комунікаційних технологій. Водночас подальший розвиток цифрових технологій, поширення великих масивів даних (Big Data), штучного інтелекту, інтернету речей та цифрових платформ зумовили поступовий перехід від концепції Smart City до ширшого поняття Digital City (Цифрового міста).

На відміну від Smart City, де основна увага зосереджується переважно на інтелектуалізації окремих міських систем і сервісів, концепція Цифрового міста передбачає глибоку цифрову трансформацію всіх сфер міського функціонування та управління. Йдеться не лише про впровадження технологічних рішень, а й про створення єдиного цифрового середовища, у межах якого інтегруються транспортна інфраструктура, комунальні служби, системи безпеки, електронне урядування, цифрові сервіси для населення та механізми взаємодії між владою, бізнесом і громадою.

У цьому контексті, наприклад, Smart Mobility трансформується з окремого елемента «розумної» транспортної системи у складову цілісної цифрової екосистеми міста, де транспортні процеси функціонують на основі постійного обміну даними, автоматизованого управління та прогностичної аналітики. Такий підхід забезпечує не лише підвищення ефективності транспортного обслуговування, а й посилює адаптивність та стійкість міського середовища, що набуває особливого значення в умовах сучасних соціально-економічних і безпекових викликів.

Сучасні дослідження урбанізованих територій базуються на концепції цифрового міста (Digital City) та цифрового двійника (Digital Twin City), які передбачають формування інтегрованої цифрової моделі міського середовища [13,28,56]. Такі моделі поєднують геопросторові дані, статистичну інформацію та дані дистанційного зондування Землі для підтримки аналізу, моделювання та управління міськими процесами у реальному часі.

Геопросторовий аналіз у цифрових міських системах базується на інтеграції різномірних джерел даних. Сучасні дослідження підкреслюють, що ефективні цифрові моделі міст повинні забезпечувати сумісність різних типів даних (interoperability), включаючи векторні геодані, растрові знімки та дані сенсорних систем [6].

Окрему роль у формуванні цифрових міських моделей відіграє концепція багат шарового представлення простору (multi-layer spatial representation), де кожен шар відображає окремий аспект міського середовища: транспортну мережу, щільність населення, землекористування або функціональне зонування. Такий підхід дозволяє виконувати комплексний просторовий аналіз і виявляти приховані закономірності розвитку міських систем.

Важливим напрямом є також використання великих геоданих (big geodata) та машинного навчання для просторового аналізу [34]. Як зазначають дослідники, сучасні методи штучного інтелекту суттєво розширюють можливості аналізу міських процесів і дозволяють підвищити точність просторових моделей [55].

Особливе значення у цифрових міських проєктах має концепція цифрових моделей територій та 3D міського моделювання [5, 40]. У систематичному огляді Rahman S. A. (2024) підкреслюється, що інтеграція 3D міських моделей і геопросторових даних є ключовою основою для прийняття рішень у сфері урбаністичного планування та розвитку Smart City [49].

У межах цифрових міських систем геопросторовий аналіз реалізується через використання спеціалізованих методів просторової обробки даних. До

найбільш поширених належать мережевий аналіз (network analysis), буферний аналіз (buffer analysis), накладання просторових шарів (overlay analysis), аналіз щільності та просторової доступності. Застосування цих методів дозволяє оцінювати транспортну доступність, просторову структуру міста, розміщення об'єктів інфраструктури та характер функціонального використання територій.

Важливим джерелом геопросторових даних у проєктах цифрового міста є матеріали дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та карти глобального покриття території (Land Cover Maps) [20,61]. Такі дані дозволяють здійснювати класифікацію землекористування, аналіз урбанізованих територій, виявлення змін забудови та оцінку просторової структури міського середовища [9]. Інтеграція супутникових даних у ГІС-системи значно розширює можливості моніторингу міських процесів та підтримки управлінських рішень.

Таким чином, геопросторовий аналіз у контексті цифрового міста є міждисциплінарним напрямом, що поєднує геоінформаційні системи, урбаністику, комп'ютерні науки та аналіз великих даних. Його основною метою є створення інтегрованих моделей міського середовища для підтримки прийняття ефективних управлінських рішень.

В умовах цифровізації українських міст геоінформаційні системи дедалі активніше використовуються для управління транспортною інфраструктурою, моніторингу забудови та підтримки міського планування [38].

2.2. Використання Карт Глобального Покриття (КГП) та геоситуаційний аналіз

2.2.1. *OpenStreetMap (OSM) та інструменти агрегації даних (Overpass Turbo)*

Наповнення ПЦМ даними може здійснюватися за допомогою карт глобального покриття (КГП), таких як OpenStreetMap (OSM). Одним із найбільш поширених джерел відкритих геопросторових даних є OSM. Naklay та Weber зазначають, що OSM є прикладом краудсорсингової геоінформаційної системи, у якій користувачі самостійно створюють та оновлюють картографічні

дані [26]. Проєкт «Цифрове Місто» може бути агрегований з даних OSM, оскільки сучасні ГІС-платформи можуть бути підключені до онлайнових сховищ просторових даних [15,17,56,59]. У цьому відношенні загальну концептуальну схему можна подати наступним чином (рис. 2.2.1).

Ілюстрація демонструє процес інтеграції географічних даних з відкритих джерел, таких як OSM, у цифрові моделі міського середовища відповідно до рівнів деталізації CityGML. Ліворуч зображено карту з контурами забудови, що відповідає рівню LoD1 — базовому представленням будівель у вигляді екструдованих блоків. У центрі розміщено стилізовану хмару та ноутбук, які символізують програмне й апаратне забезпечення з доступом до хмарних сервісів, що забезпечують обробку, зберігання та візуалізацію просторових даних.



Рис. 2.2.1. Інтеграція геоданих з відкритих джерел (наприклад, OpenStreetMap) у цифрові моделі забудови рівнів LoD1–LoD2 за допомогою хмарних програмно-апаратних платформ (авторська ілюстрація)

Праворуч — модель будівлі LoD2 з деталізованим дахом, вікнами та прибудовою, яка демонструє підвищений рівень геометричної точності.

Рис. 2.2.1 наочно демонструє, як дані з OSM можуть бути агреговані та трансформовані в тривимірні моделі забудови, що використовуються в проєктах «Цифрове Місто». Ілюстрація підкреслює роль хмарних платформ у забезпеченні доступу до онлайнових сховищ просторової інформації та в реалізації геоінформаційних процесів. Такий підхід дозволяє створювати масштабовані, актуальні та функціональні цифрові представлення міського простору, що важко переоцінити у аспекті реалізації КРМ (концепція розумного міста).

Для запитів до OSM використовується веб-інструмент *Overpass Turbo*, який дозволяє фільтрувати та завантажувати будь-які доступні дані (наприклад, точковий шар лікарень) для будь-якої території через спеціальні API-запити. Ці дані можуть бути експортовані у форматі *.GeoJSON*, який може бути прочитаний ГІС-платформою [38].

Процедура завантаження даних включає кілька кроків:

1. Визначення тегу (tag), що використовується для фільтрації об'єктів (наприклад, *building=hospital* для лікарень).
2. Використання інструменту *Query Wizard* у *Overpass Turbo* для введення виразу, наприклад: *'building=hospital in Kharkiv'*.
3. Запуск запиту та відображення відповідних об'єктів на інтерактивній карті.
4. Експорт вибраних об'єктів, наприклад, у формат *.GeoJSON*.

Ця легкість взаємодії з даними OSM є важливою для швидкого наповнення цифрової моделі міста актуальними даними.

2.2.2. Динаміка та статика урбаністичних геоситуацій: концептуалізація

Геоситуаційний аналіз є важливою процедурою в рамках ПЦМ. Урбаністична геоситуація є скоріше дослідницькою конструкцією і відповідає категорії урбаністичного середовища. На відміну від неї, урбаністична конфігурація швидше пов'язана з прямим (статичним або динамічним) виглядом фізичного простору міста [16,34,38].

ПЦМ (проект цифрового міста) дозволяє створювати множинні шари одних і тих же об'єктів, де кожен шар візуалізує різні характеристики. Перемикаючись між цими шарами, дослідник може спостерігати *перерозподіл урбаністичних геоситуацій* на основі конкретного досліджуваного атрибута.

Головна перевага ПЦМ у контексті геоситуаційного аналізу полягає у здатності інтегрувати різні параметри досліджуваного міста. Наприклад, шляхом накладання шарів щільності населення, енергоспоживання будівель та кліматичних зон можна виділити *якісно нові патерни урбаністичних геоситуацій*, що може допомогти у виявленні проблемних районів (наприклад, з низькою енергоефективністю).

2.2.3. Застосування *Change Detection (CD)* для моніторингу змін

Порівняно зі статичними геоситуаціями, агрегація ПЦМ динамічними геоситуаціями є більш складним питанням, що вимагає повторних зйомок, точних сенсорів та надійної апаратної платформи. У цьому допомагає техніка *Change Detection (CD)*, реалізована, наприклад, у авторському програмному забезпеченні *CCM* [65].

Інструмент *CD (Виокремлення Змін)* призначений для моніторингу *архітектурних (геометричних) змін* у місті за певний часовий проміжок. Він працює шляхом автоматичного порівняння та аналізу *двох наборів лідарних точкових хмар*, розділених часовим проміжком (первинний та вторинний набори).

Метод *CD*, закладений у *CCM*, охоплює три фундаментальні аспекти, необхідні для комплексного 3D-виявлення змін:

1. Узгодження систем координат.
2. Порівняння просторових та спектральних характеристик.
3. Відображення та аналіз виявлених змін.

Виявлені зміни класифікуються як *Added (додані)* або *Removed (видалені)*, що відповідає "новій (частині)" через та "знесеній (частині)" забудови. Ця техніка була успішно нами застосована під час навчання роботи з *CCM* до відкритих лідарних даних міських ділянок у Таллінні, Естонія (національний [геопортал](#)

просторових даних), дозволивши окреслити зміни в міських конфігураціях, відображених динамічними геоситуаціями (рис. 2.2.2).

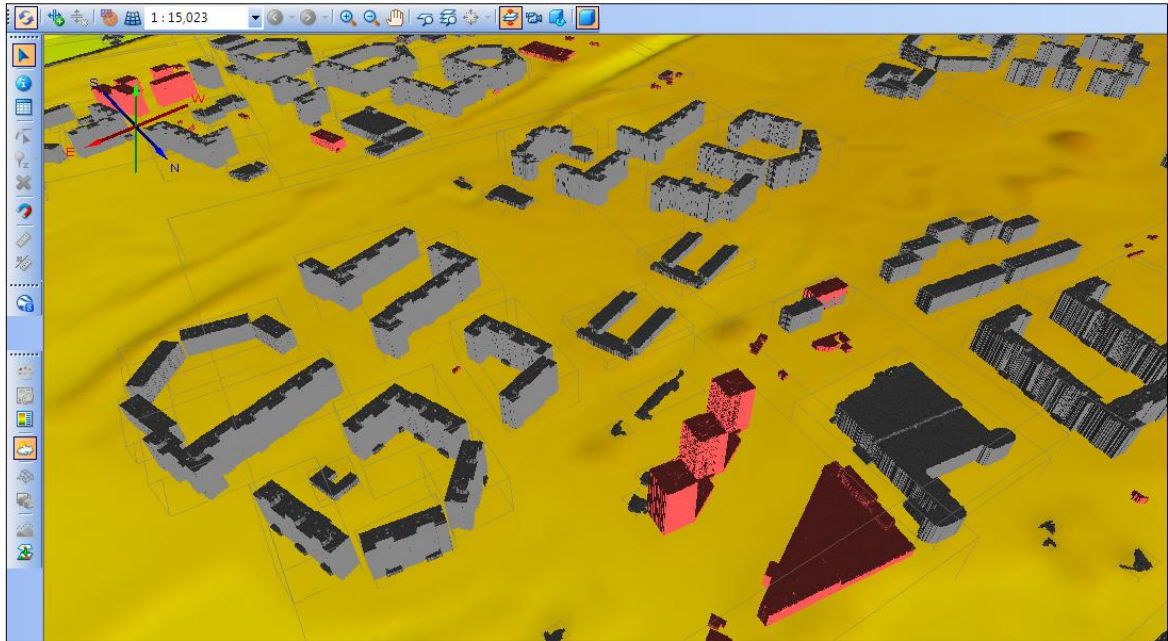


Рис. 2.2.2. Виокремлення змін у міській забудові району *Lasnamae* (м. Таллінн, Естонія): Інтерфейс *ССМ* візуалізує зміни (червоним) у 2019-2021 рр.
(авторська ілюстрація)

2.3 Аналіз транспортної інфраструктури за допомогою ГІС-аналізу

Геопросторовий аналіз є одним із ключових інструментів сучасних геоінформаційних систем, що використовується для дослідження просторово прив'язаних даних та виявлення закономірностей у територіальній організації об'єктів і процесів. У контексті транспортної інфраструктури ГІС-аналіз дозволяє оцінювати доступність транспортних об'єктів, визначати зони обслуговування, аналізувати щільність дорожньої мережі, а також моделювати просторові взаємозв'язки між елементами міського середовища [39].

До основних методів геопросторового аналізу належать накладання шарів (overlay analysis), буферний аналіз (buffering), мережевий аналіз (network analysis), просторове моделювання та візуалізація даних. Особливе значення для дослідження транспортної інфраструктури має буферний аналіз, який дозволяє визначати території в межах заданої відстані від транспортних об'єктів [53].

Буферний аналіз (buffer analysis) полягає у створенні буферних зон навколо просторових об'єктів на визначеній відстані. Такі зони можуть формуватися навколо точкових, лінійних або полігональних об'єктів. У транспортних дослідженнях буферизація використовується для оцінки пішохідної доступності зупинок громадського транспорту, аналізу впливу дорожньої мережі та визначення територій транспортного обслуговування населення [35,63].

У ГІС-аналізі транспортної інфраструктури важливе значення мають поняття просторової близькості, відстані та доступності. Відстань визначає можливість доступу населення до транспортних послуг, об'єктів соціальної інфраструктури та міських функцій. Саме тому аналіз транспортної системи тісно пов'язаний із дослідженням просторових взаємозв'язків між об'єктами міського середовища.

Буферний аналіз зазвичай базується на визначенні відстані «по прямій» (bird flight distance). Проте в транспортних дослідженнях фактичне пересування населення відбувається дорожньою мережею, що включає повороти, перехрестя, бар'єри та особливості міської забудови. У зв'язку з цим ГІС-аналіз транспортної доступності часто поєднує буферизацію із мережевим аналізом транспортної інфраструктури.

Одним із найважливіших напрямів застосування ГІС у транспортному плануванні є аналіз транспортної доступності (accessibility analysis). За допомогою геоінформаційних систем можливо оцінювати просторову доступність зупинок громадського транспорту, соціальної інфраструктури, робочих місць та інших об'єктів міського середовища [1]. ГІС дозволяє моделювати транспортні маршрути, визначати часові витрати на пересування та аналізувати ефективність функціонування транспортної мережі.

У сучасних ГІС-дослідженнях транспортної інфраструктури доступність розглядається не лише як географічна відстань між об'єктами, а як комплексний показник, що включає час пересування, наявність пересадок, пішохідну доступність та особливості транспортної мережі [2].

Практика використання ГІС у транспортному плануванні широко застосовується у країнах Європи для оцінки доступності населення до лікарень, навчальних закладів, робочих місць та інших суспільно важливих об'єктів [1]. ГІС-технології дозволяють визначати території з недостатнім рівнем транспортного обслуговування та підтримують прийняття управлінських рішень у сфері міського планування.

Мережевий аналіз у ГІС дає змогу моделювати маршрути пересування між пунктами відправлення та призначення, визначати оптимальні шляхи руху та оцінювати часові витрати на пересування в межах міської транспортної системи.

ГІС-технології також застосовуються для планування нових транспортних маршрутів, оцінювання впливу транспортних змін на мобільність населення та підтримки концепції сталого міського розвитку. Просторовий аналіз дозволяє визначати проблемні ділянки транспортної мережі та підвищувати ефективність функціонування міської транспортної системи.

Пішохідна мобільність є важливою складовою транспортної системи міста, оскільки практично кожне переміщення включає етап пішохідного доступу до транспортної інфраструктури [44]. Саме тому ГІС-аналіз транспортної доступності враховує не лише функціонування дорожньої мережі, а й умови пішохідного пересування населення.

Дослідження транспортної доступності в ГІС часто базуються на аналізі таких факторів, як відстань до транспортних вузлів, щільність забудови, структура землекористування, наявність парковок, тип вуличної мережі та бар'єри для пішохідного руху. Значний вплив на пішохідну доступність також мають змішаність функцій міського середовища та рівень розвитку громадських просторів [62].

У ГІС-дослідженнях транспортної інфраструктури поширеним підходом є побудова буферних зон навколо транспортних вузлів та зупинок громадського транспорту. Наприклад, у дослідженні системи BART для аналізу пішохідної доступності використовувалась зона радіусом 0,8 км навколо станцій, що відповідало орієнтовній пішохідній доступності населення [24].

Важливим аспектом транспортної доступності є не лише фактична відстань до транспортного об'єкта, а й сприйняття цієї відстані користувачами. Наявність широких магістралей, шумових бар'єрів, складних перехресть або недостатньо комфортного пішохідного середовища може знижувати рівень пішохідної доступності навіть за незначної географічної відстані.

Дослідження показують, що райони зі змішаною забудовою та активною комерційною функцією мають вищий рівень пішохідної доступності до громадського транспорту. Водночас великі парковки, автомобілеорієнтована інфраструктура та магістралі створюють бар'єрний ефект для пішохідного руху [64].

Отже, ГІС-аналіз є важливим інструментом дослідження транспортної інфраструктури в умовах сучасного міського розвитку. Використання методів буферного, мережевого та просторового аналізу дозволяє оцінювати транспортну доступність, визначати зони обслуговування населення та моделювати просторові взаємозв'язки між елементами міського середовища [3].

Сучасні геоінформаційні системи забезпечують можливість комплексного аналізу транспортної мережі з урахуванням не лише географічної відстані, а й особливостей дорожньої інфраструктури, пішохідної доступності, типу забудови та функціональної структури території [43].

ГІС-технології відіграють важливу роль у підтримці управлінських рішень у сфері міського планування, розвитку громадського транспорту та реалізації концепції сталого міського розвитку. Їх використання дозволяє підвищувати ефективність функціонування транспортних систем та забезпечувати більш раціональну організацію міського простору [54].

РОЗДІЛ 3. ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ДОСТУПНОСТІ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ м. ХАРКІВ

3.1. Джерела даних та інструменти дослідження

У сучасних дослідженнях концепції Smart City важлива роль відводиться геоінформаційним системам (ГІС) та аналізу просторових даних, які забезпечують можливість комплексного вивчення міського середовища. На думку Michael Batty та співавторів, цифрові технології, просторове моделювання та інтеграція геоданих є основою ефективного управління сучасним містом і формування цифрового міського середовища [42].

Для проведення дослідження використано відкриті геопросторові дані платформи OpenStreetMap, які містять інформацію про розташування об'єктів транспортної інфраструктури, дорожню мережу та елементи міського середовища. Використання відкритих даних забезпечує актуальність інформації, можливість її вільного оновлення та адаптації до потреб дослідження.

Збір даних здійснювався за допомогою сервісу Overpass Turbo шляхом формування окремих запитів для різних видів громадського транспорту. Зокрема, було отримано дані про автобусні зупинки (*highway=bus_stop*), трамвайні зупинки (*railway=tram_stop*) та станції метрополітену (*station=subway*). Такий підхід дозволив сформувати більш структурований набір просторових даних та уникнути включення нерелевантних об'єктів, зокрема міжміських залізничних станцій або технічних транспортних вузлів.

Для обробки, візуалізації та аналізу геоданих використовувалося програмне забезпечення QGIS (3.44.8), яке є однією з найбільш поширених відкритих геоінформаційних систем. Функціональні можливості QGIS дозволяють виконувати просторовий аналіз, створювати тематичні карти, проводити буферизацію, аналіз транспортної доступності та інтегрувати дані з різних джерел у єдине геоінформаційне середовище.

У межах дослідження було використано метод буферного аналізу, який дає змогу визначити зони пішохідної доступності до об'єктів громадського

транспорту. Побудова буферних зон навколо зупинок та станцій дозволяє оцінити рівень просторового покриття території міста мережею громадського транспорту та виявити ділянки з недостатнім рівнем транспортної доступності.

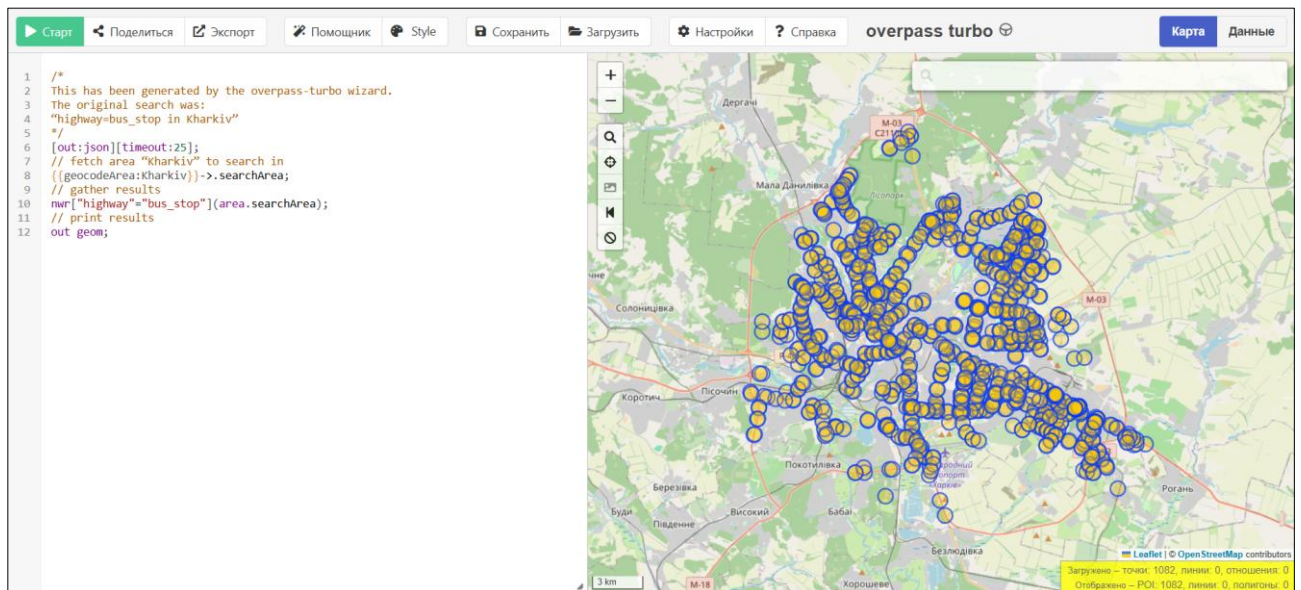


Рис. 3.1 — Приклад запиту в Overpass Turbo (авторська ілюстрація)

3.2. Підготовка та обробка даних

Отримані геопросторові дані було експортовано у форматі GeoJSON та імпортовано до середовища QGIS (3.44.8) для подальшої обробки й аналізу. Для кожного виду громадського транспорту сформовано окремі векторні шари, що дозволило виконувати їх дослідження як окремо, так і у складі єдиної транспортної системи міста.

На етапі підготовки даних здійснювалася перевірка коректності геометрії об'єктів та їх просторового розташування. Окрему увагу було приділено усуненню можливих дублювань і некоректно визначених об'єктів, які могли вплинути на результати подальшого аналізу.

З метою забезпечення точності просторових розрахунків усі шари було перепроєктовано у метричну систему координат EPSG:3857. Використання цієї системи координат дозволяє коректно виконувати операції визначення відстаней, побудови буферних зон та аналізу площ покриття транспортною мережею.

Для проведення територіального аналізу також було отримано межі адміністративних районів міста Харків за допомогою інструменту QuickOSM на основі даних OpenStreetMap. Використання адміністративного поділу дозволило виконати просторове співставлення транспортної інфраструктури з окремими частинами міста та провести порівняльний аналіз рівня транспортної доступності в межах різних районів.

На наступному етапі дослідження сформовані шари було об'єднано у єдину геоінформаційну модель транспортної інфраструктури міста. Це створило основу для подальшого виконання буферного аналізу та оцінки зон пішохідної доступності до об'єктів громадського транспорту.

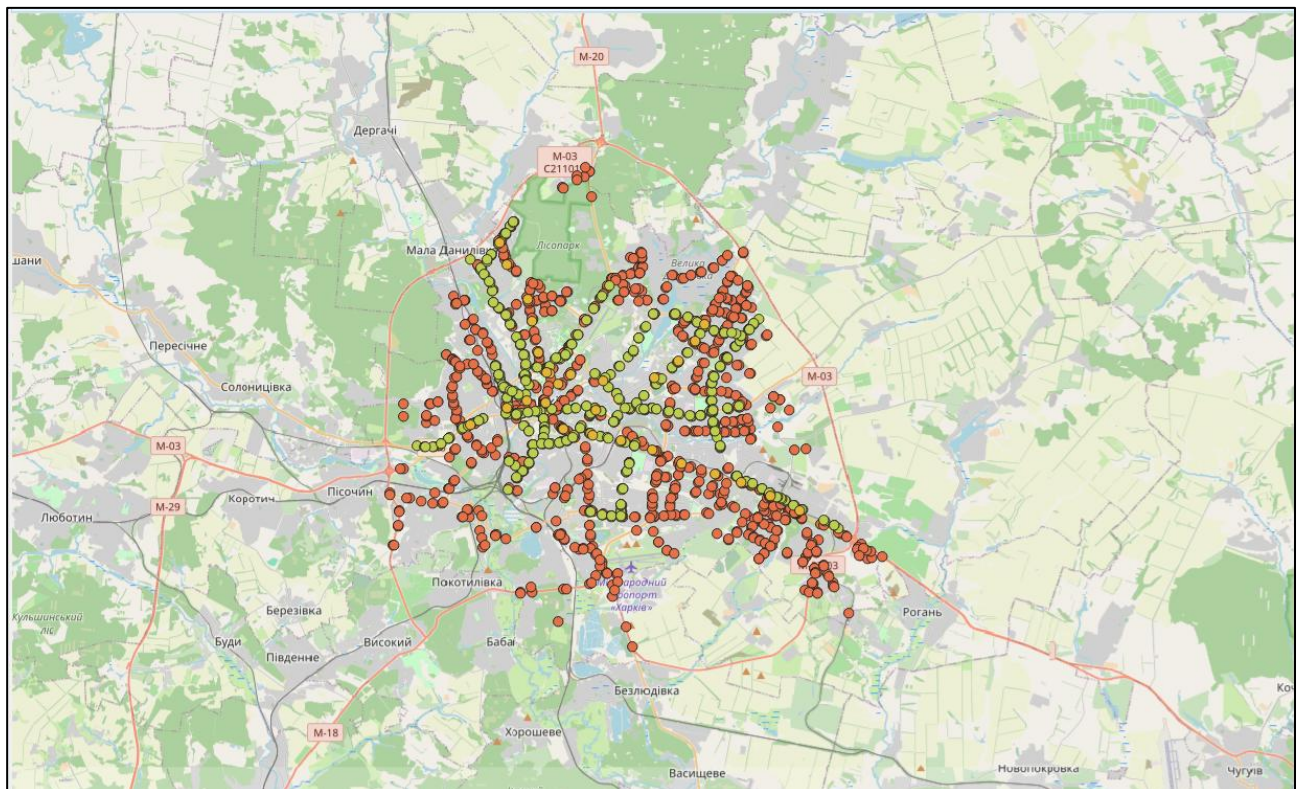


Рис. 3.2. Шари громадського транспорту в QGIS 3.44.8 (авторська ілюстрація)

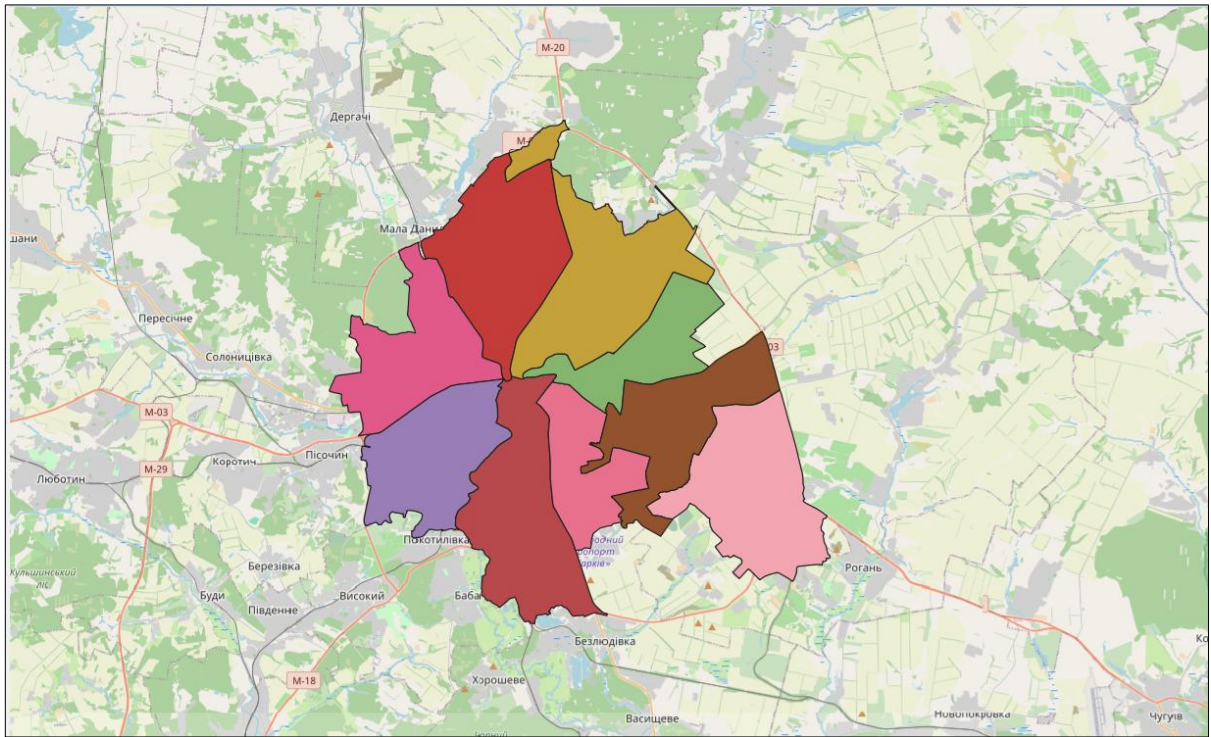


Рис. 3.3 Адміністративні райони м. Харків (авторська ілюстрація)

3.3. Методика геопросторового аналізу

Для оцінки просторової доступності громадського транспорту було застосовано метод буферного аналізу, який широко використовується у геоінформаційних дослідженнях транспортної інфраструктури. Даний метод дозволяє визначити зони пішохідної доступності навколо транспортних об'єктів та оцінити рівень покриття території міста мережею громадського транспорту.

Для кожного типу транспорту — автобусного, трамвайного та метрополітену — було побудовано окремі буферні зони радіусом 500 м. Вибір такого радіуса обумовлений тим, що дана відстань відповідає середньому радіусу комфортної пішохідної доступності та приблизно еквівалентна 5–10 хвилинам пішого пересування міським середовищем. Цей радіус широко використовується в урбаністичних і транспортно-географічних дослідженнях. Зокрема, у роботі Kaszczyszyn та Sypion-Dutkowska [21,32] зазначається, що відстань 400–500 м відповідає приблизно 5 хвилинам пішохідного руху та вважається комфортною для більшості населення. Крім того, El-Geneidy [18]. підкреслюють, що буферні

зони 400–500 м є одним із найбільш поширених підходів до оцінки доступності автобусних зупинок у міських дослідженнях.

Побудова буферних зон здійснювалася засобами QGIS із використанням інструменту *Buffer*. У результаті було сформовано окремі шари просторового покриття для кожного виду громадського транспорту, що дозволило оцінити особливості їх територіального розміщення.

На наступному етапі буферні зони різних видів транспорту було об'єднано в єдиний шар із застосуванням геоінформаційних операцій *Merge* та *Dissolve*. Це дозволило сформувати інтегровану модель транспортного покриття міста та визначити території, які мають доступ до громадського транспорту в межах встановленої пішохідної доступності.

Отримані результати дали можливість провести просторовий аналіз рівня транспортного забезпечення окремих районів міста Харків, а також виявити території з недостатнім рівнем транспортної доступності.

Наступні рис. 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 подають буферні зони окремих видів транспорту:

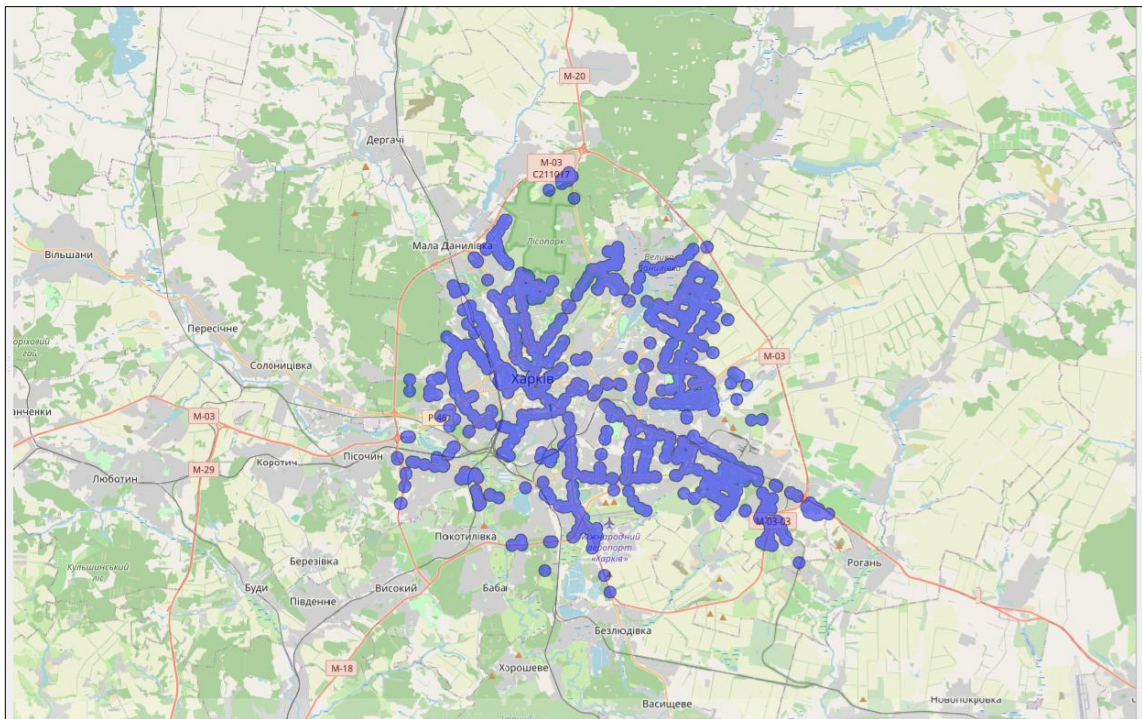


Рис. 3.4.1 Зона покриття автобусів (авторська ілюстрація)

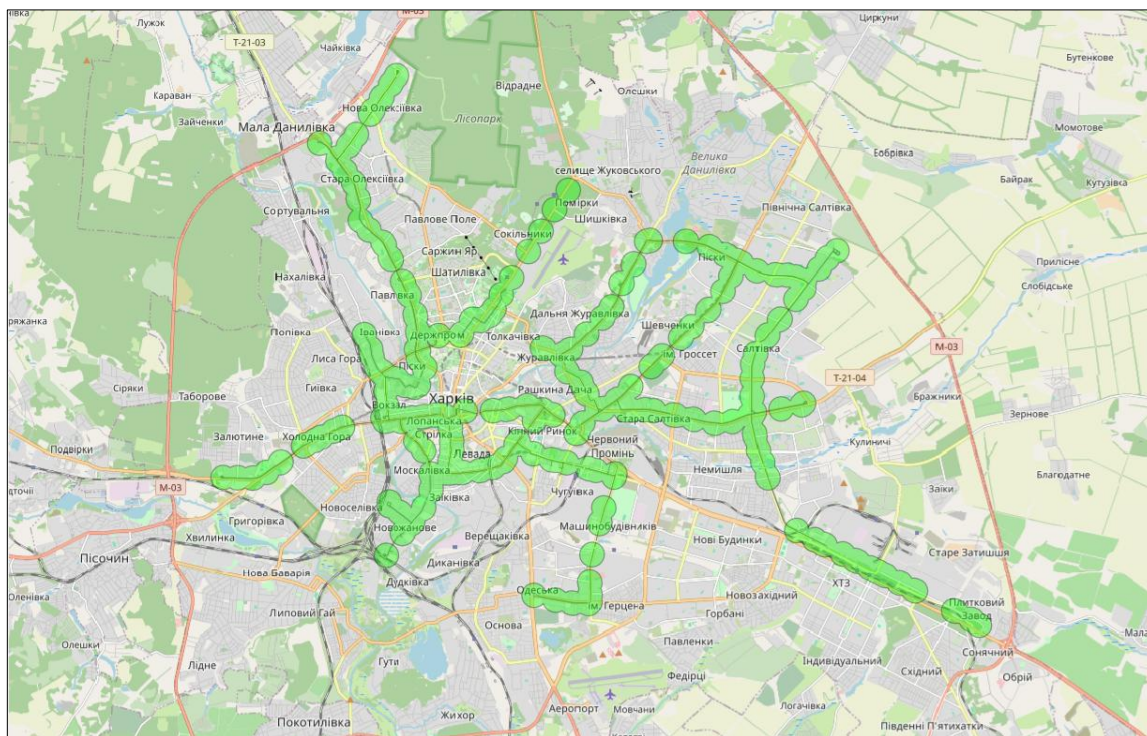


Рис. 3.4.2 Зона покриття трамваїв (авторська ілюстрація)

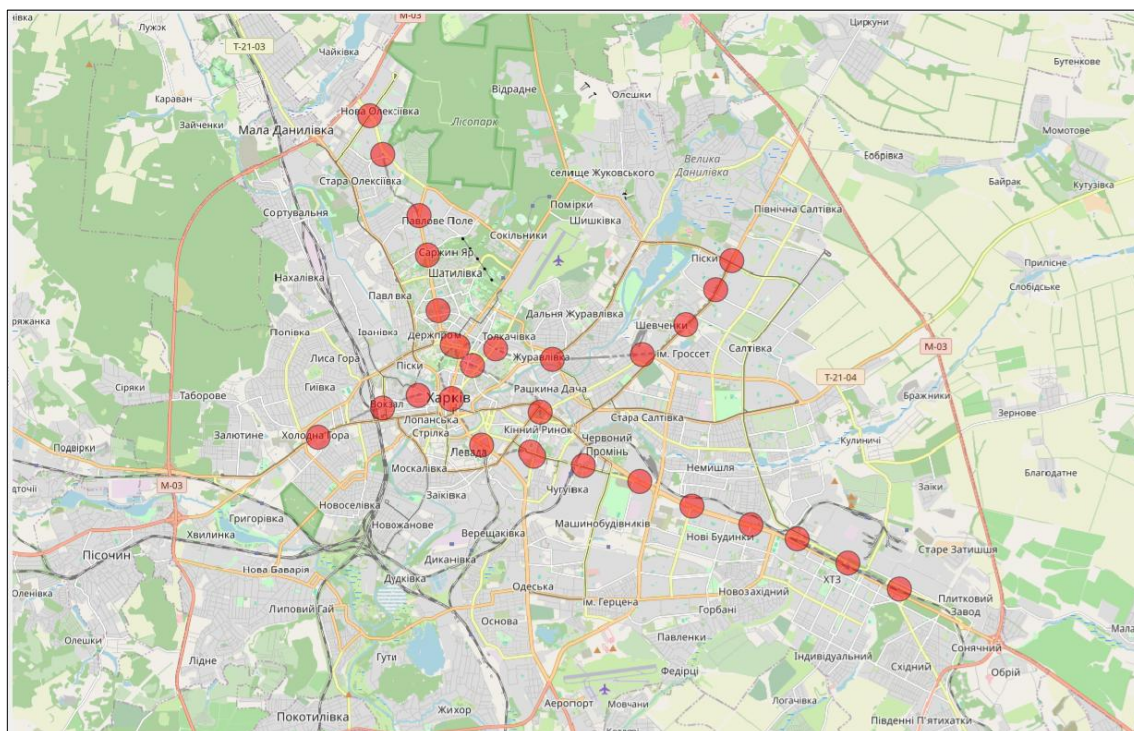


Рис. 3.4.3 Зона покриття метро (авторська ілюстрація)

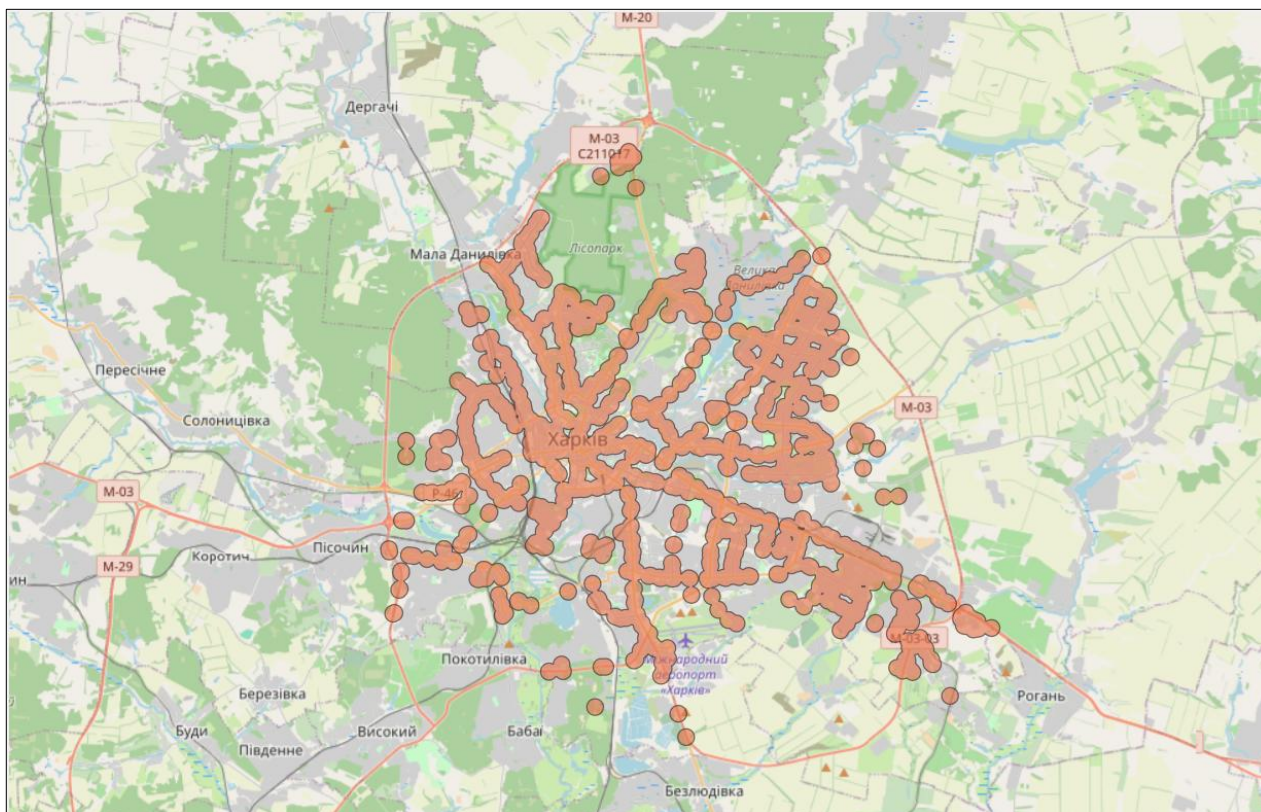


Рис. 3.5. Загальна зона покриття різними видами транспорту (авторська ілюстрація)

Результати проведеного буферного аналізу демонструють суттєві відмінності у просторовому розподілі різних видів громадського транспорту в місті Харків.

Як видно з рис. 3.4.1, автобусний транспорт характеризується найбільш широким територіальним покриттям. Автобусна мережа охоплює як центральні, так і значну частину периферійних районів міста, формуючи найбільш розгалужену систему громадського транспорту. Водночас простежується нерівномірність щільності покриття: центральні райони мають значно вищу концентрацію маршрутів і зупинок порівняно з околицями міста.

Трамвайна мережа (рис. 3.4.2) має більш лінійний характер просторового розміщення та концентрується переважно вздовж основних транспортних коридорів. На відміну від автобусного транспорту, трамвайне покриття охоплює

меншу частину території міста, однак забезпечує стабільні транспортні зв'язки між окремими районами Харкова.

Мережа метрополітену (рис. 3.4.3) характеризується високою концентрацією у центральній частині міста та вздовж основних напрямків міського розвитку. Метро забезпечує важливу роль у формуванні транспортного каркасу Харкова та виконує функцію швидкісного сполучення між районами міста.

Інтегрована карта транспортного покриття (рис. 3.5) свідчить про просторову нерівномірність транспортного забезпечення міста. Така ситуація є типовою для великих міст, де центральні райони мають вищу концентрацію транспортної інфраструктури, тоді як периферійні території часто залишаються менш забезпеченими громадським транспортом.

Проведений геопросторовий аналіз дозволяє визначити проблемні ділянки транспортного покриття та може бути використаний як основа для подальшого планування розвитку транспортної системи Харкова відповідно до принципів Smart City та сталого міського розвитку.

3.4. Аналіз доступності по адміністративних районах міста

З метою більш детального аналізу транспортної доступності інтегровану зону покриття громадського транспорту було співставлено з адміністративними районами міста Харків. Для цього у середовищі QGIS застосовано операцію просторового перетину (*Intersection*), яка дозволяє визначити частину території кожного району, що знаходиться в межах встановленої пішохідної доступності до об'єктів громадського транспорту.

У результаті виконання просторового аналізу було сформовано окремий шар перетину буферних зон із межами адміністративних районів (рис. 3.6). Це дозволило оцінити рівень транспортного забезпечення різних частин міста та виявити територіальні відмінності у доступності громадського транспорту.

На основі отриманих даних було розраховано: площу території кожного району; площу ділянок, що потрапляють у межі транспортного покриття; частку території району, забезпечену доступом до громадського транспорту.

Для визначення рівня транспортної забезпеченості районів використано наступну формулу:

$$P = \frac{S_{\text{buffer}}}{S_{\text{district}}} \times 100\%, \quad (1)$$

де:

P — рівень транспортного покриття району

S_{buffer} — площа території району в межах буферної зони

S_{district} — загальна площа району

Отримані через вираз (1) результати дали можливість провести порівняльний аналіз рівня транспортної доступності між адміністративними районами Харкова та визначити території з найбільш і найменш розвиненим транспортним покриттям.

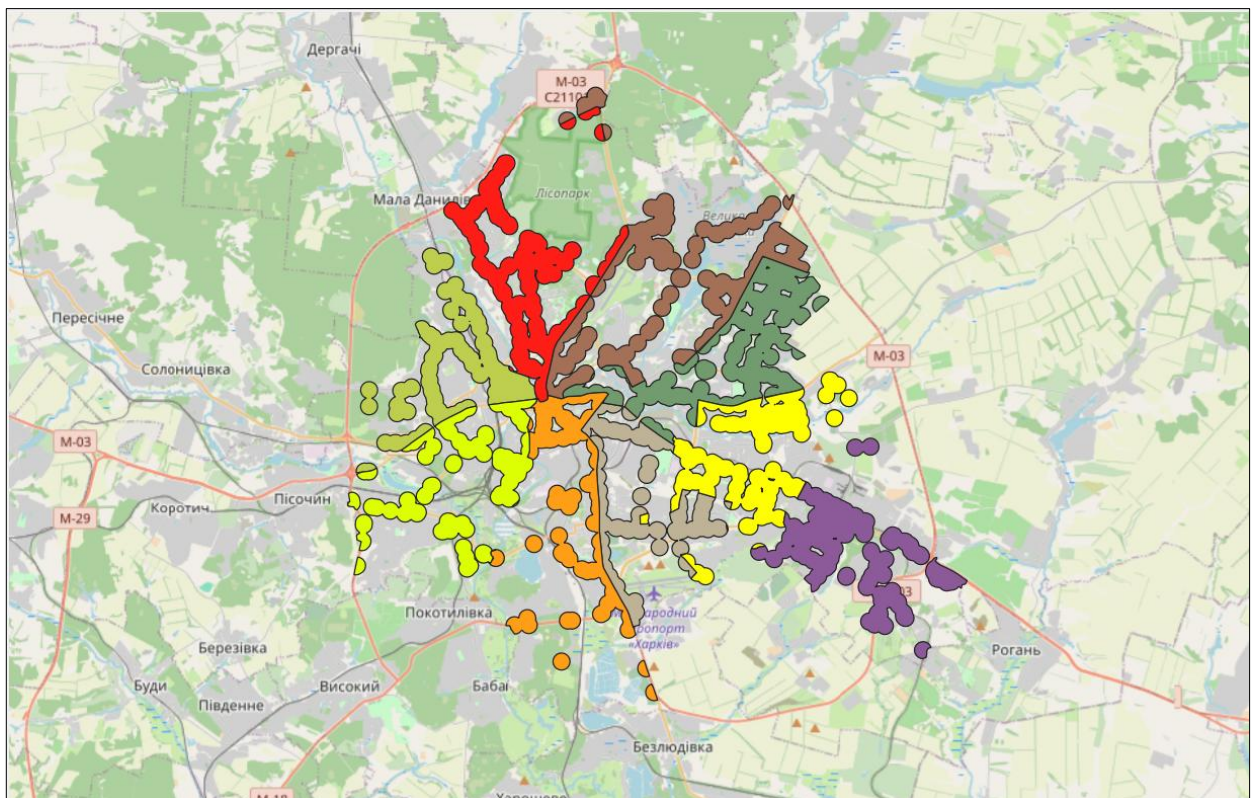


Рис. 3.6 Перетин буферів за районами (авторська ілюстрація)

3.5. Результати аналізу транспортної доступності

У результаті проведеного геоінформаційного аналізу було визначено рівень транспортної доступності адміністративних районів міста Харків на основі зон пішохідної доступності до об'єктів громадського транспорту. Аналіз здійснювався шляхом побудови буферних зон радіусом 500 м навколо зупинок автобусного, трамвайного та тролейбусного транспорту, а також станцій метрополітену.

Отримані результати свідчать про наявність суттєвої просторової диференціації транспортного забезпечення між районами міста (табл. 3.1). Рівень покриття територій транспортною інфраструктурою варіюється залежно від щільності забудови, особливостей планувальної структури міста та концентрації маршрутів громадського транспорту.

Найвищий показник транспортного покриття зафіксовано у Салтівському районі — 69,61 %. Такий результат може пояснюватися високою щільністю житлової забудови, значною концентрацією населення та розвиненою мережею громадського транспорту. Крім того, район характеризується наявністю великої кількості автобусних, тролейбусних і трамвайних маршрутів, що забезпечують високий рівень просторової доступності, не зважаючи на часті періодичні обстріли різних локацій саме у цьому адмінрайоні міста.

Високі показники також характерні для Слобідського (46,16 %), Немишлянського (42,90 %) та Київського районів (40,18 %). Їх транспортна забезпеченість значною мірою пов'язана з проходженням основних магістральних транспортних коридорів та високою концентрацією маршрутів громадського транспорту.

Найнижчий рівень транспортного покриття спостерігається в Основ'янському районі — 26,26 %. Відносно низькі показники також мають Індустріальний (34,41 %), Шевченківський (35,32 %) та Новобаварський райони (35,86 %). Це може бути пов'язано як із меншою щільністю транспортної мережі, так і зі значною площею територій, розташованих поза межами комфортної пішохідної доступності до зупинок громадського транспорту.

Загалом результати дослідження демонструють нерівномірний характер розвитку транспортної інфраструктури в межах міста Харків. Найвищий рівень транспортної доступності характерний для більш урбанізованих і функціонально активних районів, тоді як периферійні території характеризуються нижчим рівнем забезпеченості громадським транспортом.

Отримані результати підтверджують важливість використання геоінформаційних технологій для аналізу транспортної інфраструктури міста та можуть бути використані при подальшому плануванні розвитку транспортної системи Харкова відповідно до принципів Smart City і сталого міського розвитку.

Таблиця 3.1 Рівень покриття по адміністративних районах міста

Район	Рівень покриття, %
Салтівський	69,61
Слобідський	46,16
Немишлянський	42,9
Київський	40,18
Холодногірський	37,73
Новобаварський	35,86
Шевченківський	35,32
Індустріальний	34,41
Основ'янський	26,26

3.6. Висновки та рекомендації

У межах проведеного дослідження було виконано геопросторовий аналіз доступності громадського транспорту міста Харків із використанням відкритих геоданих та сучасних геоінформаційних технологій. Для аналізу використано дані платформи OpenStreetMap, а також інструменти геоінформаційної системи QGIS (3.44.8).

У ході дослідження було сформовано базу просторових даних транспортної інфраструктури міста, побудовано буферні зони пішохідної доступності для різних видів громадського транспорту та здійснено просторовий аналіз рівня транспортного покриття адміністративних районів Харкова. Отримані результати дозволили виявити територіальні особливості функціонування транспортної системи міста та оцінити рівень забезпечення населення громадським транспортом.

Результати аналізу свідчать про нерівномірний характер транспортної доступності в межах міста. Найвищий рівень транспортного забезпечення характерний для центральних та найбільш урбанізованих районів, тоді як периферійні території мають нижчий рівень покриття громадським транспортом. Виявлені територіальні відмінності можуть бути пов'язані з особливостями планувальної структури міста, щільністю забудови, концентрацією населення та розвитком транспортної мережі.

Водночас в умовах війни проблематика транспортної доступності набуває особливої актуальності. Воєнні дії суттєво впливають на функціонування міської транспортної системи через пошкодження транспортної інфраструктури, зміну маршрутної мережі, нерівномірність транспортного обслуговування окремих територій, зростання навантаження на окремі види транспорту та необхідність забезпечення безпечного й безперервного транспортного сполучення. У таких умовах транспортна система міста виконує не лише економічну та соціальну функції, а й набуває важливого значення для підтримання життєдіяльності міського середовища та забезпечення мобільності населення.

Проведене дослідження підтвердило ефективність використання геоінформаційних систем для аналізу транспортної інфраструктури та оцінки рівня транспортної доступності міського середовища. Використання відкритих геопросторових даних дозволяє оперативно здійснювати аналіз транспортного забезпечення територій, виявляти проблемні ділянки міської інфраструктури та підтримувати ухвалення управлінських рішень в умовах динамічних змін міського середовища, зокрема під час воєнних викликів.

На основі отриманих результатів можна запропонувати такі рекомендації щодо вдосконалення транспортної системи міста Харків:

1. Оптимізація маршрутної мережі громадського транспорту у районах із низьким рівнем транспортного покриття;
2. Відновлення та розвиток транспортної інфраструктури на периферійних територіях міста, що зазнали пошкоджень унаслідок воєнних дій;
3. Підвищення рівня інтеграції різних видів громадського транспорту та забезпечення стійкості транспортної системи в кризових умовах;
4. Використання геоінформаційних технологій для моніторингу транспортної доступності та підтримки управлінських рішень;
5. Подальше впровадження принципів Smart City та Digital City у сфері міського транспорту;
6. Розроблення механізмів адаптивного управління транспортною мережею в умовах надзвичайних ситуацій та воєнних загроз.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів органами місцевого самоврядування під час планування розвитку транспортної інфраструктури, оптимізації маршрутів громадського транспорту, підвищення рівня транспортної доступності населення та забезпечення стійкості функціонування транспортної системи в умовах сучасних безпекових викликів.

Перспективами подальших досліджень можуть бути аналіз часової доступності громадського транспорту, врахування інтенсивності транспортних потоків, дослідження транспортної мобільності населення, а також інтеграція ГІС-аналізу з даними про демографічну структуру та функціональне зонування міста.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі здійснено дослідження транспортної доступності міста Харків у контексті реалізації концепції Smart City із використанням сучасних геоінформаційних технологій та відкритих геопросторових даних.

У ході роботи було проаналізовано теоретичні підходи до концепції Smart City та визначено роль геоінформаційних систем у процесах цифровізації міського середовища. Встановлено, що ГІС-технології є важливим інструментом просторового аналізу міської інфраструктури, забезпечують ефективне опрацювання геоданих та створюють інформаційну основу для прийняття управлінських рішень у сфері міського розвитку.

Досліджено можливості використання відкритих геопросторових даних платформи OpenStreetMap для аналізу транспортної інфраструктури. Визначено, що відкриті дані є доступним та ефективним джерелом інформації для проведення урбаністичних досліджень, моделювання транспортних процесів і реалізації проєктів цифрового міста.

У практичній частині роботи було сформовано базу просторових даних транспортної інфраструктури м. Харків та проведено геопросторовий аналіз доступності громадського транспорту засобами геоінформаційної системи QGIS (3.44.8). На основі буферного аналізу виконано оцінку рівня транспортного покриття території міста та адміністративних районів.

За результатами дослідження встановлено, що транспортна доступність у межах Харкова характеризується нерівномірністю просторового розподілу. Найвищий рівень транспортного забезпечення спостерігається у центральних та найбільш урбанізованих районах міста, тоді як периферійні території мають нижчий рівень покриття громадським транспортом. Виявлені територіальні відмінності пов'язані з особливостями планувальної структури міста, щільністю забудови, концентрацією населення та специфікою розвитку транспортної мережі.

Дослідження показало, що в умовах воєнних викликів проблематика транспортної доступності набуває особливої актуальності. Воєнні дії суттєво

впливають на функціонування міської транспортної системи через пошкодження інфраструктури, зміни маршрутної мережі, нерівномірність транспортного обслуговування окремих територій та необхідність забезпечення безперервного транспортного сполучення. У таких умовах транспортна система виконує не лише економічну та соціальну функції, а й відіграє важливу роль у підтриманні життєдіяльності міського середовища та забезпеченні мобільності населення.

Проведене дослідження підтвердило ефективність використання геоінформаційних систем і відкритих геоданих для оцінки транспортної доступності міського середовища. ГІС-аналіз дозволяє виявляти проблемні ділянки транспортної інфраструктури, оцінювати рівень забезпеченості територій громадським транспортом та формувати аналітичну основу для подальшого вдосконалення транспортної системи міста, зокрема в умовах кризових та надзвичайних ситуацій.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання органами місцевого самоврядування під час планування розвитку транспортної інфраструктури, оптимізації маршрутної мережі громадського транспорту та реалізації принципів Smart City у міському управлінні.

Перспективними напрямками подальших досліджень є аналіз часової доступності громадського транспорту, врахування інтенсивності транспортних потоків, дослідження мобільності населення, а також інтеграція геопросторового аналізу з демографічними та соціально-економічними показниками міського середовища. Окремим напрямом подальших досліджень може бути оцінка стійкості транспортної системи міста в умовах воєнних ризиків та надзвичайних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Ballas, D., G. Clarke, R. Franklin, A. Newing (2017) GIS and the Social Sciences. <https://doi.org/10.4324/9781315759326>
- 2) Bastidas, V., López, J., & García, J. (2022). Concepts for modeling smart cities. *Sustainability*, 14(3), 1456.
- 3) Battisti, A., & Baiani, S. (2022). *Sustainable development dimensions and urban agglomeration*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94779>
- 4) Batty M. et al. Smart Cities of the Future. *The European Physical Journal Special Topics*. 2012, 214(1):481-518.
<https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
- 5) Bibri, S. E. (2018). The IoT for smart sustainable cities of the future: An analytical framework for sensor-based big data applications for environmental sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 38, 230–253.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.034>
- 6) Biljecki, F., N. Milojevic-Dupont, F. Creutzig. (2021). Open government geospatial data on buildings for planning sustainable and resilient cities.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.04023>
- 7) Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
<https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
- 8) Bonini, V., Galelli, P., Minetto, A., Delponte, I., & Morbiducci, R. (2019). Effects of the digital transformation on the contemporary city project. *Tema*, 5(1), 61–71. <https://doi.org/10.17410/tema.v5i1.215>
- 9) Buck, T., While, A., & Jonas, A. E. G. (2017). Competitive urbanism and the limits to Smart City innovation: The UK experience. *Urban Studies*, 54(2), 501–519. <https://doi.org/10.1177/0042098015597162>
- 10) Caragliu, A., Del Bo, C., & Nijkamp, P. (2011). Smart cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, 18(2), 65–82.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10630732.2011.601117>

- 11) Curtis, C. and Scheurer, J. (2016) Planning for Public Transport Accessibility: An International Sourcebook
<https://doi.org/10.4324/9781315600758>
- 12) David, M., & Kosh, F. (2019). “Smart is not smart enough!” Anticipating critical raw material use in Smart City concepts. *Resources Policy*, 63, 101407.
- 13) Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., & Yamu, C. (2020). Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*, 12(6), 2307. <https://doi.org/10.3390/su12062307>
- 14) Dobbs, R., Smit, S., Remes, J., Manyika, J., Roxburgh, C., & Restrepo, A. (2011). *Urban world: Mapping the economic power of cities*. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/urbanization/urban-world-mapping-the-economic-power-of-cities>
- 15) Dong, P., & Chen, Q. (Eds.). (2018). *LiDAR remote sensing and applications*. CRC Press. 245 p.
- 16) Eckhoff, D., & Sommer, C. (2014). Driving for big data? Privacy concerns in vehicular networking. *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 1–8.
- 17) Eckle, M., de Albuquerque, J. P., & Zipf, A. (2016). Leveraging OpenStreetMap to support flood risk management in municipalities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(2), 19.
- 18) El-Geneidy A., Grimsrud M., Wasfi R. et al. New Evidence on Walking Distances to Transit Stops. 2014.
<http://doi.org/2010.1007/s11116-013-9508-z>
- 19) Eremia, M., Toma, L., & Sanduleac, M. (2017). The Smart City concept in the 21st century. *Procedia Engineering*, 181, 12–19.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.357>
- 20) Fonte, C., Minghini, M., Antoniou, V., & See, L. (2016). Automated methodology for converting OSM data into a land use/cover map. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(10), 166.

- 21) García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J., Cardozo, O. D. Walking Accessibility to Public Transport: An Analysis Based on Microdata and GIS. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Volume 40, Issue 6
<https://doi.org/10.1068/b39008>
- 22) Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127-140.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>
- 23) Giffinger, R., & Haindl, G. (2010). Smart cities ranking: An effective instrument for the positioning of cities? *ACE: Architecture, City and Environment*, 4(12), 7–26.
- 24) Guerra, E., Cervero, R. and Daniel, M. G. (2012) ‘The Half-Mile Circle: Does It Represent Transit Station Catchments?’, *Transportation Research Journal of the Transportation Research Board*, 2276(1), 101-109.
<https://doi.org/10.3141/2276-12>
- 25) Haklay M. (2010) How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets. *SAGE Publications Volume 37, Issue 4*
<https://doi.org/10.1068/b35097>
- 26) Haklay M., Weber P. OpenStreetMap: User-Generated Street Maps // IEEE Pervasive Computing. 2008. *IEEE Pervasive Computing* 12-18, vol. 7
<https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/MPRV.2008.80>
- 27) Hall, R. E. (2000). The vision of a Smart City. *Proceedings of the 2nd International Life Extension Technology Workshop*, Paris, France.
- 28) Hämäläinen, M. (2021). Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city. *IET Smart Cities*, 3(4), 201–210.
<https://doi.org/10.1049/smc2.12015>
- 29) Hartenstein, H., & Laberteaux, K. P. (2008). A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(6), 164–171.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4539481>

- 30) Hartley, J. (2005). Innovation in governance and public services: Past and present. *Public Money & Management*, 25(1), 27–34.
- 31) Jin Y. and other (2016). Content centric routing in IoT networks and its integration in RPL, *Computer Communications*, 89-90, 87-104.
<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.03.005>
- 32) Kaszczyszyn, P., Sypion-Dutkowska, N. (2019) Walking Access to Public Transportation Stops for City Residents. A Comparison of Methods
<https://doi.org/10.3390/su11143758>
- 33) Komninos, N. (2002). *Intelligent cities: Innovation, knowledge systems and digital spaces*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203857748>
- 34) Kostrikov, S. (2025). Analyzing urban morphology changes using neural networks. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series “Geology. Geography. Ecology”*. 62, 219-236. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-17>
- 35) Kostrikov, S. V., & Sehida, K. (2016). GIS-modelling of regional commuting (a case study of Kharkiv region). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”*, 44, 123–130.
<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-44-14>
- 36) Kostrikov, S., & Seryogin, D. (2022). Urbogeosystemic approach to agglomeration study within the urban remote sensing frameworks. In A. Battisti & S. Baiani (Eds.), *Sustainable development dimensions and urban agglomeration*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102482>
- 37) Kostrikov, S., 2019. Urban Remote Sensing with LiDAR for the Smart City concept implementation. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series “Geology. Geography. Ecology”*. 50, 101-124.
<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-08>.
- 38) Kostrikov, S., Kravchenko, K., Serohin, D., Bilianska, S., Savchenko, A. 2023. The performance of the digital city projects in urban studies of the megalopolises (the case studies of Kharkiv and Dnipro cities). *Visnyk of V. N.*

- Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology. (59), 140-165. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-11>.
- 39) Kostrikov, S., Niemets, L., Sehida, K., Niemets, K., & Morar, C. (2018). Geoinformation approach to the urban geographic system research (case studies of Kharkiv region). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 49, 91–100. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09>
 - 40) Kostrikov, S., Pudlo, R., Bubnov, D., & Vasiliev, V. (2020). ELiT, multifunctional web-software for feature extraction from 3D LiDAR point clouds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 650. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110650>
 - 41) Kramers, A., Höjer, M., Lövehagen, N., & Wangel, J. (2014). Smart sustainable cities – Exploring ICT solutions for reduced energy use in cities. *Environmental Modelling & Software*, 56, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.019>
 - 42) Li, W, Batty, M., Goodchild, M. (2019). Real-time GIS for smart cities. *International Journal of Geographical Information Science Volume 34, 2019 - Issue 2* <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1673397>
 - 43) Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. Geographic Information Systems and Science. Wiley, 2015.
 - 44) McQueen, B., Safi, A. and Alkheyaili, S. (2024) Smart Mobility. *Wiley-IEEE Press*. <https://doi.org/10.1002/9781119847168>
 - 45) Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). Smart city as urban innovation: Focusing on management, policy, and context. *Proceedings of the 5th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*, 185–194. <https://doi.org/10.1145/2072069.2072100>
 - 46) Official OpenStreetMap website. <https://www.openstreetmap.org>

- 47) Orłowski, A., & Romanowska, P. (2019). Smart cities concept: Smart mobility indicator. *Cybernetics and Systems*, 50(2), 118–131.
<https://doi.org/10.1080/01969722.2019.1565120>
- 48) Osman, T. (2021). A framework for cities and environmental resilience assessment of local governments,. *Cities*, 118, 103372.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103372>
- 49) Rahman, S. A. F. (2024). Digital terrain and 3D city models for smart cities.
<https://doi.org/10.1177/21582440231220768>
- 50) Rezende, D. A. (2016). Digital city projects: Information and public services offered by Chicago (USA) and Curitiba (Brazil). *International Journal of Knowledge Society Research*, 7(3), 16–30.
<https://doi.org/10.4018/IJKSR.2016070102>
- 51) Rezende, D. A., Procopiuck, M., & Figueiredo, F. C. (2015). Public policy and a strategic digital city project: A case study of the Brazilian municipality of Vinhedo. *Journal of Urban Technology*, 22(2), 63–83.
<https://doi.org/10.1080/10630732.2014.971536>
- 52) Rodrigue, J. P. (2016). The Geography of Transport Systems.
<https://doi.org/10.4324/9781315618159>
- 53) Saha, K., Frøyen, Y. K. (2021). Learning GIS Using Open Source Software. <https://doi.org/10.4324/9781003056928>
- 54) Semanjski, I. C. (2023) Introduction to smart mobility. *Smart Urban Mobility* 9-23
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820717-8.00009-9>
- 55) Shaamala, A., Yigitcanlar, T., Nili, A., Dan Nyandega (2022). Machine learning applications for urban geospatial analysis: A review of urban and environmental studies.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106139>

- 56) Shi, J., Zhang, Y., & Li, X. (2023). An ontology-based methodology to establish city information model of digital twin city. *Sustainability*, 15(2), 1234.
- 57) Toppeta, D. (2010). The Smart City vision: How innovation and ICT can build smart, “livable”, sustainable cities. *The Innovation Knowledge Foundation*.
http://www.thinkinnovation.org/fileadmin/user_upload/PDF/Smart_City.pdf
- 58) United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2018, May 16). *68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN*. United Nations.
<https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- 59) Wang, M., Li, Y., & Wu, Y. (2013). Quality analysis of OpenStreetMap data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(4), 885–912.
- 60) Washburn, D., Sindhu, U., Balaouras, S., Dines, R. A., Hayes, N. M., & Nelson, L. E. (2010). Helping CIOs understand “Smart City” initiatives: Defining the Smart City, its drivers, and the role of the CIO. *Forrester Research*. <https://www.forrester.com/report/Helping-CIOs-Understand-Smart-City-Initiatives/RES56682>
- 61) Weng, Q. (2016). *Remote sensing for sustainability*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315371931>
- 62) Білянська С., Костріков С. (2023). Застосування принципів геомаркетингу для оптимізації розміщення пунктів незламності у місті Харкові (на прикладі ГІС-проекту «Цифрове Місто») // Регіон – 2023: суспільно-географічні аспекти: матеріали міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців (м. Харків, 20 квітня 2023 р.) / Гол. ред. колегії Л.М. Немець. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2023. – С. 8-11.
- 63) Костріков, С., Серьогін, Д., Бережний, В.А.. (2021). Візуальний аналіз урбаністичного середовища як складова урбогеосистемного підходу //

Часопис соціально-економічної географії. – Том. 30 (2021) - Харків:
Видавництво ХНУ, 2021. – С. 7-23.

<https://periodicals.karazin.ua/socecongeo/issue/view/1097>

- 64) Серьогін, Д., & Костріков, С. (2023). До питання виокремлення урбаністичних геоситуацій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 59, 101–110.
- 65) Kostrikov, S., Serohin, D. (2025). Urban change detection with airborne LiDAR for hostilities' impact estimation: a case study of Kharkiv. *European Journal of Remote Sensing*, 58 (1).
<https://doi.org/10.1080/22797254.2025.2491750>