

Міністерство освіти і науки України  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»  
Факультет інформатики  
Кафедра математики

## **Кваліфікаційна робота**

освітній ступінь – бакалавр

на тему:

**“ОЦІНКА ДОСТУПНОСТІ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ: РЕАЛІЗАЦІЯ  
МОДЕЛІ 15-ХВИЛИННОГО МІСТА НА ПРИКЛАДІ ЛЬВОВА”**

Виконала: студентка 4-го року  
навчання

Освітньої програми “Прикладна  
математика”, 113

Шевченко Вікторія Олегівна

Керівник Швай Н.О., кандидат  
фіз.-мат. наук, ст. викладач

Рецензент \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота захищена  
з оцінкою \_\_\_\_\_

Секретар ЕК \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»

Факультет інформатики

Кафедра математики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри математики,

проф., д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ Р. К. Чорней

(підпис)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

### ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

Студентці: Шевченко Вікторії Олегівні

**Тема:** Оцінка доступності міської інфраструктури: реалізація моделі 15-хвилинного міста на прикладі Львова

#### **План кваліфікаційної роботи:**

1. Вступ
2. Теоретичні основи просторової доступності в контексті 15-хвилинного міста
3. Методологія
4. Практична частина
5. Обмеження дослідження та перспективи подальшого розвитку
6. Висновки

Дата видачі « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р. Керівник \_\_\_\_\_ (підпис)

Завдання отримав \_\_\_\_\_ (підпис)

## Календарний план виконання роботи

**Тема:** Оцінка доступності міської інфраструктури: реалізація моделі 15-хвилинного міста на прикладі Львова

### План виконання:

№ п/п	Назва етапу дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапу	Примітка
1.	Отримання теми та завдання на кваліфікаційну роботу.	03.10.2024	
2.	Ознайомлення із завданням кваліфікаційної роботи.	21.10.2024	
3.	Робота з науковою літературою.	03.02.2025	
4.	Вивчення методів математичного моделювання просторової доступності.	18.02.2025	
5.	Підбір, обробка та підготовка вхідних геоданих для моделювання.	15.03.2025	
6.	Моделювання доступності, візуалізація результатів.	3.04.2025	
7.	Робота над текстовим оформленням результатів.	28.04.2025	
8.	Попередній аналіз кваліфікаційної. Виправлення помилок.	20.05.2025	

Студентка: Шевченко В. О.

Науковий керівник: Швай Н. О.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_

	4
<b>ЗМІСТ</b>	
<b>АНОТАЦІЯ</b>	<b>6</b>
<b>1 ВСТУП</b>	<b>7</b>
<b>2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОСТОРОВОЇ ДОСТУПНОСТІ В КОНТЕКСТІ 15-ХВИЛИННОГО МІСТА</b>	<b>9</b>
2.1 Поняття просторової доступності та сталого розвитку	9
2.2 Концепція 15-хвилинного міста: ідеї, компоненти, розвиток	10
2.3 Дослідження та актуальність міської доступності в Україні	12
Висновки до розділу	13
<b>3 МЕТОДОЛОГІЯ</b>	<b>14</b>
3.1 Опис математичної моделі	14
3.1.1 Створення гексагональної сітки.	14
3.1.2 Категоризація об'єктів міської інфраструктури	15
3.1.3 Обчислення доступності на рівні гексагона	16
3.1.4 Обчислення доступності на рівні міста	18
3.1.5 Оцінка 15-хвилинної доступності та нерівності результатів	19
3.1.5.1 Індекс F15: частка мешканців у межах 15-хвилинної доступності	19
3.1.5.2 Індекс Джині: вимірювання просторової нерівності	20
3.2 Набори даних та їх джерела	21
3.2.1 Джерела просторових даних в українському контексті	21
3.2.2 Формати даних	22
3.2.3 Типові проблеми даних	22
<b>4 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>24</b>
4.1 Створення гексагональної сітки	24
4.2 Класифікація об'єктів міської інфраструктури	25
4.3 Розрахунок показників доступності	27

	5
4.3.1 Інструменти реалізації	27
4.4 Обчислення індексу доступності на рівні гексагона та міста	28
4.5 Висновки практичної частини	30
4.5.1 Інтерпретація результатів	31
4.5.2 Найбільш і найменш забезпечені райони	32
4.5.3 Найгірше і найкраще охоплені категорії послуг	34
4.5.4 Порівняння з раніше отриманими результатами	36
Висновки до розділу	37
<b>5. ОБМЕЖЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ</b>	<b>38</b>
5.1 Обмеження дослідження	38
5.2 Перспективи подальшого розвитку	38
<b>6. ВИСНОВКИ</b>	<b>40</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b>	<b>42</b>

## АНОТАЦІЯ

У роботі досліджується концепція 15-хвилинного міста на прикладі Львова з акцентом на просторову доступність міської інфраструктури. Метою дослідження є реалізація математичної моделі, яка оцінює час доступу мешканців до базових об'єктів (освіта, охорона здоров'я, відпочинок тощо) в межах гексагональної сітки. Застосовано алгоритми маршрутизації на основі OpenStreetMap та OSRM. На основі розрахунків побудовано тематичні карти та визначено індекси F15 і Джині для аналізу нерівності.

**Ключові слова:** 15-хвилинне місто, просторовий аналіз, OSRM, доступність інфраструктури, індекс Джині, OpenStreetMap, Львів

## 1 ВСТУП

Світова тенденція показує, що частка міського населення невідомо зростає: якщо у 1960-х роках у містах проживало менше третини населення, то станом на 2023 рік — вже більше половини [1]. Україна не є винятком: за даними на 2023 рік, близько 70% населення країни проживає в містах [1, 2]. З огляду на це, питання забезпечення комфортного, безпечного та доступного міського середовища стає пріоритетним завданням сучасної урбаністики та державної політики.

Однією з ключових характеристик ефективного міського простору є просторова доступність - можливість мешканців швидко і зручно досягти базових потреб таких як: освітні установи, медичні заклади, рекреаційні зони тощо [3]. Вона тісно пов'язана з принципами інклюзивності та рівності можливостей для всіх мешканців — незалежно від віку, статі, рівня мобільності чи соціального статусу. Особливої актуальності це питання набуває в умовах післявоєнної відбудови України, коли зростає частка маломобільного населення. Просторове планування має враховувати принципи інклюзивності, безбар'єрності та сталого розвитку [3,4].

Одним із підходів до вирішення зазначених викликів є концепція 15-хвилинного міста, запропонована Карлосом Морено у 2016 році [5]. Вона передбачає таку модель просторового планування, за якої усі основні потреби мешканців задовольняються у межах 15-хвилинної пішої або велосипедної доступності [5]. Реалізація цієї концепції потребує використання кількісних методів аналізу, здатних оцінити доступність на основі реальних просторових даних.

У цій роботі акцент зроблено на математичному моделюванні доступності інфраструктури у місті Львові. Метою дослідження є огляд та реалізація математичної моделі оцінки просторової доступності міської інфраструктури на прикладі Львова відповідно до принципів концепції 15-хвилинного міста, з урахуванням особливостей українського контексту та післявоєнних викликів.

Мета роботи передбачає виконання таких наукових завдань:

1. Проаналізувати поняття просторової доступності та принципи концепції 15-хвилинного міста в контексті сталого розвитку й хроноурбанізму.
2. Ознайомитися з математичною моделлю оцінки доступності, запропонованою в роботі Bruno et al., 2024 [6], та адаптувати її до умов міста Львова.
3. Реалізувати обчислювальну модель з використанням Python і бібліотек GeoPandas, OSRM та OpenStreetMap.
4. Провести моделювання доступності інфраструктурних об'єктів для ключових функціональних категорій (освіта, охорона здоров'я, культура, спорт, зони відпочинку) у межах міста Львова.
5. Оцінити рівень 15-хвилинної доступності та просторову нерівномірність її розподілу на основі відкритих демографічних і просторових даних.
6. Розробити рекомендації щодо використання отриманих результатів у процесі просторового планування та адаптації концепції 15-хвилинного міста до українського контексту.

Об'єктом дослідження є міський простір як система, яка забезпечує доступ до інфраструктурних елементів. Предметом дослідження є математичне моделювання просторової доступності об'єктів міської інфраструктури згідно з концепцією 15-хвилинного міста.

Методи дослідження: математичне моделювання, графовий аналіз, алгоритми маршрутизації, реалізація в Python, використання бібліотек для обробки просторових даних.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні концепту 15-хвилинного міста з методами формального математичного моделювання та адаптації моделі до специфіки українських міських даних, зокрема на прикладі Львова.

Практичне значення полягає в тому, що результати можуть бути використані для міського планування, оцінки доступності в інших містах України та формування рекомендацій у сфері розвитку інфраструктури.

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОСТОРОВОЇ ДОСТУПНОСТІ В КОНТЕКСТІ 15-ХВИЛИННОГО МІСТА

У цьому розділі розглянуто основні поняття просторової доступності, які є необхідними для розуміння концепції та формування загального теоретичного підґрунтя. Описано концепцію 15-хвилинного міста, її ключові принципи та взаємозв'язок із хроноурбанізмом і цифровим міським плануванням. Також проаналізовано актуальність проблеми доступності та можливості впровадження цієї концепції в українських умовах.

### 2.1 Поняття просторової доступності та сталого розвитку

**Сталий розвиток** (англ. *Sustainable development*) — це концепція, що полягає у забезпеченні потреб сучасного покоління, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти власні потреби [7]. У сфері міського планування сталий розвиток передбачає створення середовища, яке відповідає потребам сьогодення і забезпечує умови для функціонування, зростання та змін у майбутньому.

**Міська доступність** (англ. *Urban accessibility*) — це здатність мешканців міста легко досягати необхідних місць, таких як робота, освітні установи, медичні установи, об'єкти для відпочинку та інші послуги [8]. Основними трьома компонентами, що визначають рівень міської доступності, є: інфраструктура, використання землі та характеристики населення [8].

**Інфраструктура** охоплює транспортну мережу, її покриття, зручність пересування, а також ефективність розв'язки громадського транспорту. Просторово- та часово узгоджене сполучення між районами міста відіграє важливу роль у забезпеченні легкого доступу мешканців до необхідних місць.

**Землекористування** впливає на доступність через географічне розташування об'єктів міської інфраструктури відносно місць проживання населення. Чим менша відстань до таких об'єктів, тим вищий рівень доступності, і, відповідно, зручність користування ними.

Індивідуальні **характеристики населення** також суттєво впливають на рівень доступності. Вік, стать, фізичні чи когнітивні особливості, соціальний статус, рівень доходу — усе це визначає, наскільки зручно та безпечно мешканці можуть пересуватися містом. У цьому контексті доступність виступає важливим критерієм для аналізу інклюзивності міського середовища.

**Хроноурбанізм** (англ. *Chrono-urbanism*) — це підхід до міського планування, що переосмислює взаємозв'язок між простором і часом у міському середовищі. Він ґрунтується на ідеї, що міста повинні бути організовані так, аби щоденні потреби мешканців могли бути задоволені в межах короткого проміжку часу, без необхідності тривалих поїздок [9]. Таким чином, хроноурбанізм пропонує інтегрувати час як ключовий фактор у проектуванні міських просторів, роблячи міста більш зручними, сталими та інклюзивними [10].

**Розумне місто** (англ. *Smart City*) — це місто, в якому традиційні інфраструктурні мережі та сервіси використовують цифрові технології для оптимізації процесів. Концепція розумного міста охоплює не лише впровадження інновацій для раціонального використання ресурсів та зменшення викидів, а й включає розумні транспортні системи, модернізоване водопостачання та утилізацію відходів, енергоефективне освітлення та опалення будівель [11].

## **2.2 Концепція 15-хвилинного міста: ідеї, компоненти, розвиток**

Вперше термін “15-хвилинне місто” (франц. *ville du quart d'heure*) був запропонований французько-колумбійським урбаністом та науковцем Карлосом Морено у 2016 році [5]. Концепція була розроблена як стратегія для перетворення Парижа на більш сталий та зручний простір для життя. Вона ґрунтується на принципах хроноурбанізму — підходу, який акцентує увагу на важливості скорочення часу щоденних переміщень мешканців міста. В основі цієї моделі лежить прагнення створити умови, за яких повсякденні потреби знаходяться на близькій відстані, що сприяє зменшенню використання

приватного автотранспорту, підвищенню екологічної стійкості та якості міського життя [12].

В свою чергу ця модель ґрунтується на підходах та напрацюваннях урбаністів-попередників. Зокрема, Джейн Джейкобс наголошувала на важливості різноманітності функцій та соціальних груп як основи життєздатності міста [13]. Ян Гель говорив про необхідність щільності, компактності та помітності публічних просторів [14]. У підході Крістофера Александера також простежується ідея органічної міської структури з високим ступенем зв'язності [15].

У запропонованій концепції виділяють чотири ключові виміри, що взаємодіють між собою: щільність (англ. *density*), близькість (англ. *proximity*), різноманіття (англ. *diversity*) та цифровізація (англ. *digitalization*). Ці компоненти були запропоновані як модифікація початкової моделі Карлоса Морено, з урахуванням викликів, що постали перед містами під час пандемії COVID-19 [5].

**Щільність** означає достатню концентрацію населення та функціональних об'єктів у межах окремих районів, що дозволяє забезпечити ефективність послуг на близькій відстані.

**Близькість** передбачає фізичну доступність ключових послуг у межах 15 хвилин пішки чи на велосипеді/кріслі колісному.

**Різнманіття** охоплює функціональну і соціальну різноплановість простору – житло, робота, відпочинок у межах одного району.

**Цифровізація** означає використання цифрових інструментів, таких як телемедицина, дистанційна робота, доставки – як доповнення до фізичної доступності.

Останній компонент безпосередньо пов'язаний з ідеями розумного міста (англ. *Smart City*), що передбачає використання цифрових технологій для підвищення ефективності урбаністичних процесів. Збір даних, інтелектуальні транспортні системи, онлайн-сервіси та аналітика великих даних дозволяють

оптимізувати міську мобільність, інфраструктуру, облік потреб населення та екологічну стійкість [5].

Дана концепція міста пропонує вирішення низки актуальних проблем та покращити життя міських мешканців:

**Залежність від приватного транспорту.** У багатьох містах щоденні поїздки на великі відстані спричиняють затори, забруднення та втрату часу. Концепція 15-хвилинного міста зменшує потребу в приватному транспорті, натомість заохочує піше та велосипедне пересування, що сприяє зниженню навантаження на дороги та зменшенню викидів.

**Соціальна фрагментація.** Монофункціональні райони обмежують соціальні контакти між різними групами населення. Поліцентрична структура 15-хвилинного міста з різноманітним функціям у кожному районі сприяє змішаності, живим кварталам і соціальній інтеграції.

**Негативний вплив на довкілля.** Автомобілецентричні міста спричиняють високий рівень CO<sub>2</sub>, шуму та забруднення повітря. Переорієнтація на локальність, активну мобільність та зелені зони сприяє екологічній стійкості міського середовища.

### 2.3 Дослідження та актуальність міської доступності в Україні

Раніше розглянута концепція 15-хвилинного міста може стати актуальною в українському контексті, зокрема в процесі післявоєнної відбудови міст та формуванні комфортного міського середовища для мешканців. Багато українських міст стикаються з проблемами доступності та просторової організації — зокрема, з домінуванням монофункціональних районів, таких як спальні масиви, де переважає лише житлова функція без належної інфраструктури для щоденних потреб.

Згідно з дослідженнями “Доступність міських просторів” від 2023, проведеним за участі громадськості, в українських містах фіксується нестача активностей у публічних просторах [4]. Наприклад, у дворах житлових будинків

не вистачає ігрових та спортивних майданчиків, місць для відпочинку та активностей для різних вікових категорій мешканців.

Також в містах відсутні або представлені в мінімальній кількості зони для дозвілля дітей і дорослих. Наявні ігрові майданчики не мають зонування та розподілу для дітей різного віку. Відсутні місця для відпочинку підлітків, молоді та дорослих, альтанки тощо.

Іншою актуальною проблемою для міст є дефіцит інклюзивних просторів і рекреаційних зон, адаптованих до потреб різних соціальних груп. Як наслідок людям доводиться долати великі відстані, щоб дістатися до таких просторів. Інакше, наприклад, батьки з дітьми змушені весь свій час проводити в одноманітному просторі без змоги доєднатися до ширшого суспільного життя.

Таким чином, модель 15-хвилинного міста може стати ефективною відповіддю на низку структурних проблем українських міст, сприяючи створенню більш зручного, доступного та інклюзивного міського середовища [16].

## **Висновки до розділу**

У цьому розділі було розглянуто ключові поняття просторової доступності [3,8], сталого розвитку [7], хроноурбанізму [9,10] та цифрового міського планування [5,6,11]. Особливу увагу було приділено концепції 15-хвилинного міста [5, 6, 12–15], її структурним компонентам і можливостям практичного впровадження. На прикладах європейських міст, продемонстровано переваги застосування цієї моделі містоустрою. Також описано актуальну ситуацію в українських містах і показано потенціал адаптації концепції до національного контексту, зокрема в умовах післявоєнної відбудови. Теоретичні положення, викладені в цьому розділі, формують методологічну основу для подальшої розробки та аналізу математичної моделі, яка буде розглянута в наступному розділі.

## 3 МЕТОДОЛОГІЯ

У цьому розділі описано методологічний підхід до оцінки просторової доступності міської інфраструктури відповідно до принципів концепції 15-хвилинного міста. В основі лежить математична модель, адаптована до умов українських міст на основі алгоритму, запропонованого в роботі [6]. Представлено логіку побудови моделі, перелік етапів реалізації, типи необхідних даних та інструменти, що використовуються для розрахунків.

### 3.1 Опис математичної моделі

У цьому підрозділі розглянуто алгоритм, який використовується для розрахунку просторової доступності в міському середовищі. Він складається з наступних основних етапів: побудова гексагональної сітки (теселяція), категоризація об'єктів інфраструктури, обчислення середнього часу доступу до 20 найближчих об'єктів кожної категорії для кожного гексагона з використанням OSRM, узагальнення показників доступності, оцінка 15-хвилинної доступності та просторової нерівності. Також описано основні математичні задачі, на яких базуються ключові етапи. Описаний алгоритм є основою для практичної реалізації, яка описана в наступному розділі.

#### 3.1.1 Створення гексагональної сітки.

Одним з ключових кроків побудови моделі є поділ міської території на гексагональну сітку. В її основі лежить поняття теселяції (англ. *tessellation*) — розбиття площини на частини фіксованої форми, які повністю покривають простір без проміжків та перекриттів. Такі фігури називають осередками (англ. *tiles*) [18,19].

Залежно від форми осередків, розрізняють кілька типів теселяцій. **Регулярна теселяція** складається з однакових правильних багатокутників, які повторюються у фіксованому положенні. Існує три типи регулярних теселяцій,

в основі яких лежить: трикутник, квадрат чи правильний гексагон (шестикутник) [19].

Такий підхід широко використовується для практичних задач просторового аналізу міського середовища, зокрема для задачі оцінки доступності.

Вибір саме гексагональної сітки зумовлений наступними перевагами перед поділом на трикутники або квадрати. Зокрема:

- Відсутність кутових стиків між осередками, що зменшує потенційне просторове викривлення;
- Однакова відстань до кожного з шести сусідів забезпечує ізотропність;
- Гексагональна сітка ефективніше покриває площу, дозволяючи зменшити кількість осередків приблизно на 30% в порівнянні з квадратною теселяцією аналогічного масштабу [17,20].

Ці властивості особливо важливі при оцінці просторової доступності, де критичним є точний розрахунок найкоротших маршрутів від початкових точок (англ. *origins*) до об'єктів інфраструктури (англ. *POI – Points of Interest*). Таким чином, гексагональна сітка є ефективним інструментом для просторової сегментації міського середовища в контексті аналізу доступності.

Формули (1) та (2) описують розташування центрів осередків у гексагональній сітці, побудованій за принципом регулярної теселяції.

$$x = s \cdot \frac{3}{2} \cdot i \quad (1); \quad y = s \cdot \sqrt{3} \cdot (j + 0.5 \cdot (i \bmod 2)) \quad (2)$$

де:

- $s$  – довжина сторони гексагона (у метрах),
- $i, j$  – індекси позиції осередку в сітці по горизонталі та вертикалі,
- $x, y$  – координати центра відповідного гексагона.

Ці рівняння використовуються для генерації координат центрів гексагонів при побудові регулярної сітки, яка покриває досліджувану територію.

Вони враховують особливості розташування гексагонів, що забезпечує рівномірне покриття площини та відсутність перекриттів між осередками.

### 3.1.2 Категоризація об'єктів міської інфраструктури

Наступним етапом є формування тематичних шарів, які об'єднують в себе розташування всіх об'єктів певної категорії в межах одного міста. У використаних джерелах такі об'єкти часто позначаються як POI (*Points of Interest*) — ключові точки інфраструктури, що мають значення для мешканців міста.

Розподіл об'єктів за категоріями може відбуватись по-різному, залежно від мети дослідження, обраного підходу, специфіки міста. Наприклад, у дослідженні, яке слугує основою для огляду математичної моделі, використовують дев'ять основних категорій: активності на відкритому повітрі (англ. *outdoor activities*), освітні заклади (англ. *learning*), об'єкти для щоденних потреб (англ. *supplies*), заклади громадського харчування (англ. *eating*), транспортна доступність (англ. *moving*), об'єкти культури (англ. *cultural activities*), фізична активність (англ. *physical exercise*), побутові послуги (англ. *services*) та заклади медичної допомоги (англ. *healthcare*) [6].

У межах цієї роботи було використано дані, які вже попередньо класифіковані та мають відповідні теги категорій, що дає змогу легко формувати тематичні шари для подальшого аналізу.

### 3.1.3 Обчислення доступності на рівні гексагона

**OpenStreetMap (OSM)** — це всесвітня картографічна ініціатива, що надає вільний доступ до актуальних просторових даних. Проєкт активно використовується у наукових, соціальних і комерційних дослідженнях [21].

**Open Source Routing Machine (OSRM)** — це високопродуктивна система маршрутизації з відкритим кодом, яка дозволяє обчислювати найкоротші шляхи

між точками на основі геоданих OSM [22]. Система підтримує кілька режимів пересування: пішохідний, велосипедний і автомобільний.

Першим кроком обчислень є визначення доступності на рівні кожного окремого гексагону. Для кожної територіальної одиниці ідентифікується 20 найближчих об'єктів інфраструктури відповідної категорії. Для побудови маршрутів між центром гексагона та об'єктами використовується OSRM.

Далі обчислюється середній час доступу до об'єктів за наступною формулою [6]:

$$(t)_{c,k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^{c,k} \quad (3),$$

де:

- $(t)_{c,k}$  – середній час доступу до об'єктів категорії  $c$  з гексагона  $k$ ;
- $t_i^{c,k}$  – час маршруту до  $i$ -го найближчого об'єкта (POI) категорії  $c$ , оступного з гексагона  $k$ ;
- $n$  – кількість найближчих об'єктів, що враховуються у розрахунку.

**Алгоритмічна основа OSRM.** Для обчислення маршрутів використовується програмний модуль `osrmtime`, який автоматично запускає локальний сервер OSRM та здійснює розрахунки на основі попередньо підготовленого витягу з OpenStreetMap, збереженого на жорсткому диску.

У своїй основі OSRM реалізує класичну задачу пошуку найкоротшого шляху на зваженому графі, де вагою ребра є час проходження певної відстані [22]. Для забезпечення високої продуктивності обчислень у великих міських мережах система використовує такі алгоритми:

- **Алгоритм Дейкстри** (англ. *Dijkstra's Algorithm*) — це класичний метод пошуку найкоротшого шляху на графі з невід'ємними вагами. Він використовує жадібний підхід, поступово розширюючи множину вершин з відомими найкоротшими відстанями від початкової вершини, оновлюючи відстані до сусідів через поточну вершину [23].

- **Багаторівневий алгоритм Дейкстри** (англ. *Multi-Level Dijkstra, MLD*)— це оптимізований варіант алгоритму Дейкстри, що використовує ієрархічну структуру графа для прискорення пошуку. Алгоритм розділяє граф на ієрархічні рівні. Пошук найкоротших шляхів виконується спочатку на вищих рівнях (з меншою деталізацією), а потім уточнюється на нижчих рівнях [24]. Цей підхід дозволяє значно зменшити кількість обчислень.
- **Скорочені ієрархії** (англ. *Contraction Hierarchies, CH*)— оптимізований варіант, який передбачає попередню обробку графа шляхом “стиснення” менш важливих вузлів і додавання "ярликів" (англ. *shortcuts*), що дозволяє значно зменшити обсяг пошуку [25].

Таким чином, для кожного гексагона формується значення середнього часу доступу до об’єктів відповідної категорії. Це значення буде використано у подальшому для аналізу рівня просторової доступності послуг.

### 3.1.4 Обчислення доступності на рівні міста

Наступним кроком алгоритму є обчислення доступності на рівні міста, що дозволяє отримати узагальнену оцінку середнього рівня просторової доступності. Відповідно до [6], цей показник формується в два етапи: спочатку для кожного гексагона розраховується індекс доступності, а потім на основі цих значень і даних про чисельність населення визначається інтегральний показник доступності для міста у цілому.

**Індекс доступності гексагона.** На першому етапі обчислюється індекс доступності гексагона ( $PT_k$  - *proximate time*) — це середнє значення часу доступу до всіх функціональних категорій інфраструктури [6]:

$$PT_k = \frac{1}{m} \sum_{c=1}^m (t)_{c,k} \quad (4),$$

де:

$m$  – кількість категорій послуг;

$(t)_{c,k}$  – середній час доступу до об'єктів категорії  $c$  з гексагона  $k$ .

**Індекс доступності на рівні міста.** На другому етапі обчислюється загальний показник доступності міста як зважене середнє значення індексу доступності гексагонів з урахуванням чисельності населення в кожному з них [6]:

$$PT_{\text{місто}} = \frac{\sum_{k=1}^K PT_k p_k}{\sum_{k=1}^K p_k} \quad (5),$$

де:

$PT_k$  – показник доступності в гексагоні  $k$ ;

$p_k$  – кількість населення в гексагоні  $k$ ;

$K$  – загальна кількість гексагонів у місті.

Такий підхід дозволяє врахувати демографічні відмінності між частинами міста і уникнути спотворення результатів, які могли б виникнути рівноважного врахування всіх осередків незалежно від кількості жителів.

### 3.1.5 Оцінка 15-хвилинної доступності та нерівності результатів

На завершальному етапі аналізу обраховуються два ключові індикатори, які дозволяють кількісно оцінити рівень доступності міської інфраструктури: **індекс  $F_{15}$**  та **індекс нерівності Джині (G)**. Їхнє поєднання дає змогу оцінити не лише середню доступність, а й ступінь просторової рівності в її розподілі.

#### 3.1.5.1 Індекс $F_{15}$ : частка мешканців у межах 15-хвилинної доступності

Цей показник відображає, яка частка населення міста проживає в районах, які відповідають вимогам 15-хвилинного міста. Розрахунок проводиться за наступною формулою [6]:

$$F_{15} = \frac{\sum_{k=1, PT_k \leq 15}^K p_k}{\sum_{k=1}^K p_k} \times 100\% \quad (6),$$

де:

- $PT_k$  — показник доступності в гексагоні  $k$ ;
- $p_k$  — кількість населення в гексагоні  $k$ ;
- Також варто зазначити, що в чисельнику враховуються лише ті гексагони, в яких  $PT_k \leq 15$ .

**Інтерпретація.** Значення індексу  $F_{15}$  лежить у межах від 0 до 100 (%).

Чим вищий показник, тим більша частина населення мають доступ до базових послуг у межах 15 хвилин, що вказує на кращу відповідність міста до запропонованої концепції.

### 3.1.5.2 Індекс Джині: вимірювання просторової нерівності

Індекс Джині (англ. *Gini inequality index*,  $G$ ), використовується для кількісного оцінювання просторової нерівності у доступі до міської інфраструктури. Він базується на розподілі індексу доступності серед усіх мешканців міста, з урахуванням упорядкування за зростанням значень доступності.

Формула розрахунку індексу [6]:

$$G = 1 - \frac{2 \sum_{p=1}^{N_{pop}} \sum_{p' \leq p} PT_{p'}}{N_{pop} \sum_{p=1}^{N_{pop}} PT_p} \quad (7),$$

де:

- $PT_{p'}$  — значення доступності (час у хвилинах) для  $p'$ -ї особи, упорядковане у зростаючому порядку;
- $p'$  — ранг особи у впорядкованому масиві (1 — найнижчий доступ);
- $N_{pop}$  — загальна чисельність населення в місті.

**Інтерпретація.** Значення індексу  $G$  змінюється у межах від 0 до 1. В такому випадку:

$G = 0$  — абсолютна рівність: усі мешканці мають однаковий доступ;

$G = 1$  — повна нерівність: доступ сконцентрований у незначній частці населення.

Оптимальними вважаються значення  $G \leq 0.3$ , що свідчать про помірну або низьку просторову нерівність. Значення вище 0.4 вказують на суттєву диференціацію між районами.

## 3.2 Набори даних та їх джерела

Одним із ключових аспектів практичної частини дослідження є наявність та якість даних, на основі яких здійснюється моделювання. Надійні джерела та структуровані формати даних забезпечують можливість проведення комплексного аналізу, побудови математичних моделей і формулювання обґрунтованих висновків.

У цьому розділі розглянуто основні джерела даних для українських міст, необхідні для реалізації обраної моделі, а також особливості їх форматів та типові проблеми.

### 3.2.1 Джерела просторових даних в українському контексті

Серед основних джерел даних, що використовуються у дослідженні міського середовища в Україні, можна виокремити наступні:

- **Державна служба статистики України (Держстат)** - надає офіційні статистичні дані демографічного, соціального та економічного характеру;
- **OpenStreetMap (OSM)** - відкритий картографічний сервіс, що містить інформацію про вуличну мережу, інфраструктуру та об'єкти міського середовища;
- **Google Maps** - використовується як допоміжне джерело для верифікації географічних координат і перевірки наявності певних об'єктів;
- **Локальні геопортали міст** - джерело більш детальної просторової інформації, зокрема щодо інфраструктури, планування та зонування.

В цьому дослідженні основним джерелом даних став відкритий геопортал Львова, який містить набори даних у форматах CSV та GeoJSON [26]. Серед доступної інформації: розташування інфраструктурних об'єктів, адміністративні межі, індекси якості життя, транспортна мережа, заклади освіти та охорони здоров'я.

### 3.2.2 Формати даних

Для реалізації просторового аналізу в дослідженні використовуються наступні типи даних:

- **CSV (Comma-Separated Values)** – для зберігання табличної інформації, зокрема даних про чисельність населення, його вікову структуру, індекси якості життя та інші соціально-демографічні показники [27].
- **GeoJSON** – для представлення просторових даних, що містять в собі розташування різних інфраструктурних об'єктів таких як школи, лікарень, рекреаційних зон тощо [28].
- **Shapefile (SHP)** — для зберігання географічних меж, зокрема адміністративних районів, мікрорайонів та територіального поділу міста [29].

### 3.2.3 Типові проблеми даних

У процесі пошуку та роботи з даними українських міст було сформульовано наступні проблеми, які можуть впливати на результати просторового аналізу:

- **Недостатня деталізація.** У багатьох випадках статистика про структуру населення надається лише на рівні адміністративних районів, що унеможлиблює локальний аналіз на рівні мікрорайонів чи кварталів. Проте саме така деталізація є критично важливою і необхідною для оцінки доступності у межах 15-хвилинної пішої або велосипедної досяжності
- **Актуальність і доступність даних.** Часто інформація, що міститься в доступних наборах даних, є застарілою або оновлюється з великою затримкою. Це ускладнює аналіз і зменшує релевантність таких даних для подальших висновків або довготривалих дослідження. Безумовно, російсько-українська війна є однією з причин, що впливає на регулярність збору та публікацію статистики, а також призвела до обмеження доступу до частини реєстрів із міркувань безпеки.

Реалізація просторового аналізу українських міст значною мірою залежить від доступності, якості та деталізації вихідних даних. У цьому контексті важливо не лише використовувати наявну інформацію, а й сприяти систематичному збиранню, стандартизації та регулярному оновленню просторових та статистичних даних. Це є критично важливим для розробки планів розвитку міст, проведення якісного аналізу і адаптації європейських урбаністичних практик до українських реалій.

## 4 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

У цьому розділі представлено результати реалізації раніше розглянутої моделі оцінки міської доступності в контексті концепції 15-хвилинного міста. Об'єктом дослідження було обрано місто Львів - приклад українського міста, що активно розвивається та впроваджує принципи сталого розвитку.

Практична частина дослідження спрямована на розрахунок середнього часу досягнення ключових об'єктів міської інфраструктури у межах гексагональної сітки, яка покриває всю територію міста. Додатково оцінюється частка міської території, яка відповідає критеріям 15-хвилинного міста.

Для реалізації практичної частини дослідження було використано мову програмування Python локально на персональному комп'ютері, що забезпечило зручність обробки геопросторових даних та їхньої візуалізації. Основними бібліотеками, які використовувалися для реалізації, є: GeoPandas, Matplotlib, NumPy, Pandas.

### 4.1 Створення гексагональної сітки

Першим етапом практичної реалізації моделі стало створення гексагональної сітки для території міста Львова. Такий підхід забезпечує рівномірне покриття простору, що є важливим для подальшого розрахунку показників доступності.

Гексагональна форма осередків була обрана завдяки її перевагам над квадратною чи трикутною теселяцією: вона мінімізує просторові спотворення і забезпечує більш ефективне перекриття території [17,20].

Для побудови сітки було обрано фіксовану довжину сторони гексагону - 250 метрів, що приблизно відповідає відстані, яку людина може подолати пішки за 3-4 хвилини. Такий розмір був обраний, щоб зменшити загальну кількість осередків та пришвидшити розрахунковий час. Спираючись на попередні дослідження [20], можна стверджувати, що довжина сторони гексагону у межах 200-250 метрів є оптимальною для задач, які пов'язані з просторовим аналізом

у міському середовищі. Різниця у 50 метрів в порівнянні з запропонованим варіантом у статті [6] не є критичною і не впливає на загальні висновки моделі.

Для реалізації цього етапу практичного дослідження було використано геопросторові дані про адміністративні межі Львова, які перебувають у відкритому доступі на офіційному геопорталі міста [26]. Дані були отримані у форматі GeoJSON, які було переведено у проекцію EPSG:3857 [27] для коректного обчислення відстаней у метрах.

У результаті побудови сітки було отримано 2123 гексагони кожен з яких є окремою територіальною одиницею для подальшого просторового аналізу. На рисунку 1 наведено візуалізацію сформованої гексагональної сітки, накладеної на межі міста Львова.

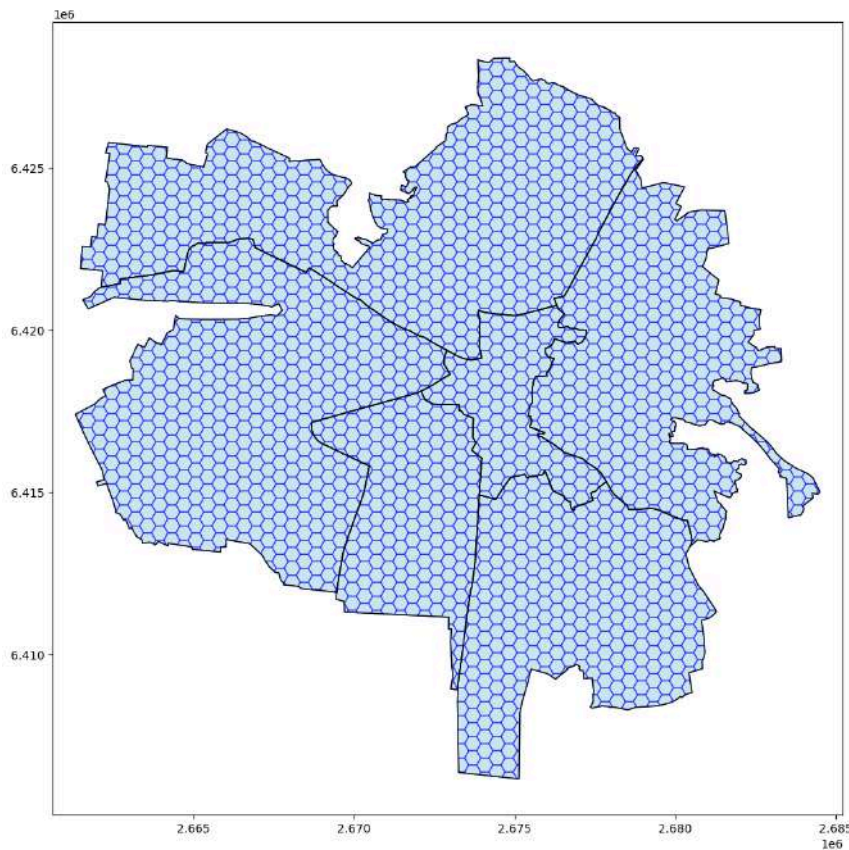


Рис.1 Гексагональна сітка

## 4.2 Класифікація об'єктів міської інфраструктури

Наступним кроком реалізації моделі стало групування доступних об'єктів міської інфраструктури за функціональними категоріями. Такий підхід дозволяє проводити тематичну оцінку доступності за кожною категорією окремо.

Усі дані для класифікації об'єктів міської інфраструктури були отримані з офіційного геопорталу міста Львова [26]. Категоризація об'єктів була зроблена аналогічно до статті [6], аз урахуванням специфіки відкритих даних та актуальних потреб міста. Так в даній реалізації було розглянуто 5 основних категорій.

<b>Назва категорії</b>	<b>Об'єкти</b>	<b>Кількість об'єктів</b>
Активності на відкритому повітрі	Рекреаційні зони; літні майданчики; ботанічні пам'ятки природи.	447
Освіта	Загальноосвітні школи; дитячі садки; університети; коледжі; гуртки позашкільної освіти; освітні гуртки.	707
Охорона здоров'я	Медичні заклади, аптеки.	537
Спорт	Дитячі спортивні майданчики, спортивні школи.	832
Культура	Пам'ятки архітектури, містобудування, історії, мистецтва та археології місцевого й національного значення; історичні пам'ятники; мозаїчні твори.	4331

Табл. 1 “Категорії об'єктів міської інфраструктури, використані в аналізі доступності”

На прикладі категорії “Активності на відкритому повітрі” розглянемо принцип формування даних в єдиний шар, що буде використовуватись для подальших розрахунків показників доступності. У цьому випадку було об'єднано три набори даних у форматі GeoJSON: рекреаційні зони, літні майданчики та ботанічні пам'ятки природи.

Всі геодані було переведено в проекцію EPSG:4326 для сумісності з геосервісами маршрутизації (OSRM) та точності подальших просторових обчислень. Кожен набір даних було переведено в єдину координатну систему. До кожного об'єкта було додано ознаку, що позначає його приналежність до відповідної групи.

За аналогічним принципом було сформовано шари для інших категорій, зазначених у таблиці 1.

### 4.3 Розрахунок показників доступності

Після побудови гексагональної сітки та класифікації об'єктів інфраструктури, наступним етапом реалізації є обчислення середнього часу доступу до об'єктів кожної категорії на рівні гексагона. Згідно з описаною у розділі 2 методологією, для кожного осередку визначаються 20 найближчих об'єктів (*Points of Interest*, POI) окремо для кожної категорії, після чого обчислюється середній час маршруту до них за формулою (3).

Розрахунки для цього етапу проводились локально на персональному комп'ютері. Для побудови дорожнього графа було використано .osm.pbf файл, завантажений з ресурсу *BBike Extracts* [30], який надає готові фрагменти *OpenStreetMap* для обраних географічних регіонів.

Отримані значення показників доступності для кожної категорії детально аналізуються у підпункті 4.5.3.

#### 4.3.1 Інструменти реалізації

Для реалізації обчислень цього етапу алгоритму було використано технологію *Docker* для запуску серверної частини OSRM (*Open Source Routing Machine*) — побудови маршрутів на основі даних *OpenStreetMap* [22].

*Docker* — це система контейнеризації, що дозволяє запускати програмне забезпечення в ізольованому середовищі, де вже встановлені всі необхідні

компоненти [31]. У цьому проєкті Docker використовувався виключно для розгортання OSRM-сервера, тоді як основна частина аналітики виконувалась у середовищі Python (Jupyter Notebook).

Було виконано наступну послідовність дій:

- **Витяг дорожнього графу з файлу .pbf**

```
docker run -t -v ${PWD}:/data osrm/osrm-backend osrm-extract -p /opt/foot.lua /data/lviv.osm.pbf
```

- **Оптимізація графа маршрутизації.** Сервер запускається з використанням алгоритму багаторівневої модифікації алгоритму Дейкстри (англ. MLD)

```
docker run -t -v ${PWD}:/data osrm/osrm-backend osrm-partition /data/lviv.osrm
```

```
docker run -t -v ${PWD}:/data osrm/osrm-backend osrm-customize /data/lviv.osrm
```

- **Запуск локального серверу OSRM на порту 5000**

```
docker run -t -i -p 5000:5000 -v ${PWD}:/data osrm/osrm-backend osrm-routed --algorithm mld /data/lviv.osrm
```

Таким чином, Docker був використаний як допоміжна технологія, що забезпечила швидке, стабільне та повторюване розгортання серверної частини без необхідності поглибленого системного адміністрування та ручного налаштування.

Розрахунок показників доступності, реалізований за допомогою OSRM та Docker, продемонстрував ефективність і надійність у виконанні складних просторових обчислень.

#### 4.4 Обчислення індексу доступності на рівні гексагона та міста

Відповідно до методології, описаної в підрозділі 3.1.4, на цьому етапі було обчислено два показники: індекс доступності гексагона та індекс доступності на рівні міста з урахуванням чисельності населення.

**Індекс доступності гексагона  $PT_k$ .** Після розрахунку середнього часу доступу до об'єктів кожної категорії в межах кожного гексагону, було обраховано індекс  $PT_k$  – середнє значення по всіх категоріях. Це значення відображає загальну доступність інфраструктури з точки зору часу пішого переміщення. Просторова візуалізація розподілу значень для гексагонів Львова представлена на рисунку 2.

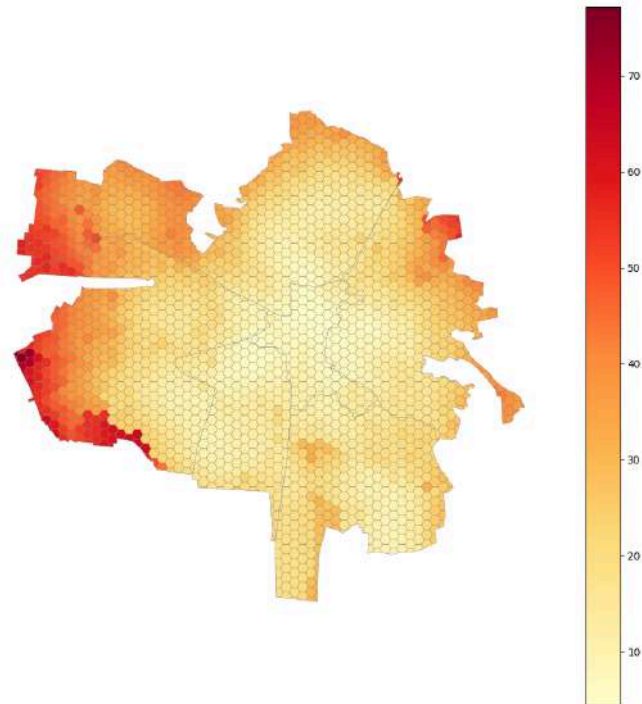


Рис. 2 Індекс доступності гексагона  $PT_k$

**Індекс доступності на рівні міста.** Після розрахунку значень  $PT_k$  для кожного гексагона, ці значення було узагальнено в один показник для всього міста з урахуванням чисельності населення згідно з формулою (3).

Для цього було використано дані про населення України, зокрема Львова, за 2020 рік із просторовою роздільною здатністю 100 м [32]. На рисунку 3 наведено візуалізацію просторового розподілу населення на гексагональній сітці, яка була використана для обчислення ваги кожного осередку в загальному розрахунку.

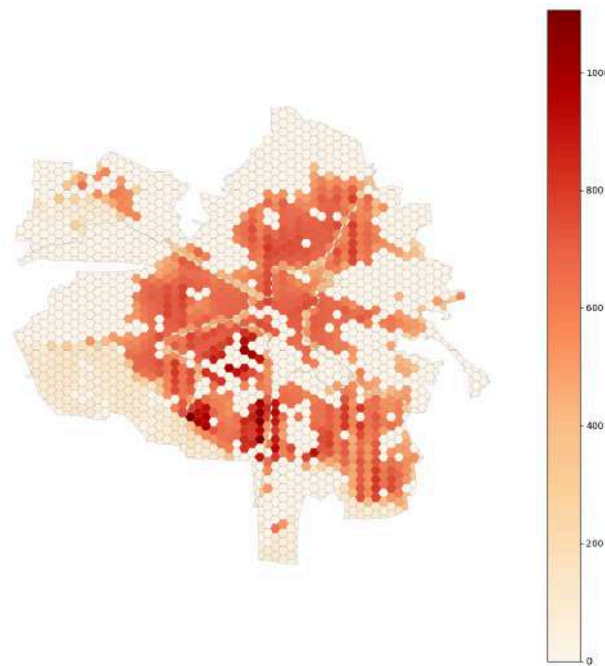


Рис. 3 Розподіл населення по гексагональній сітці

Такий інтегральний індекс дає змогу оцінити середній рівень доступності в місті, враховуючи демографічні відмінності між районами. За підсумками обчислень середній індекс доступності для Львова становить 15,34 хвилини.

Це значення використовується як базовий індикатор для аналізу відповідності міста до концепції 15-хвилинного міста. Разом з індексом  $F_{15}$ , який відображає частку населення з доступом до базових послуг у межах 15 хвилин, та індексом Джині, який характеризує просторову нерівність, отримане значення буде використано для подальшої комплексної оцінки доступності у підрозділі 4.5.

#### 4.5 Висновки практичної частини

Підбиваючи підсумки практичної реалізації моделі оцінки міської доступності, варто зазначити, що розроблений підхід дозволяє наочно виявити просторові нерівності у доступі до критично важливих послуг. На основі побудованих тематичних карт та розрахунку середнього часу досягнення об'єктів кожної категорії було виявлено ряд важливих спостережень.

### 4.5.1 Інтерпретація результатів

Отримані результати дозволяють надати якісну і кількісну оцінку просторової доступності базових послуг у місті Львові відповідно до принципів 15-хвилинного міста.

#### Основні результати:

**Середній час доступу до інфраструктури по місту становить 15,34 хвилини.** Це значення свідчить про загалом хорошу пішохідну досяжність базових сервісів. Попри те, що цей показник дещо перевищує цільову межу в 15 хвилин, можна припустити, що більшість мешканців мають змогу щодня досягати ключових об'єктів без використання транспорту.

**Індекс  $F_{15}$  дорівнює 56.6%**, тобто трохи більше половини міського населення проживає в районах, де середній час доступу до базових об'єктів не перевищує 15 хвилин. Це вказує на часткову відповідність міста концепції 15-хвилинного міста, хоча близько 44% мешканців залишаються поза межами цієї зони комфорту.

**Індекс Джині (G) для доступності становить 0.252**, що відповідає помірному рівню нерівності. Це означає, що хоча загальний рівень доступності є доволі високим, просторовий розподіл цієї доступності залишається нерівномірним. Частина районів має кращу інфраструктуру, тоді як інші — суттєво поступаються за рівнем доступу до послуг.

Додатково було обчислено **індекс  $F_{20}$** , який демонструє частку населення, що проживає в межах 20-хвилинної пішої досяжності до базових об'єктів інфраструктури (аналогічно до індексу  $F_{15}$ ). Значення  $F_{20}$  становить **81.5%**, тобто переважна більшість мешканців мають доступ до основних послуг у межах цього ширшого інтервалу. Такий показник підтверджує загальну функціональність міської системи, але водночас акцентує увагу на значній частці населення, яка не охоплюється навіть цією розширеною межею.

Таким чином, можна зробити висновок, що Львів демонструє наближені характеристики до моделі 15-хвилинного міста, однак зберігається просторовий дисбаланс та існує помітна потреба у просторовому вирівнюванні доступу до послуг, зокрема в районах, де значення  $PT_k$  перевищує 15-20 хвилин. Це відкриває простір для подальшого планування точкових інтервенцій, спрямованих на покращення інфраструктури в найменш забезпечених частинах міста.

#### 4.5.2 Найбільш і найменш забезпечені райони

Аналіз просторової доступності у межах гексагональної сітки дозволив виявити чіткі територіальні відмінності у рівні забезпеченості інфраструктурними об'єктами. На основі карт охоплення зон пішохідної доступності до базових послуг у межах 15 та 20 хвилин (рис. 4 і 5), у поєднанні з картою адміністративного поділу міста Львова (рис. 6) [33], можна визначити райони, які найкраще та найгірше відповідають критеріям концепції 15-хвилинного міста.

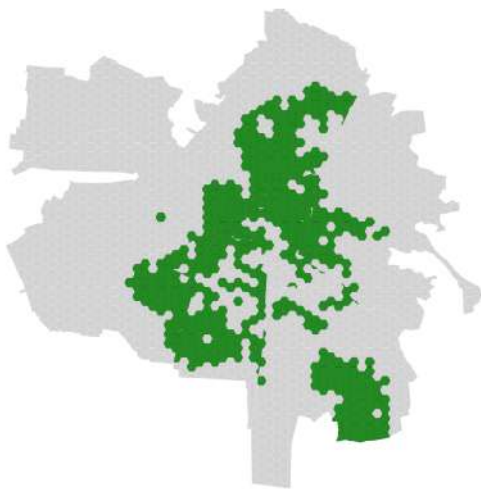


Рис. 4 Гексагони з доступністю до базових послуг у межах 15 хвилин

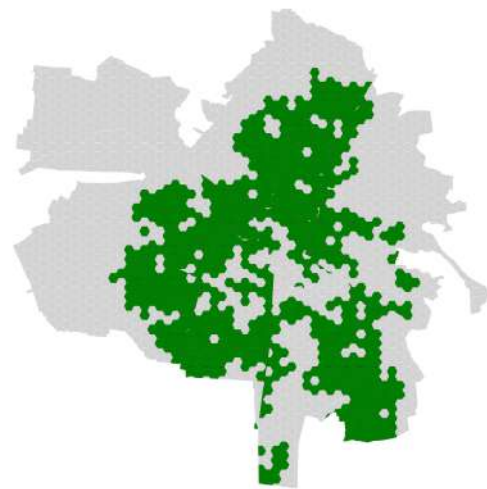


Рис. 5 Гексагони з доступністю до базових послуг у межах 20 хвилин.



Рис. 6. Адміністративні межі районів м. Львова  
(джерело: *inlviv.in.ua*, 2019)

Найбільш забезпеченими районами є:

- **Галицький район** — демонструє найвищий рівень доступності, майже повністю охоплений гексагонами з середнім часом доступу менше 15 хвилин. Це зумовлено щільною забудовою та високою концентрацією закладів і сервісів у центральній частині міста.
- **Франківський район** — центральні його частини мають високу щільність закладів освіти, спорту, культури та відпочинку.
- **Сихівський район** (північна частина) — демонструє достатній рівень доступності, зокрема завдяки щільній житловій забудові та добре розвиненій мережі соціальних об'єктів.

Натомість, найменш забезпеченими залишаються:

- **Залізничний район** — має найменше покриття зоною 15-хвилинної доступності. Значна частина території, особливо західна, залишається інфраструктурно не забезпеченою.
- Периферійні частини Личаківського, Шевченківського та Сихівського районів — віддалені від центру ділянки мають нижчу щільність закладів та довший середній час доступу до ключових сервісів.

Карта зони 20-хвилинної доступності (рис. 5) показує суттєве розширення охоплення — більша частина територій, які не потрапляють до зони  $F_{15}$ , все ж охоплюються моделлю  $F_{20}$ . Це свідчить про потенціал цільових втручань, спрямованих на підвищення якості доступу в районах, наближених до 20-хвилинного порогу.

Загалом, простежується центрично-периферійна модель: чим ближче гексагон розташований до центру міста, тим більша ймовірність, що мешканці цього району матимуть змогу досягти ключових об'єктів інфраструктури у межах 15 хвилин. Така нерівномірність підкреслює потребу у цільових міських інтервенціях в периферійних районах для зменшення просторових диспропорцій та підвищення рівня доступності для всіх мешканців.

#### 4.5.3 Найгірше і найкраще охоплені категорії послуг

Аналіз візуалізацій, отриманих під час створення тематичних шарів, дозволив визначити найбільш та найменш охоплені функціональні сфери на території міста Львова.

##### Найгірше охопленими категоріями є:

- **Зони відпочинку** (англ. *outdoor activities*) — значна частина західних районів міста демонструє надзвичайно високі показники часу доступу, які подекуди перевищують 60 хвилин пішки. Це свідчить про суттєвий дефіцит таких об'єктів на околицях міста, особливо у порівнянні з центральними гексагонами (рис. 7).
- **Об'єкти культури** (англ. *culture*) — просторовий розподіл культурних об'єктів є дуже нерівномірним. Основна концентрація закладів зосереджена в центральній частині міста, тоді як периферійні райони мають обмежений доступ до таких об'єктів (рис. 8).

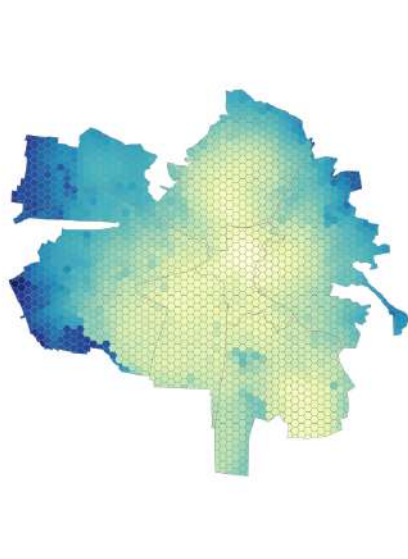


Рис. 7 Час пішоїдної доступності до зон відпочинку (*outdoor activities*)

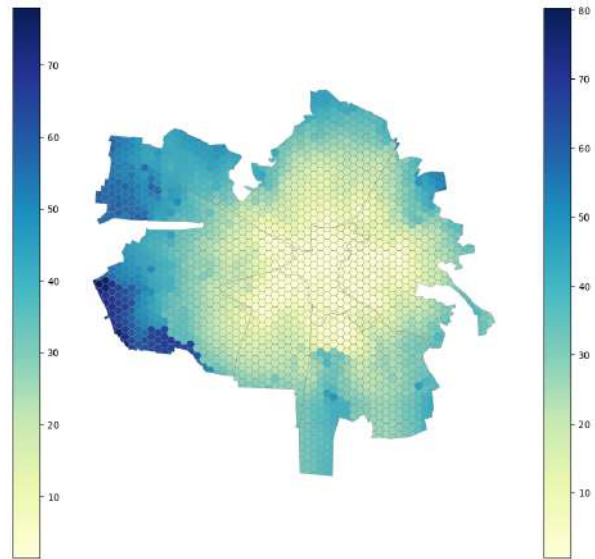


Рис. 8 Час пішоїдної доступності до об'єктів культури (*culture*)

### Найкраще охоплені категоріями є:

- **Освітні заклади** (англ. *education*) — більшість районів мають доступ до навчальних закладів у межах 20 хвилин, що свідчить про добре розвинену мережу освітньої інфраструктури (рис. 9).
- **Заклади охорони здоров'я** (англ. *healthcare*) — доступ до них є відносно рівномірним по всій території міста, що свідчить про ефективну інфраструктурну мережу (рис. 10).

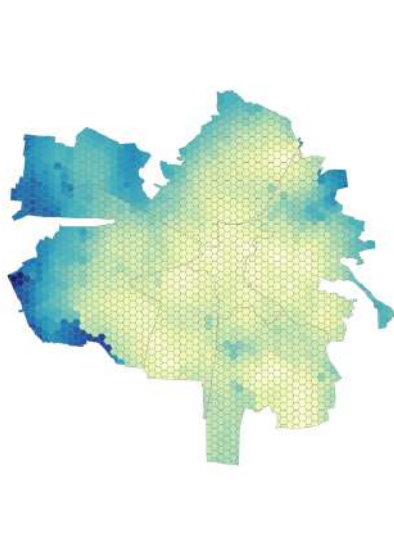


Рис. 9. Час пішоїдної доступності до освітніх закладів (*education*)

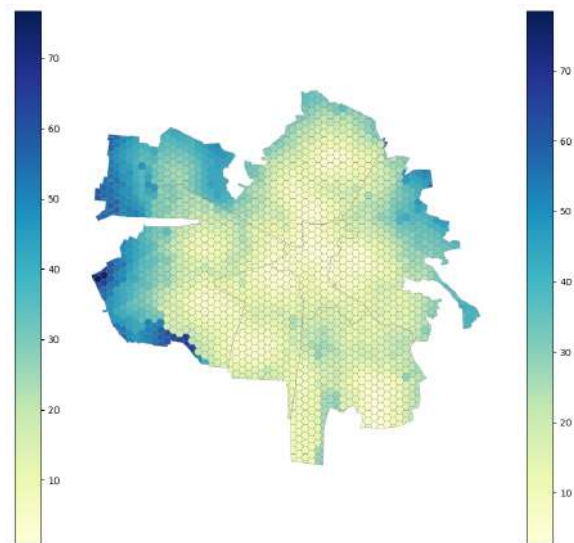


Рис. 10. Час пішоїдної доступності до закладів охорони здоров'я (*healthcare*)

Отримані результати можуть стати підґрунтям для корекції просторової політики міста, з акцентом на розширення інфраструктури в зонах, які залишаються недостатньо охопленими критичними сервісами, зокрема у сферах відпочинку та культури.

#### 4.5.4 Порівняння з раніше отриманими результатами

**Порівняння з попередніми дослідженнями у Львові.** Порівнюючи результати, отримані в цьому дослідженні з даними, наведеними у [34], можна відзначити загальну відповідність просторових патернів доступності. Зокрема, обидва джерела вказують на високу концентрацію об'єктів в центральних районах і зниження їх доступності ближче до меж міста.

Згідно з [34] середній час доступу до основних послуг у Львові становить приблизно 13 хвилин, що є трохи нижчим, ніж результат, отриманий у цьому дослідженні — 15,34 хвилини. Така відмінність може бути пов'язана з використанням різних підходів до класифікації об'єктів, бо загальна структура просторової доступності зберігається.

**Порівняння з містом Цюрих, Швейцарія.** Для ширшого контексту дослідження доступність у Львові було зіставлено з аналогічними показниками міста Цюрих, який вважається взірцем інтеграції концепції 15-хвилинного міста.

Згідно з даними дослідження, оприлюдненого у 2024 році, понад 99% мешканців Цюриха мають доступ до ключових міських послуг у межах 15-хвилинної пішої досяжності [6, 35]. Також середній час до таких категорій як освіта, охорона здоров'я та зелені зони становить близько 5 хвилин, що є значно нижчим показником ніж отриманні нами результати.

Такі вражаючі результати досягнуті трьома основними факторами: щільною мережею транспорту, пріорітезацією пішоходної інфраструктури та змішаним використанням міських територій. У Цюриху більшість районів

мають інтеграцію житла, комерції та громадських послуг, що дозволяє уникати довгих пересувань [36].

Досвід Цюриха може бути корисним для подальшого плану для міста, що може включати в себе розвиток локальної інфраструктури, стимулювання змішаної забудови та покращення зручності пересування пішки.

## **Висновки до розділу**

Практична реалізація моделі дозволяє виявити основні просторові закономірності та нерівномірності в розподілі доступу до базових послуг у місті Львів. Загалом місто демонструє позитивні тенденції щодо впровадження доступності для мешканців міста, зокрема в центральних районах.

Однак, аналіз також виявив значні просторові диспропорції в периферійних районах, де мешканці мають обмежений доступ до інфраструктури. Це підкреслює необхідність цільових інтервенцій у містобудівному плануванні для забезпечення рівномірного доступу до послуг для всіх мешканців.

## 5. ОБМЕЖЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

Цей розділ висвітлює основні обмеження, які виникли під час реалізації практичної частини цього дослідження, а також окреслено основні напрями для подальшого розвитку.

### 5.1 Обмеження дослідження

Незважаючи на те, що були отриманні дуже непогані результати, варто зазначити кілька ключових обмежень, які впоивають на точність і повноту аналізу:

**Обмежена кількість категорій.** У дослідженні було використано меншу кількість категорій послуг, ніж у деяких публікаціях, присвячених концепції 15-хвилинного міст [6]. Це зумовлено обмеженістю відкритих даних, доступних для міста Львова.

**Орієнтація лише на пішохідну мобільність.** Розрахунки враховували лише піші маршрути, без урахування інших способів пересування (велосипед, громадський транспорт, автомобіль). Такий підхід був свідомо обраний для оцінки міського простору з перспективи маломобільних груп населення — людей похилого віку, осіб з інвалідністю, дітей та батьків із візочками. Однак у майбутньому доцільно враховувати інші типи мобільності.

### 5.2 Перспективи подальшого розвитку

Подальше удосконалення цього проєкту та розширення даного дослідження може базуватись на кількох основних напрямках:

**Оцінка доступності укриттів та об'єктів критичної інфраструктури.** В умовах російсько-української війни особливої актуальності та пріоритетності набуває питання безпеки мешканців міста. Доступ до укриттів, «пунктів незламності» та інших об'єктів критичної інфраструктури слід розглядати не лише як одну з категорій сервісів, а як чинник, що може врятувати життя. Саме

тому важливо не лише включити цю категорію для аналізу, але і переглянути можливість збільшення вагових коефіцієнтів для цієї категорії при підсумковому розрахунку доступності. Також варто зазначити, що час доступу до таких об'єктів має бути в рази меншим, наприклад 3-5 хвилин.

Таким чином наступні моделі можуть враховувати пріоритетність сервісів відповідно до поточних безпекової та соціальної ситуації.

**Врахування соціально-демографічної структури.** Інтеграція результатів соціологічних досліджень (на жаль, теж маємо зараз обмежену кількість цих даних) щодо переважаючих груп населення в різних мікрорайонах, що дозволить враховувати реальні потреби мешканців при планування інфраструктури і розробці стратегій розвитку міста.

**Розробка покращеної зваженої моделі.** Можливо в контексті українських міст варто перейти від рівнозначного підходу до формування інтегрального показника доступності до більш складної моделі з ваговими коефіцієнтами. Ваги можуть визначатися відповідно до пріоритетності категорій для певної цільової групи або району. Це дозволить не лише оцінювати загальний рівень доступності, а й персоналізувати аналіз відповідно до локальних особливостей та сценаріїв використання.

Попри окресленні обмеження, проведене дослідження дозволяє зробити важливі висновки щодо просторової доступності базової інфраструктури у місті Львові. Водночас визначені перспективи розвитку свідчать про те, що створена модель має високий потенціал масштабування та адаптації, зокрема для інших міст.

## 6. ВИСНОВКИ

У межах цієї роботи було реалізовано математичну модель оцінки просторової доступності міського середовища на прикладі міста Львова згідно з принципами концепції 15-хвилинного міста. Проведене дослідження дозволило сформуванати як теоретичну, так і практичну основу для аналізу доступності базових послуг у міському середовищі, з урахуванням сучасних викликів українського урбаністичного контексту.

У процесі роботи:

- проаналізовано поняття просторової доступності, її значення для сталого міського розвитку та інклюзивного середовища;
- ознайомлено та адаптовано математичну модель, запропоновану в роботі Bruno et al. (2024) [6], з урахуванням наявних відкритих даних для Львова;
- реалізовано обчислювальну модель мовою Python із використанням бібліотек GeoPandas, OSRM, Pandas, NumPy та даних OpenStreetMap;
- змодельовано просторову доступність пішохідним способом до об'єктів п'яти функціональних категорій: освіта, охорона здоров'я, культура, спорт і зони відпочинку.
- проведено кількісну оцінку доступності через індекс  $F_{15}$  та оцінено просторову нерівність із використанням індексу Джині;
- побудовано картографічні візуалізації, які демонструють територіальну диференціацію доступу та дозволяють виявити зони з найгіршим і найкращим рівнем забезпечення інфраструктурою.

Результати, що були отримані під час виконання практичної частини свідчать про відносно високий рівень доступності міської інфраструктури у Львові: середній час доступу до базових послуг становить 15,34 хвилини, а 56,6% населення міста проживає в межах 15-хвилинної пішої доступності. Водночас, індекс Джині на рівні 0,252 свідчить про помірний рівень

просторової нерівності, що виражається в перевагах центральних районів над периферією.

Практична цінність результатів полягає у можливості їх використання для обґрунтування рішень у сфері міського планування, зокрема — в розробці сценаріїв просторового розвитку, зонування, визначення пріоритетів для розбудови інфраструктури, з урахуванням потреб маломобільного населення.

Таким чином, проведене дослідження не лише підтверджує доцільність концепції 15-хвилинного міста, але й демонструє можливості її реалізації засобами сучасного просторового аналізу на локальному рівні.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] World Bank. *Urban Population (% of Total Population)*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>.
- [2] TheGlobalEconomy.com. Ukraine: Percent urban population. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.theglobaleconomy.com/Ukraine/Percent\\_urban\\_population/](https://www.theglobaleconomy.com/Ukraine/Percent_urban_population/)
- [3] The Oxford Review. Accessibility in urban planning: Definition and explanation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oxford-review.com/the-oxford-review-dei-diversity-equity-and-inclusion-dictionary/accessibility-in-urban-planning-definition-and-explanation/>.
- [4] Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, *Дослідження доступності міських просторів*, Київ, 2023. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://mtu.gov.ua/files/doslidzhennya-dostupnosti-miskyh-prostoriv.pdf>
- [5] C. Moreno, Z. Allam, D. Chabaud, C. Gall, i F. Pratlong, “Introducing the ‘15-Minute City’: Sustainability, resilience and place identity in future post-pandemic cities,” *Smart Cities*, т. 4, № 1, с. 93–111, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/smartcities4010006>
- [6] M. Bruno, H. P. M. Melo, B. Campanelli, i V. Loreto, *A Universal Framework for Inclusive 15-Minute Cities*, Sony Computer Science Laboratories – Rome, Centro Ricerche Enrico Fermi, Sapienza University of Rome, and Complexity Science Hub Vienna, препринт. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://arxiv.org/abs/2408.03794>
- [7] World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*, Oxford University Press, 1987. [Електронний ресурс]. Доступно:

<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

[8] R. H. M. Pereira, C. Venter, i M. Saraiva, *Introduction to Urban Accessibility: A Practical Guide with R*, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2023.

[Електронний ресурс]. Доступно:

[https://www.ipea.gov.br/acessoportunidades/en/publication/2022\\_book\\_intro\\_acessibilidade\\_r/](https://www.ipea.gov.br/acessoportunidades/en/publication/2022_book_intro_acessibilidade_r/)

[9] K. W. Nur, A. A. Amalia, F. Umar, L. Hafifah, A. A. Alkatiri, K. Mubarak, i M. A. Syamsuddin, “Designing an inclusive city with chrono-urbanism principles,” *International Journal of Architectural Engineering Technology*, т. 10, с. 87–98, 2023.

[Електронний ресурс]. Доступно:

[https://www.researchgate.net/profile/Khilda-Nur/publication/378798693\\_Designing\\_an\\_inclusive\\_city\\_with\\_chrono-urbanism\\_principles/links/65ea4e70b190](https://www.researchgate.net/profile/Khilda-Nur/publication/378798693_Designing_an_inclusive_city_with_chrono-urbanism_principles/links/65ea4e70b190)

[10] L. R. Rodriguez Escalante, *Chrono Urbanism and Its Relationship with the Hybrid Working Culture: Real Estate Opportunities and Perspectives from NYC*, магістерська дисертація, Massachusetts Institute of Technology, MIT Center for Real Estate, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно:

<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/147397>

[11] European Commission, *Smart Cities*. [Електронний ресурс]. Доступно:

[https://commission.europa.eu/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities\\_en](https://commission.europa.eu/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en)

[12] S. Rossetti, P. De Toro, i G. Esposito De Vita, “Developing a 15-minute city: Evaluating urban quality using configurational analysis. The case study of Terni and Matera, Italy,” *Cities*, т. 141, 104611, 2023. [Електронний ресурс]. Доступно:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622823003028>

[13] Jacobs, J. *The Death and Life of Great American Cities*. New York: Random House, 1961.

- [14] Gehl, J. *Cities for People*. Washington, DC: Island Press, 2010. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://islandpress.org/books/cities-people> Island Press
- [15] Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. New York: Oxford University Press, 1977. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://books.google.com/books/about/A\\_Pattern\\_Language.html?id=hwAHmktpk5IC](https://books.google.com/books/about/A_Pattern_Language.html?id=hwAHmktpk5IC) Google Books
- [16] Укрінформ. Якісне відновлення: комплексний підхід у повоєнній відбудові українських міст. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/3870824-akisne-vidnovlenna-kompleksnij-pidhid-u-povoennij-vidbudovi-ukrainskih-mist.html>
- [17] P. Siłka i R. Matykowski, “Using hexagonal grids and network analysis for spatial accessibility assessment in urban environments: A case study of public amenities in Toruń,” *Geographia Polonica*, т. 91, № 4, с. 461–474, 2018.
- [18] B. Grünbaum and G. C. Shephard, *Tilings and Patterns*. New York: W. H. Freeman, 1987.
- [19] Y. Guo, *A Mathematical Study of Tessellations: The Art of Space Filling*, College of William and Mary, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://cklixx.people.wm.edu/teaching/math400/Yining-paper2.pdf>
- [20] T. Monzur, T. Tabassum, i N. Bashir, “Alternative tessellations for the identification of urban employment subcenters: A comparison of triangles, squares, and hexagons,” *Urban Informatics*, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://doi.org/10.1007/s41651-024-00200-5>
- [21] About OpenStreetMap. OpenStreetMap Wiki. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/About\\_OpenStreetMap](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/About_OpenStreetMap).

- [22] Open Source Routing Machine (OSRM). Project-OSRM.org. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://project-osrm.org/>.
- [23] GeeksforGeeks, *Introduction to Dijkstra's Shortest Path Algorithm*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-dijkstras-shortest-path-algorithm/>
- [24] Hamme, A., *Multilevel Dijkstra for Shortest Paths from External Memory*, Bachelor's Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2013. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://i11www.itk.kit.edu/\\_media/teaching/theses/ba-hamme-13.pdf](https://i11www.itk.kit.edu/_media/teaching/theses/ba-hamme-13.pdf)
- [25] Gonsette, J.-S., *Routing Faster Than Dijkstra Thanks to Contraction Hierarchies*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jeansebastien-gonsette.medium.com/routing-faster-than-dijkstra-thanks-to-contraction-hierarchies-232302345921>
- [26] Lviv City Council. (n.d.). *Lviv City Geoportal*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://map.city-adm.lviv.ua/>.
- [27] Python Software Foundation. *csv — CSV File Reading and Writing*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.python.org/3/library/csv.html>
- [28] Esri. *GeoJSON – ArcGIS Online Help*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-online/reference/geojson.htm>
- [29] Esri. *Shapefiles – ArcGIS Online Help*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-online/reference/shapefiles.htm>
- [30] BBBike Extracts. *OpenStreetMap extracts*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://download.bbbike.org/osm/extract/>.
- [31] Docker Docs. *What is a Container? Docker Documentation*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.docker.com/get-started/overview/>

[32] WorldPop, *Ukraine 2020 Constrained Population, Version 1.0*, School of Geography and Environmental Science, University of Southampton, 2020.

[Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.worldpop.org/geodata/summary?id=24777>

[33] Адміністративний поділ міста Львова [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://inlviv.in.ua/wp-content/uploads/2019/02/1363619.jpg>

[34] 15min-City. Whatif.sonycs1.it. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://whatif.sonycs1.it/15mincity/15min.php?idcity=5194>

[35] The Guardian. Europe beats the US for walkable, livable cities, study shows.

2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.theguardian.com/environment/2024/sep/16/europe-beats-the-us-for-walkable-livable-cities-study-shows>

[36] Future Hubs. Zurich: A global hub of culture, innovation, and quality of life.

2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://futurehubs.eu/zurich-a-global-hub-of-culture-innovation-and-quality-of-life/>