

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Серьогін Денис Сергійович

УДК 911.375.1:[004.94:528.88](043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ
РЕГІОНАЛЬНИХ СЕГМЕНТІВ ГЛОБАЛЬНОГО
УРБАНІЗОВАНОГО ПРОСТОРУ (НА ПРИКЛАДАХ
РІЗНОРАНГОВИХ МІСТ)**

Спеціальність 103 – Науки про Землю
(Галузь знань 10 – Природничі науки)

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Серьогін Д.С.

Науковий керівник: Костріков Сергій Васильович, доктор географічних наук,
професор

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Серьогін Д.С. Геоінформаційне моделювання та аналіз регіональних сегментів глобального урбанізованого простору (на прикладах різнорангових міст). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 – Науки про Землю (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2024.

Робота присвячена впровадженню урбогеосистемного аналізу регіональних і локальних сегментів глобального урбанізованого простору на основі геоінформаційного моделювання з використанням даних лідарної зйомки та з реалізацією тематичних сценаріїв користувача (на прикладах різнорангових міст).

У роботі розкрито суспільно-географічні засади урбогеосистемного аналізу через тривимірне моделювання міського середовища, зокрема, сформовано поняттєво-термінологічний апарат міського суспільно-географічного дослідження, який розкриває сутність понять «урбосистема», «урбоекосистема», «соціогеосистема», «урбогеосистема». Уточнено поняття екстернальної та інтернальної урбогеосистеми та охарактеризовано особливості їх дослідження за допомогою геоінформаційних систем (ГІС). Обґрунтовано засади щодо впровадження системного аналізу в урбаністичних дослідженнях суспільної географії, а також окреслено ключові системні компоненти та системні властивості міст, з точки зору їх урбогеосистемного уявлення. Через огляд та аналіз попередніх досліджень, розкрито переваги та доцільність використання даних міського дистанційного зондування, зокрема, лідарної зйомки, в дослідженнях урбогеосистем. Окремо розкрито принципи обробки та аналізу даних лідарної зйомки для тривимірного моделювання міського середовища та застосування у різних міських дослідженнях.

Обґрунтовано методику впровадження урбогеосистемного аналізу різнорангових міст, яка полягає у виокремленні урбогеосистемних властивостей міст, що можуть бути виявлені лише через ГІС-аналіз та

моделювання. Для позначення територіально локалізованих урбогеосистемних властивостей у міському просторі визначено категорію урбаністичної геоситуації та охарактеризовано її ключові властивості. Важливою особливістю урбаністичних геоситуацій є те, що вони формують різнорангові патерни геоситуацій зі спільними властивостями, завдяки чому, аналіз окремої урбаністичної геоситуації може бути релевантним для всіх геоситуацій з таким самим патерном, що вдало поєднується з особливостями збереження та аналізу лідарних даних за обмеженими фрагментами міської місцевості.

Обґрунтовано засади та передумови до реалізації проекту «Цифрове місто», як ключової складової концепції «Розумне місто» у її геопросторовій перспективі. Цифрове місто являє собою модель реального міста, яка складається з оцифрованих компонентів даного міста, інтегрує у собі просторові та атрибутивні дані про місто, завантажені з різних джерел та керується інструментами ГІС-аналізу. Представлено оригінальну методику до побудови моделі цифрового міста на підставі обробки лідарних даних за трьома функціональними блоками: виокремлення будівель (високополігональне та низькополігональне моделювання), відстеження змін у забудові та генерація урбанізованого рельєфу. Представлено також авторські напрацювання з базової реалізації проекту «Цифрове місто» у вигляді веб-ГІС-застосунку, що надає тривимірну візуалізацію міського середовища з підтримкою вищезазначених функціональних блоків.

Проведено урбогеосистемний аналіз різнорангових міст на підставі їх тривимірного моделювання з використанням ГІС-інструментів та з реалізацією тематичних сценаріїв користувача. На підставі тривимірної візуалізації забудови м. Нью-Йорк у середовищі Mapbox Studio, виокремлено та охарактеризовано високорангові патерни забудови житлового, комерційного, індустріального та інституційного типів землекористування, а також проаналізовано шість патернів забудови житлового типу землекористування, з точки зору комфортності проживання та ефективності

використання міського простору. Для візуалізації й аналізу просторового розподілу щільності міської забудови м. Вашингтон, у середовищі ГІС-платформи QGIS побудовано тематичні карти за параметрами кількості, площі та висоти будівель. Через співставлення даних лідарної зйомки за 2017 та 2021 рік, виокремлено зміни у забудові на окремому фрагменті території м. Талін, що дозволило відстежити динаміку урбанізаційних процесів на даній території.

Викладено методику просторової оцінки чисельності населення, яка полягає у пропорційному розподілі чисельності переписного населення по житлових будівлях міста в залежності від їх площі та об'єму, що виокремлюються з даних лідарної зйомки. За даною методикою виконано оцінку чисельності населення у місті Бостон та окрузі Арлінгтон й побудовано тривимірні тематичні карти розподілу населення по міській забудові. За результатами оцінки виділено 7 класів будівель, що мають різну місткість жителів, та проаналізовано особливості їх просторового розподілу.

Викладено методику оцінки енергоспоживання будівель за даними лідарної зйомки, яка полягає у обчисленні показника корисної площі будівель за даними про їх висоту й кількість поверхів, та визначенні за цим показником очікуваного значення енергоспоживання на підставі даних з реальних показників лічильників, відкорегованих в залежності від віку та типу будівель. Виконано тривимірну візуалізацію результатів оцінки енергоспоживання для міст Ейндховен, Амстердам та Маастріхт й проведено урбогеосистемний аналіз просторового розподілу міського енергоспоживання. На підставі виконаної оцінки визначено основні фактори, що впливають на рівень енергоспоживання будівель, а саме: вік та тип будівлі, розмір та форма, специфіка виробничих процесів у підприємстві, тісне розміщення малоповерхової забудови поряд з високоповерховою, наявність модернізації будівель, локальні кліматичні особливості.

Розкрито півсферичний підхід до аналізу та оцінки видимості у міському середовищі. Підхід полягає у обчисленні об'єму видимого простору з певної

точки спостереження у змодельованому за лідарними даними міському середовищі через кругове прокладення безлічі ліній видимості, що обмежуються точками перешкод, та формують півсферу видимості. Побудована півсфера дозволяє виокремити такі візуальні параметри міського середовища, як: видимий і невидимий об'єм міського простору та видимий об'єм небосхилу. За представленою методикою виконано аналіз видимості для різних урбаністичних геоситуацій та розглянуто конкретні приклади реалізації вказаного підходу при вирішенні деяких урбаністичних задач, а саме: оцінка візуального імпаكتу будівель, розподіл міських телекомунікацій, визначення точок найкращого огляду та найкращого розміщення об'єктів.

Обґрунтовано актуальність впровадження урбогеосистемного аналізу до дослідження території м. Харкова за наведеними у роботі методиками та прикладними аспектами. Викладено рекомендації та попередній план дій для реалізації шести різних сценаріїв використання даних лідарної зйомки для м. Харкова з урахуванням його поточних урбаністичних проблем. За даними з *OpenStreetMap* для м. Харків побудовано карти щільності забудови та виконано оцінку чисельності населення площі-метричним методом, що дозволило додатково підкреслити недоліки існуючих даних та продемонструвало доцільність застосування лідарних даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в дисертаційній роботі:

вперше:

- здійснене впровадження урбогеосистемного підходу до виокремлення й аналізу різних регіональних і локальних сегментів глобального урбанізованого простору;
- проведено комплексне дослідження урбогеосистем через тривимірне моделювання міського середовища різнорангових міст;
- впроваджено геоситуаційний підхід до дослідження урбогеосистем, зокрема розкрито й обґрунтовано категорію урбаністичної геоситуації та встановлено її ключові властивості;

– розроблено методику для побудови 3D-сутності «Цифрове місто» на підставі обробки лідарних даних та візуалізації її результатів у веб-ГІС середовищі;

вдосконалено:

– поняттєво-термінологічний апарат урбогеосистемного аналізу й дослідження на підставі даних дистанційного зондування, зокрема уточнено поняття екстернальної та інтернальної урбогеосистем, а також зміст аналітичної функціональності міського дистанційного зондування;

– методику урбогеосистемного аналізу міського середовища за рахунок виокремлення урбогеосистемних властивостей міст, які можуть бути виявлені лише через тривимірне моделювання міської забудови;

– функціональні процедури аналізу лідарних даних з метою виокремлення високополігональних та низькополігональних моделей будівель;

– методику оцінки чисельності населення в забудовах та оцінки енергоспоживання забудов за рахунок використання геометричної інформації про будівлі, отриманої з даних лідарної зйомки;

– підходи до аналізу видимості у міському середовищі за рахунок введення концепції півсфери видимості, що ґрунтується на теорії сприйняття екологічних оптичних променів у середовищі життя людини, та застосування її до тривимірної моделі міської забудови;

отримали подальший розвиток:

– урбаністичні дослідження з використанням даних міського дистанційного зондування, зокрема повітряної лідарної зйомки;

– розмежування функціональних зон різнорангових міст шляхом виокремлення патернів забудови таких зон;

– заходи щодо практичного застосування теорії урбогеосистем через ГІС-моделювання міського середовища;

– застосування даних лідарної зйомки з метою відстеження та оцінки мілітарного імпаكتу на міську забудову.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів полягає у уточненні поняттєво-термінологічного апарату та поглибленні урбогеосистемного підходу до дослідження урбогеосистем через ГІС-моделювання та аналіз міського середовища на підставі даних лідарної зйомки, виокремленні та обґрунтуванні категорії урбаністичної геоситуації. Розроблена методика та користувацькі сценарії, викладені у дисертації можуть бути використані у ряді міських досліджень, зокрема в урбаністиці, міському плануванні, муніципальному менеджменті, геомаркетингу, екологічних дослідженнях, тощо. Описані алгоритмічні процедури з обробки лідарних даних та виокремлення будівель можуть бути впроваджені в міських ГІС та геопорталах, що надають базу геопросторових даних та візуалізацію окремих міст у цифровому середовищі. На підставі розвинутого у дисертації урбогеосистемного аналізу та геоситуаційного підходу може бути удосконалений та оптимізований міський моніторинг, а також планування стратегій та програм стійкого розвитку міста.

Результати дисертаційного дослідження були впроваджені в НДР «Великий Харків: обґрунтування та теоретико-методологічна основа дослідження сучасних процесів агломерації» (державний реєстраційний номер 0121U113116) на кафедрі соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Немця, а також використані ГО «Науково-дослідний інститут регіонального економічного розвитку» (довідка №6/1 від 04.04.2024). Викладені у роботі рекомендації щодо просторового аналізу території міста Харкова на підставі ГІС-аналізу та моделювання даних лідарної зйомки можуть бути впроваджені Департаментом економіки і міжнародних відносин Харківської обласної військової адміністрації (довідка № 06.01-14/1512 від 07.05.2024). Окремі положення дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес факультету геології, географії, рекреації і туризму у рамках курсів «Інформатика з основами геоінформатики», «Географічні інформаційні системи», «Урбаністична географія».

Ключові слова: урбогеосистема, урбаністичне середовище, міські дослідження, системний підхід, суспільна географія, ГІС, дистанційне зондування Землі, лідарні дані, виокремлення будівель, тривимірне моделювання міста, цифрове місто, урбаністичні геоситуації, ГІС-аналіз, різнорангові міста, урбанізація

ABSTRACT

Serohin D.S. The geoinformation modeling and analysis of the global urbanized space regional segments (on the cities of various ranks examples) – Qualification scientific paper, manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy in specialty 103 – Earth Sciences (Field of knowledge 10 – Natural Sciences). – V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2024.

The work is devoted to the implementation of urbogeosystem analysis of the global urbanized space regional and local segments based on geoinformation modeling using LiDAR data with the implementation of thematic use-cases (on the cities of various ranks examples).

The thesis reveals the socio-geographical foundations of urbogeosystem analysis through three-dimensional modeling of the urban environment, in particular, formed the conceptual and terminological apparatus of urban socio-geographical research, which reveals the essence of "urban system", "urban ecosystem", "socio-geosystem", "urban geosystem". The concepts of external and internal urbogeosystems are clarified and the peculiarities of their study using geographic information systems (GIS) are characterized. The principles for the implementation of system analysis in urban studies of human geography are substantiated, and the key system components and system properties of cities are outlined in terms of their urbogeosystem representation. Through the review and analysis of previous studies, the advantages and expediency of using urban remote sensing data, in particular, LiDAR survey data, in the study of urbogeosystems are revealed. The principles of processing and analyzing LiDAR data for three-

dimensional modeling of the urban environment and its application in various urban studies are also revealed.

The methodology for implementing the urbogeosystem analysis of cities of various ranks is substantiated, which consists in the identification of urbogeosystem properties of cities that can be identified only through GIS analysis and modeling. To refer geographically localized urban geosystem properties in urban space, the category of urban geosituation is defined and its key properties are characterized. An important feature of urban geosituations is that they form differently ranked patterns of geosituations with common properties, so that the analysis of a particular urban geosituation can be relevant for all geosituations with the same pattern, which is successfully combined with the peculiarities of storing and analyzing LiDAR data in limited fragments of urban areas.

The principles and prerequisites for the implementation of the Digital City project as a key component of the Smart City concept in its geospatial perspective are substantiated. A Digital City is a model of a real city, which consists of digitized components of this city, integrates spatial and attribute data about the city downloaded from various sources and is managed by GIS analysis tools. The thesis presents an original methodology for building a Digital City model based on the LiDAR data processing in three functional blocks, such as building extraction (high-poly and low-poly modeling), buildings change detection, and urbanized digital elevation model generation. The thesis also presents the author's developments in the basic implementation of the Digital City project in the form of a web-based GIS application that provides a three-dimensional visualization of the urban environment with support for the above functional blocks.

An urbogeosystem analysis of the cities of various ranks is conducted on the basis of their three-dimensional modeling using GIS tools and with the implementation of thematic use cases. Based on the three-dimensional visualization of New York City buildings in the Mapbox Studio, high-ranking patterns of residential, commercial, industrial and institutional land use types were identified and characterized, and six patterns of residential land use types were analyzed in

terms of living comfort and efficiency of urban space use. In order to visualize and analyze the spatial distribution of urban density in Washington, D.C., thematic maps were created in the QGIS platform by the parameters of the number, area, and height of buildings. By comparing the LiDAR data for 2017 and 2021, changes in the buildings of a separate fragment of the territory of Talin were identified, which made it possible to track the dynamics of urbanization processes in this area.

The thesis describes the methodology of spatial population estimation which consists in the proportional distribution of the census population among residential urban buildings, depending on their area and volume, which are extracted from the LiDAR data. This methodology was used to estimate the population in the city of Boston and Arlington County and to build three-dimensional thematic maps of the population distribution by urban buildings. Based on the estimation results, 7 classes of buildings with different occupancy capacities were identified and their spatial distribution was analyzed.

The thesis describes the methodology for estimating the buildings' energy consumption based on LiDAR data, which consists in calculating the usable area of buildings based on their height and number of floors, and determining the expected value of energy consumption based on this indicator on the basis of data from actual meter readings, adjusted for the age and type of buildings. A three-dimensional visualization of the energy consumption estimation results for the cities of Eindhoven, Amsterdam, and Maastricht was performed, and an urbogeosystem analysis of the spatial distribution of urban energy consumption was conducted. Based on the estimation, the main factors affecting the level of building energy consumption were identified, such as: building age and type, building size and shape, specifics of production processes in the enterprise building, close proximity of low-rise buildings to high-rise buildings, availability of building modernization, and local climate features.

The hemispherical approach to the analysis and estimation of visibility in the urban environment is presented. The approach consists in calculating the volume of visible space from a certain observation point in the urban environment modeled by

LiDAR data by circularly laying a set of lines of sight, limited by obstacle points, which form a visibility hemisphere. The constructed hemisphere allows us to distinguish such visual parameters of the urban environment as the visible and invisible volume of urban space and the visible volume of the sky. The presented methodology is used to visibility analysis for different urban geosituations and to consider specific examples of the implementation of this approach in solving some urban problems, namely: assessment of buildings' visual impact, distribution of urban telecommunications, determination of the best viewpoints and the best placement of objects.

The relevance of introducing urbogeosystem analysis to the study of the Kharkiv city territory using the methods and applied aspects presented in the research is substantiated. Recommendations and a preliminary action plan for the implementation of six different use cases of LiDAR data for Kharkiv city, taking into account its current urban problems, are presented. Using the data from OpenStreetMap for Kharkiv, building density maps were constructed and the population was estimated using the area-metric method, which allowed to further emphasize the shortcomings of existing data and demonstrated the feasibility of using LiDAR data.

The scientific novelty of the obtained results is that in the thesis:

for the first time:

- the urbogeosystem approach to identifying and analyzing various regional and local segments of the global urbanized space was implemented;
- a comprehensive study of urbogeosystems was performed through three-dimensional modeling of the urban environment of differently ranked cities;
- the geosituational approach to the study of urbogeosystems was introduced, in particular, the category of urban geosituation was revealed and substantiated and its key properties were established;
- methods for building the Digital City 3D entity based on LiDAR data processing and visualization of its results in a web GIS environment was developed;

improved:

- the conceptual and terminological apparatus of urbogeosystem analysis and research based on remote sensing data, in particular, the concepts of external and internal urbogeosystems, as well as the content of the analytical functionality of urban remote sensing are clarified;

- methods of urbogeosystem analysis of the urban environment by identifying the urbogeosystem properties of cities that can only be revealed through three-dimensional modeling of urban development;

- functional procedures of LiDAR data analyzing in order to extract high-polygonal and low-polygonal building models;

- methods of building population estimation and building energy consumption estimation by using geometric information about buildings obtained from LiDAR data;

- approaches to the visibility analysis in the urban environment by introducing the visibility hemisphere concept based on the ecological theory of perception in the human environment and applying it to a three-dimensional urban buildings model;

received further development:

- urban studies based on urban remote sensing data, in particular, airborne LiDAR surveys;

- delimitation of functional zones of variously ranked cities by identifying development patterns of such zones;

- measures for the practical application of the urbogeosystems theory through GIS modeling of the urban environment;

- application of LiDAR data to track and assess the military impact on urban buildings.

The theoretical and practical significance of the obtained results is to clarify the conceptual and terminological apparatus and deepen the urbogeosystem approach to the study of urbogeosystems through GIS modeling and analysis of the urban environment based on LiDAR data, as well as to identify and substantiate the category of urban geosituation. The developed methodology and use cases presented

in this thesis can be used in a variety of urban studies, including urban planning, municipal management, geomarketing, environmental studies, etc. The described algorithmic procedures for processing LiDAR data and building extraction can be implemented in urban GIS and geoportals that provide a geospatial database and visualization of certain cities in the digital environment. Based on the urbogeosystem analysis and geosituational approach developed in this thesis, urban monitoring, as well as planning of strategies and programs for sustainable urban development, can be improved and optimized.

The results of the thesis research were implemented in the research work “Great Kharkiv: substantiation and theoretical and methodological basis for the study of modern agglomeration processes” (state registration number 0121U113116) at the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies, and were also used by the Community organization “Research Institute for Regional Economic Development” (certificate No. 6/1 of 04.04.2024). The recommendations for spatial analysis of Kharkiv city territory based on GIS analysis and modeling of lidar data presented in this work can be implemented by the Department of Economics and International Relations of the Kharkiv Regional Military Administration (certificate No. 06.01-14/1512 of 07.05.2024). Certain aspects of the thesis have been implemented in the educational process of the Faculty of Geology, Geography, Recreation and Tourism in the courses “Informatics with the basics of geoinformatics”, “Geographic Information Systems”, “Urban Geography”.

Key words: urbogeosystem, urban environment, urban studies, systems approach, human geography, GIS, remote sensing, LiDAR data, building extraction, 3D city modeling, digital city, urbanistic geosituation, GIS analysis, cities of various ranks, urbanization.

СПИСОК

**наукових публікацій здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії
з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 103 – «Науки
про Землю»**

**кафедри соціально-економічної географії і регіоназнавства імені
Костянтина Немця, Серьогіна Дениса Сергійовича,
які висвітлюють наукові результати дисертації
на тему «Геоінформаційне моделювання та аналіз регіональних
сегментів глобального урбанізованого простору (на прикладах
різнорангових міст)»**

*Публікації у наукових виданнях, включених до переліку фахових
видань України:*

1. Костріков С. Серьогін. Д., Бережний В. Візуальний аналіз урбаністичного середовища як складова урбогеосистемного підходу. *Часопис соціально-економічної географії*. 2021. Вип.30(1). С. 7-23.

DOI: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/socecongeo/article/view/17764/16278>

Особистий внесок Серьогіна Д.: опис процедур розрахунку півсфери видимості у середовищі веб-ГІС ELiT, підготовка ілюстративних матеріалів, підготовка даних та виконання візуалізації півсфери видимості для міст Монреаль та Мюнстер.

Особистий внесок Кострікова С.: аналіз попередніх досліджень, визначення та обґрунтування концепції півсфери видимості, опис формалізації видимості у 3D-просторі через концепцію півсфери видимості, визначення ролі концепції півсфери видимості в урбогеосистемному підході.

Особистий внесок Бережного В.: опис процедур розрахунків візуальних параметрів на підставі півсфери видимості, опис окремих процедур розрахунку півсфери видимості на базі веб-ГІС застосування, опис прикладних аспектів застосування функціональності аналізу видимості.

2. Серьогін Д.С., Костріков С.В. Просторова оцінка енергоспоживання забудов на підставі тривимірного моделювання міського середовища. *Часопис соціально-економічної географії*. 2023. Вип. 34. С. 27-41.

DOI: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-01>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/socecongeo/article/view/23538/21460>

Особистий внесок Серьогіна Д.С.: опис 3D-просторового підходу до диференційованої оцінки енергоспоживання міськими забудовами, проведення урбогеосистемного аналізу результатів просторової оцінки енергоспоживання.

Особистий внесок Кострікова С.В.: аналіз попередніх досліджень, підготовка розділу про низькополігональне моделювання будівель для розрахунку енергоспоживання, виведення формул для розрахунку енергоспоживання забудов.

Публікації у наукових фахових виданнях України, які входять до Web of science:

3. **Серьогін Д.С.** Принципи обробки та тривимірного моделювання через лідарні дані для прикладних досліджень міського середовища. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2022. Вип. 57. С. 218-233 (**Web of Science**).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-17>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/21385/19956>

4. **Серьогін Д.С., Костріков С.В.** До питання виокремлення урбаністичних геоситуацій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2022. Вип. 58. С. 241-256 (**Web of Science**).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-19>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/22204/20544>

Особистий внесок Серьогіна Д.С.: визначення та обґрунтування властивостей урбаністичних геоситуацій, підготовка ілюстративних матеріалів та їх аналіз, викладення прикладних аспектів виокремлення урбаністичних геоситуацій, обґрунтування застосування лідарних даних та ГІС для дослідження патернів урбаністичних геоситуацій.

Особистий внесок Кострікова С.В.: підготовка вступної частини статті, огляд і аналіз попередніх досліджень, обґрунтування предметного контенту урбаністичної геоситуації, пояснення компаративного аналізу геоситуаційних патернів, опис окремих аспектів виокремлення геоситуацій через VA-функціональність.

5. **Kostrikov S., Kravchenko K., Serohin D., Bilianska S., Savchenko A.** 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"*. 2023. Vol. 59. P. 140-169 (**Web of Science**).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-11>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/23202/21243>

Особистий внесок Серьогіна Д.: опис методики побудови цифрового міста у ГІС на підставі даних з OpenStreetMap, обґрунтування використання

лідарних даних у проекті Цифрове місто, виокремлення урбаністичних геоситуацій у проекті Цифрове місто.

Особистий внесок Кострікова С.: обґрунтування наукової проблеми, визначення та обґрунтування урбогеосистемного підходу для забезпечення реалізації проектів «Цифрове місто», опис методик обробки лідарних даних для побудови тривимірних моделей до проекту «Цифрове місто»

Особистий внесок Кравченко К.: огляд та аналіз попередніх досліджень, підготовка геопросторових даних для побудови проектів «Цифрове місто» для міст Харків та Дніпро, аналіз результатів ГІС-аналізу за побудованими картами.

Особистий внесок Білянської С.: формування проекту «Цифрове місто» для м. Харків, обґрунтування проведення геомаркетингового дослідження на підставі проекту «Цифрове місто», побудова карт м. Харкова та їх аналіз.

Особистий внесок Савченко А.: формування проекту «Цифрове місто» для м. Дніпро, визначення особливостей аналізу забезпеченості міського населення мережами громадського транспорту у проекті «Цифрове місто», побудова карт м. Дніпро та їх аналіз.

Публікації у наукових виданнях інших держав:

6. Kostrikov S., Seryogin D. Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. *Urban Agglomeration* / Edited by A. Battisti and S. Baiani. INTECH Open, 2022. P. 251-273.

DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.102482>

URL: <https://www.intechopen.com/chapters/80383>

Особистий внесок Серьогіна Д.: підготовка даних та виконання розрахунків для тривимірної візуалізації результатів оцінки чисельності населення, опис особливостей обробки та аналізу та моделювання даних лідарної зйомки.

Особистий внесок Кострікова С.: обґрунтування наукової проблеми, викладення та пояснення концепції урбогеосистем, опис функціональності веб-ГІС застосунку для впровадження урбогеосистемного підходу, опис методики виконання оцінки чисельності населення за даними лідарної зйомки.

Наукові публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Серьогін Д.С. Костріков С.В. Особливості та переваги ГІС-моделювання міського середовища на підставі лідарної інформації. *Реґіон – 2020: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 8-9 жовтня 2020 р.). Харків, 2020. С. 34-36

8. **Серьогін Д.С.** «Юз-кейси» як предметні впровадження результатів, отриманих через обробку лідарних даних у середовищі ELiT. *Регіон-2021: Суспільно-географічні аспекти*: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців (м. Харків, 15 квітня 2021 р.). Харків, 2021. С. 45-48.

9. **Serohin D.S.** Features and advantages of the urban environment GIS-modeling based on LiDAR information. *Proceedings of Academic and scientific challenges of diverse fields of knowledge in the 21st century* (Kharkiv, 12 March, 2021). Kharkiv, 2021. P. 273-279.

10. **Серьогін Д.С.** ГІС-моделювання та тривимірна візуалізація міської забудови в середовищі веб-ГІС порталу Mapbox. *Регіон – 2021: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 21 жовтня 2021 р.). Харків, 2021. С. 157-159.

11. **Серьогін Д.С., Костріков С.В.** Виокремлення урбаністичних геоситуацій в міському середовищі. *Сьомі Сумські наукові географічні читання*: збірник матеріалів Всеукраїнської наукової конференції (м. Суми, 14-16 жовтня 2022 р.). Суми, 2022. С. 129-133.

12. Костріков С.В., **Серьогін Д.С.** Візуальний аналіз міського середовища для підтримки прийняття рішень у муніципальному менеджменті. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "*Міста та регіони в епіцентрі просторових змін*" (м. Київ, 24-25 листопада 2022 р.). Київ, 2023. С. 42-43.

13. **Серьогін Д.С., Костріков С.В.** Переваги лідарних даних для відстеження та оцінки руйнувань міської забудови під час воєнних дій. *Регіон – 2022: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 24 листопада 2022 р.). Харків, 2022. С. 180-184

14. Костріков С.В., **Серьогін Д.С.** Відтворення топографічної поверхні урбанізованих територій на підставі геообробки лідарних даних // Матеріали доповідей XIII науково-практичного семінару за міжнародної участі "*Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат та прилеглих територій*" (м. Львів, 2–3 березня 2023 р.). Львів, 2023, С. 72-77.

15. **Серьогін Д.С., Костріков С.В.** Моделювання урбаністичного середовища через обробку лідарних даних для оцінки воєнного імпаку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «*Геофорум-2023*» (Львів-Брюховичі, 19-21 квітня 2023 р.). Львів, 2022. С. 43-47.

16. Симоненко І.В., Костріков С.В., **Серьогін Д.С.** Суспільно-географічний ландшафт як один із способів подання міського довкілля //

Реґіон – 2023: суспільно-географічні аспекти: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 20 квітня 2023 р.). Харків, 2023. С. 54-56.

17. **Серьогін Д.С., Білянська С.М.** Застосування оцінки чисельності населення у житлових будівлях на основі лідарних даних з метою геомаркетингового аналізу міської території. *Реґіон-2023: стратегія оптимального розвитку: Матеріали міжнародної науково–практичної конференції (м. Харків 20 жовтня 2023 р).* Харків, 2023. С. 140-143.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	22
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. СУСПІЛЬНО-ГЕОГРАФІЧНІ ЗАСАДИ	
УРБОГЕОСИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ЧЕРЕЗ ТРИВИМІРНЕ	
МОДЕЛЮВАННЯ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА.....	
1.1. Поняттєво-термінологічний апарат дослідження урбогеосистем (УГС). УГС як тематичний клас соціогеосистем.....	33
<i>1.1.1. Урбогеосистема як об'єкт дослідження суспільної географії. Екстернальні та інтернальні УГС.....</i>	33
<i>1.1.2. Системний підхід в урбаністичних дослідженнях суспільної географії.....</i>	43
1.2. Дистанційне зондування міського середовища для цілей його ГІС-моделювання (огляд попередніх досліджень).....	52
1.3. Лідарна з'йомка та геообробка її результатів для відтворення і 3D-подання міського середовища.....	64
<i>1.3.1. Особливості збору, збереження і обробки лідарних даних.....</i>	64
<i>1.3.2. Застосування даних лідарної зйомки в міських дослідженнях (огляд попередніх досліджень).....</i>	71
Висновки до розділу 1.....	79
РОЗДІЛ 2. ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ ПІДХІД В МЕЖАХ	
УРБОГЕОСИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА НА	
ПІДСТАВІ ДИСТАНЦІЙНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДУВАННЯ	
(ЛІДАРНОЇ З'ЙОМКИ).....	
2.1. Виокремлення урбогеосистемних властивостей різнорангових міст за допомогою платформної та модульної ГІС-функціональності. Категорія урбаністичної геоситуації.....	81
2.2. Побудова 3D-сутності «Цифрове Місто» як ключова передумова виокремлення та аналізу урбогеосистем.....	90
2.3. Методика та функціональні процедури побудови 3D-сутності «Цифрове Місто» на підставі обробки лідарних даних.....	100
<i>2.3.1. Виокремлення та високополігональне моделювання будівель.....</i>	103

2.3.2. Виокремлення та низькополігональне моделювання будівель.....	109
2.3.3. Визначення часових змін у архітектурній морфології міста.....	119
2.3.4. Генерація урбанізованого рельєфу в межах географічного екстену міста.....	122
2.4. Структура та архітектура веб-ГІС-застосування для відтворення урбаністичного середовища.....	126
Висновки до розділу 2.....	131
РОЗДІЛ 3. ВПРОВАДЖЕННЯ УРБОГЕОСИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ГЛОБАЛЬНОГО УРБАНІЗОВАНОГО ПРОСТОРУ НА ПІДСТАВІ ЗМІСТУ ГІС-ПОРТАЛІВ ІЗ 3D-ПОДАННЯМ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА.....	134
3.1. Визначення різнорангових патернів урбаністичних геоситуацій як виокремлення урбогеосистемних властивостей міського середовища.....	134
3.1.1. Виокремлення патернів урбаністичних геоситуацій за тривимірними моделями забудов у середовищі <i>MapBox Studio</i> ...	134
3.1.2. Аналіз у середовищі <i>QGIS</i> просторового розподілу патернів урбаністичних геоситуацій по території міста.....	145
3.1.3. Відстеження змін у забудові окремих геоситуацій у середовищі <i>City Change Management</i>	152
3.2. Перший прикладний аспект урбогеосистемного аналізу – реалізація користувачького сценарію оцінки чисельності міського населення по геометрії забудов.	155
3.2.1. Площе-метричний та об'єм-метричний методи оцінки чисельності міських жителів.	159
3.2.2. Операційна послідовність реалізації даного користувачького сценарію.....	163
3.2.3. Регіональні імплементації сценарію по різнорангових містах.	171
3.3. Другий прикладний аспект – реалізація користувачького сценарію просторової оцінки енергоспоживання забудов.....	191
3.3.1. 3D-просторовий підхід до диференційованої оцінки енергоспоживання міськими забудовами.	191
3.3.2. Приклади реалізації даного користувачького сценарію.....	200

3.4. Третій прикладний аспект – реалізація користувацького сценарію аналізу видимості у міському середовищі.....	218
3.4.1. <i>Короткий методичний огляд 2D-3D підходів до аналізу видимості у міському середовищі.</i>	220
3.4.2. <i>Формалізована методика «Лінія Видимості – Півсфера Видимості у міському середовищі»</i>	224
3.4.3. <i>Приклади реалізації користувацького сценарію аналізу видимості у міському середовищі.</i>	230
3.5. Актуальність та рекомендації щодо впровадження урбогеосистемного аналізу до території м. Харків.....	238
Висновки до розділу 3.....	255
ВИСНОВКИ.....	258
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	263
ДОДАТКИ.....	279

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ГІС – географічні інформаційні системи
ДЗЗ – дистанційне зондування Землі
УГС – урбогеосистема
УГСит – урбаністична геоситуація
УОМ – урбогеосистемна онтологічна модель
ЦМР – цифрова модель рельєфу
ЦМП – цифрова модель поверхні
НП – низькополігональний
ВП – високополігональний
ПМ –площе-метричний
ОМ – об’єм-метричний
ПСВ – півсфера видимості
ЕнСп – енергоспоживання
ЗК – землекористування
LiDAR (лідар) – Light Detection and Ranging
TIN – Triangulated Irregular Network
LOD – Level of Detail
RANSAC – RANdom SAmple Consensus
VA – Visibility Analysis

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасні міста є складними системами, які поєднують у собі найбільші центри економічної, політичної, освітньої та культурної діяльності людства. Саме у них зосереджуються ключові державні установи, а також офіси та торгові підприємства великих корпорацій. Крім того, міста залишаються основним середовищем проживання людини, яка має потребу в комфортних умовах життя. Тож стан зазначених ланок суспільно-історичної практики людства може безпосередньо впливати не тільки на цілі регіони, а й на суспільство загалом. При цьому відповідні урбанізовані території продовжують стрімко розширюватися, ущільнюватися і ставати все більш диференційованими – все це призводить до зростання внутрішньоміського хаосу і виникнення низки соціально-економічних проблем. Для належного контролю за їх станом та для дослідження міського довкілля, а також розробки ефективних стратегій їхнього планування та управління потрібні як стало обґрунтовані теоретичні підходи, так і сучасні високотехнологічні інструменти. В останні десятиліття ці функції все частіше беруть на себе геоінформаційні системи (ГІС) та їх відповідні модулі моделювання, які надають середовище для зберігання, обробки та відтворення на підставі просторових даних про міське довкілля, а також виконують складні операції просторового аналізу для вирішення численних проблем урбанізованих територій.

Сучасні ГІС-платформи та відповідні модулі регулярно оновлюються та своєчасно підлаштовуються під прогресуючі можливості апаратного забезпечення та сучасні тренди інформаційних технологій загалом. Ті ГІС-технології, які могли бути передовими ще 10 років тому, сьогодні вже можуть бути застарілими, у свою чергу нові технології все ще мають нерозкритий потенціал і не задіяні повною мірою у вирішенні реальних прикладних завдань.

Виходячи з цього, в аспекті дослідження швидкозростаючих міст, одним з найважливіших завдань сучасних міських суспільно-географічних досліджень є синхронізація новітніх ГІС-технологій з актуальними запитами щодо вирішення міських проблем і таким чином – своєчасне знаходження ефективного застосування геоінформаційних технологій для вирішення проблем урбанізованих територій.

Одним із таких не розкритих повною мірою та недооцінених на наш погляд ГІС-застосувань є тривимірне моделювання міського середовища на основі даних лідарної зйомки – дистанційного лазерного сканування земної поверхні. Скануючі лідари (від англomовного акроніму *LiDAR - Light Detection and Ranging*) в системах машинного зору формують двовимірну або тривимірну картину навколишнього простору, що вдало корегується із можливостями повноформатних ГІС-платформ надавати тривимірну візуалізацію у вигляді так званої 3D-Сцени.

Тривимірна модель міста не просто спрощує його візуальне сприйняття у віддалених камеральних умовах, вона також дозволяє виявити та переосмислити певні властивості та параметри міста, просторовий розподіл яких може дати якісно нову інформацію про міське планування та функціонування, яку неможливо було відстежити при двовимірному поданні міста. Саме ця можливість отримати нову інформацію про міста й мотивує нас до їхнього дослідження через тривимірне моделювання.

Для сталого впровадження зазначеного застосування в урбаністичні дослідження нами приймається урбогеосистемний підхід, який вже був тісно переплетений із ГІС у низці попередніх досліджень. Цей підхід може дати важливу методологічну базу для розробки сучасних ГІС-проектів, що пріоритезують саме тривимірне подання міста. У свою чергу, саме через тривимірне моделювання ми можемо суттєво розширити можливості урбогеосистемного підходу, відкрити в ньому нові методологічні відгалуження та сприяти його залученню до стрімко набираючої популярності концепції «Розумного міста».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційне дослідження пов'язане з напрямками науково-дослідної роботи, що виконується в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна, а також з науковою тематикою кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Немця стосовно теоретико-методичних та прикладних проблем розвитку регіонів в аспекті суспільної географії. Зокрема, дослідження пов'язане з темою кафедри «Великий Харків: обґрунтування та теоретико-методологічна основа дослідження сучасних процесів агломерації» (державний реєстраційний номер 0121U113116). Також окремі результати дисертаційного дослідження були впроваджені ГО «Науково-дослідний інститут регіонального економічного розвитку» (довідка №6/1 від 04.04.2024) та можуть бути впроваджені Департаментом економіки і міжнародних відносин Харківської обласної військової адміністрації (довідка № 06.01-14/1512 від 07.05.2024).

Мета дослідження полягає у впровадженні урбогеосистемного аналізу регіональних і локальних сегментів глобального урбанізованого простору на основі геоінформаційного моделювання через дані лазерного дистанційного зондування з реалізацією декількох тематичних сценаріїв користувача (на прикладах різнорангових міст).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **наукові завдання:**

- розкрити поняттєво-термінологічний апарат дослідження урбогеосистем, обґрунтувати місце урбогеосистемного підходу у суспільно-географічних дослідженнях;
- виконати аналіз попередніх досліджень міського середовища з використанням даних дистанційного зондування та розкрити принципи обробки даних лідарної зйомки;
- визначити особливості урбогеосистемного аналізу регіональних сегментів глобального урбанізованого простору через геообробку та моделювання лідарних даних, розкрити категорію урбаністичної геоситуації;

- побудувати у вказаних просторових екстентах урбаністичне середовище – тривимірну модельну сутність, яка відбиває реально існуюче міське довкілля;
- обґрунтувати засади та передумови до реалізації проєкту «Цифрове місто» в рамках впровадження концепції «Розумне місто»;
- розкрити методику та функціональні процедури побудови проєкту «Цифрове місто» через обробку лідарних даних та їх тривимірну візуалізацію на базі геоінформаційного веб-застосування;
- визначити патерни урбаністичних геоситуацій за тривимірними моделями забудов різнорангових міст;
- виконати оцінку чисельності міського населення та оцінку енергоспоживання будівель по геометрії забудов, провести аналіз просторового розподілу даних показників по різнорангових містах;
- розкрити методику аналізу видимості на підставі півсферичного підходу та представити приклади реалізації даної методики в урбанізованому просторі різнорангових міст;
- обґрунтувати актуальність та рекомендації щодо впровадження урбогеосистемного аналізу до м. Харків через геообробку та моделювання лідарних даних.

Об’єктом дослідження є реально існуюче, фізичне міське довкілля у регіональних і локальних сегментах глобального урбанізованого простору.

Предметом дослідження є урбогеосистемні властивості різнорангових міст, що виявляються через ГІС-аналіз та моделювання міського середовища.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в дисертаційній роботі:

вперше:

- здійснене впровадження урбогеосистемного підходу до виоркремення й аналізу різних регіональних і локальних сегментів глобального урбанізованого простору;

- проведено комплексне дослідження урбогеосистем через тривимірне моделювання міського середовища різнорангових міст;
- впроваджено геоситуаційний підхід до дослідження урбогеосистем, зокрема розкрито й обґрунтовано категорію урбаністичної геоситуації та встановлено її ключові властивості;
- розроблено методику для побудови 3D-сутності «Цифрове місто» на підставі обробки лідарних даних та візуалізації її результатів у веб-ГІС середовищі;

вдосконалено:

- поняттєво-термінологічний апарат урбогеосистемного аналізу й дослідження на підставі даних дистанційного зондування, зокрема уточнено поняття екстернальної та інтернальної урбогеосистем, а також зміст аналітичної функціональності міського дистанційного зондування;
- методику урбогеосистемного аналізу міського середовища за рахунок виокремлення урбогеосистемних властивостей міст, які можуть бути виявлені лише через тривимірне моделювання міської забудови;
- функціональні процедури аналізу лідарних даних з метою виокремлення високополігональних та низькополігональних моделей будівель;
- методику оцінки чисельності населення в забудовах та оцінки енергоспоживання забудов за рахунок використання геометричної інформації про будівлі, отриманої з даних лідарної зйомки;
- підходи до аналізу видимості у міському середовищі за рахунок введення концепції півсфери видимості, що ґрунтується на теорії сприйняття екологічних оптичних променів у середовищі життя людини, та застосування її до тривимірної моделі міської забудови;

отримали подальший розвиток:

- урбаністичні дослідження з використанням даних міського дистанційного зондування, зокрема повітряної лідарної зйомки;

- розмежування функціональних зон різнорангових міст шляхом виокремлення патернів забудови таких зон;
- заходи щодо практичного застосування теорії урбогеосистем через ГІС-моделювання міського середовища;
- застосування даних лідарної зйомки з метою відстеження та оцінки мілітарного імпаكتу на міську забудову.

Теоретико-методологічна основа і методи дослідження.

Теоретико-методологічною основою дисертаційного дослідження були праці вітчизняних та закордонних географів, математиків, екологів, урбаністів, геоурбаністів, зокрема В. Кристалер, С. Костріков, О. Світличний, К. Немець, Л. Немець, В. Шипулін, О. Топчієв, О. Шаблій, С. Ниммик, М. Реймерс, Д. Кузьменко, В. Бардов, J. Shan, A. Sampath, M. Fischler, R. Bolles, C. Tacoli, F. Biljecki, K. Czyńska, W. Yan, P. Dong, Qi Chen, D.A. Quattrochi, G. Du, J. Harvey, J. Gibson, M. Benedikt, M. Batty, R. Nouvel, A. Strzalka, C. Ratti, B. Cheer, K. Lwin, A. Murayama та інші.

Методи дослідження. Дослідження проводилось з використанням низки загальнонаукових та конкретнонаукових методів. Серед загальнонаукових методів використовувалось наступні: методи *аналізу та синтезу* (для виявлення особливостей розподілу міської забудови по різнорангових патернах урбаністичних геоситуацій), *індукції та дедукції* (для поняттєво-термінологічного апарату дослідження, для формування закономірностей розподілу рівня енергоспоживання будівель та чисельності населення), *системного аналізу* (для виокремлення урбогеосистемних властивостей різнорангових міст в територіальному розподілі урбаністичних геоситуацій), *узагальнення* (для узагальнення отриманих результатів, формування патернів урбаністичних геоситуацій), *опису* (для характеристикації та встановлення основних властивостей досліджуваних різнорангових міст), *порівняння* (для співставлення між собою окремих методик моделювання, окремих патернів геоситуацій, окремих моделей будівель), *моделювання* (для побудови моделей забудов, для відображення візуального об'єму в міському

середовищі), *математико-статистичний* (для збору та обробки та обраховування даних про міське населення та енергоспоживання будівель), *формалізацій* (для відображення основних структурних характеристик будівель), *графічний* (для візуалізації отриманих результатів дослідження), *прогнозування* (для прогнозування подальшого розвитку урбаністичних геоситуацій на підставі виявлених тенденцій їх розвитку), *ранжування* (для встановлення різнорангових патернів геоситуацій).

Серед конкретно-наукових методів використовувались наступні: порівняльно-географічний (для порівняння патернів урбаністичних геоситуацій в просторовому відношенні), *картографічний* (для візуалізації просторового розподілу отриманих результатів), *геоінформаційний*, а саме: *геокодування* (для просторової прив'язки даних щодо руйнувань будівель), *оверлейний аналіз* (для співставлення різних шарів карт та передавання атрибутивних даних між ними), *теплокарт, градуйованих символів* (для візуалізації просторового розподілу чисельності населення та рівня енергоспоживання будівель), *буферизації* (при розрахунку радіусу видимості з точки спостерігача), *векторизації* (при формуванні футпринтів будівель на підставі обробки лідарних даних), *мікро-просторовий аналіз* (для визначення закономірностей розподілу чисельності населення на рівні найменших територіальних одиниць), окремі *математичні* методи та методи *моделювання*, зокрема *кластеризація K-means, RANdom SAmple Consensus, полігони Вороного* (для сегментації та реконструкції дахів будівель при низькополігональному моделюванні), *методи інтерполяції, триангуляції Делоне* (при виокремленні будівель, високополігональному моделюванні, побудові цифрових моделей рельєфу), *кореляційний аналіз* (для оцінки точності результатів оцінки енергоспоживання та чисельності населення).

Інформаційна база дослідження сформована на основі відкритих геопросторових баз даних, електронних довідників: *ArcGIS Hub, MassGIS, Google Earth, OpenStreetMap, OpenTopography* [54, 55, 145, 109, 161, 162]; відкритих державних, муніципальних баз даних та геопорталів різнорангових

міст: *The Netherlands' Cadastre, Land Registry and Mapping Agency, Geoportal. Republic of Estonia, USGS, IT.NRW, Hoydedata, D.C. Open Source Data on Amazon S3, Головне управління статистики Харківської області* [52, 84, 203, 160, 104, 132, 5]; а також літературних джерел, інтернет-ресурсів та матеріалів особистих досліджень автора.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів полягає у уточненні поняттєво-термінологічного апарату та поглибленні урбогеосистемного підходу до дослідження міст, впровадженні новітнього підходу до дослідження урбогеосистем через ГІС-моделювання та аналіз міського середовища на підставі даних лідарної зйомки, виокремленні та обґрунтуванні категорії урбаністичної геоситуації. Розроблена методика та користувачські сценарії, викладені у дисертації можуть бути використані у ряді міських досліджень, зокрема в урбаністиці, міському плануванні, муніципальному менеджменті, геомаркетингу, екологічних дослідженнях, тощо. Описані алгоритмічні процедури з обробки лідарних даних та виокремлення будівель можуть бути впроваджені в міських ГІС та геопорталах, що надають базу геопросторових даних та візуалізацію окремих міст у цифровому середовищі. Окремі процедури з обробки лідарних даних можуть бути застосовані з метою оцінки ризиків та прогнозування стихійних лих, а також з метою автоматизованого відстеження руйнувань у забудові під час воєнних дій. На підставі розвинутого у дисертації урбогеосистемного аналізу та геоситуаційного підходу може бути удосконалений та оптимізований міський моніторинг, а також планування стратегій та програм стійкого розвитку міста, а головне – цей моніторинг може стати сталою основою практичних рекомендацій щодо після воєнної відбудови постраждалих через російську агресію урбанізованих територій.

Результати дисертаційного дослідження були впроваджені в НДР «Великий Харків: обґрунтування та теоретико-методологічна основа дослідження сучасних процесів агломерації» (державний реєстраційний номер 0121U113116) на кафедрі соціально-економічної географії і

регіонознавства імені Костянтина Немця, а також використані ГО «Науково-дослідний інститут регіонального економічного розвитку» при розробці стратегій повоєнного відновлення українських міст від наслідків російської збройної агресії (довідка №6/1 від 04.04.2024).

Викладені у роботі рекомендації щодо просторового аналізу території міста Харкова на підставі ГІС-аналізу та моделювання даних лідарної зйомки можуть бути впроваджені Департаментом економіки і міжнародних відносин Харківської обласної військової адміністрації при розробці програм та стратегій з відбудови та розвитку міст, районів і громад Харківської області, які зазнали масових пошкоджень та руйнувань (довідка № 06.01-14/1512 від 07.05.2024).

Окремі положення дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес факультету геології, географії, рекреації і туризму у рамках курсів «Інформатика з основами геоінформатики», «Географічні інформаційні системи», «Урбаністична географія».

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною, завершеною роботою автора, в якій викладені власні розробки до впровадження урбогеосистемного аналізу різнорангових міст на підставі ГІС-аналізу та моделювання міського середовища, виокремлена категорія урбаністичної геоситуації, охарактеризовані її властивості та особливості формування геоситуаційних патернів різного рангу, детально описані функціональні процедури геообробки та аналізу лідарних даних з метою виокремлення будівель та цифрових моделей рельєфу, а також викладені методичні напрацювання з імплементації похідних лідарних даних у трьох окремих користувачьких сценаріях. Всі конкретні результати дослідження отримано автором особисто на основі аналізу літературних джерел, статистичних даних та особистих досліджень. У наукових публікаціях, які використані в дисертаційному дослідженні та виконані у співавторстві, зазначено конкретний особистий внесок автора.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні положення та результати дисертаційного дослідження були апробовані на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях та форумах, зокрема: «Регіон: стратегія оптимального розвитку» (м. Харків, 8-9 жовтня 2020 р., 21 жовтня 2021 р., 24 листопада 2022 р, 20 жовтня 2023 р.), «Регіон: суспільно-географічні аспекти» (м. Харків, 15 квітня 2020 р., 20 квітня 2023 р.), «Академічні та наукові виклики різноманітних галузей знань у 21-му столітті. Принципи CLIL в дії» (м. Харків:, 12 березня 2021 р.), Сьомі Сумські наукові географічні читання: збірник матеріалів Всеукраїнської наукової конференції (м. Суми, 14-16 жовтня 2022 р.), Міжнародна науково-практична конференція "Міста та регіони в епіцентрі просторових змін" (Київ, 24–25 листопада 2022 р), XIII науково-практичний семінар за міжнародної участі “Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат та прилеглих територій” (Львів, 2–3 березня 2023 р), Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2023», 19–21 квітня 2023 року.

Публікації. Основні результати дослідження опубліковано у 17 наукових працях (з них 13 у співавторстві), загальним обсягом близько 9,64 д.а (у тому числі 4,82 належить особисто автору), серед яких 3 статті у фахових наукових виданнях категорії «А» обсягом 3,69 д.а. (де 1,79 належить особисто автору), 2 статті у фахових наукових виданнях категорії «Б» обсягом 2,36 д.а. (де 0,97 належить особисто автору), 1 публікація у іноземному виданні, 11 статей матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, трьох розділів, висновків до них, загальних висновків, списку використаних джерел (217 найменувань на 16 сторінках) і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 288 сторінок. Робота містить 5 таблиць, 83 рисунки, два додатки на 9 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУСПІЛЬНО-ГЕОГРАФІЧНІ ЗАСАДИ УРБОГЕОСИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ЧЕРЕЗ ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

1.1. Поняттєво-термінологічний апарат дослідження урбогеосистем (УГС). УГС як тематичний клас соціогеосистем.

1.1.1. Урбогеосистема як об'єкт дослідження суспільної географії. Екстернальні та інтернальні УГС.

У сучасному світі міста займають чи не найважливішу роль у розвитку та функціонуванні суспільства. На Землі вони є локалізованими ядрами усіх ключових процесів, подій та явищ, що відбуваються у суспільстві. Різні міста можуть мати різні ознаки, виконувати різні функції та по різному впливати на функціонування країн, але всіх їх поєднує єдина риса – вони розвиваються [8]. Цей розвиток може мати як інтенсивний, так і екстенсивний характер, але так чи інакше він позначатиметься на стані суспільства.

Невід'ємним поняттям, що стосується розвитку сучасних міст, є поняття урбанізації – процесу, що характеризує соціально-економічні аспекти розвитку держави та зміну структури його населення. Сучасні урбанізаційні процеси являються важливою складовою і однією з фундаментальних рухомих сил глобалізації суспільства [188].

Традиційно урбанізація визначається як конкретно-історичний етап розвитку суспільства, що характеризується інтенсивним формуванням та ущільненням міст, як особливого типу поселень, зі значною кількістю населення, зосередженою на відносно невеликому просторі. У загальному сенсі урбанізація – це розвиток і зростання міст, збільшення частки міського населення, процес зростання ролі міського способу життя в суспільстві [43].

Важливою ознакою урбанізаційного процесу є те, що він невід'ємно відбувається на певній території, яка є об'єднаною певною структурною

організацією. Так, для більш злагодженого функціонування в містах формується просторова структурна ієрархія, яка розмежовує місто на окремі функціональні зони та на окремі зони обслуговування. За теорією центральних місць В. Кристаллера, міста утворюють структурну ієрархію, при якій широта спектру надання товарів та послуг знижується від вищих структурних рівнів цієї ієрархії, до нижчих. При цьому змінюється ціна, специфічність і щоденна затребуваність товарів та послуг, що надаються – від більш рідкісних та дорогих у центрі міста, до більш повсякденних та дешевих – у периферії [76]. Таким чином міське функціонування належним чином оптимізується, забезпечуючи зручність доступу до товарів та послуг для населення та мінімізуючи витрати доставки. В ході урбанізаційного процесу та утворення агломерацій така ієрархія все більш ускладнюється, а її структурні рівні стають все більш стійкими – за деякими містами закріплюється роль адміністративних центрів, економічних центрів, освітніх центрів, тощо [48].

Зазначена структурна ієрархічність міст, їхнє повсюдне ускладнення, зростання ролі різнорідних міжміських комунікацій у ХХ столітті, сприяло їх розгляданню в якості особливих системних утворень – урбосистем. Зокрема, системна перспектива міста встановлюється за рахунок різних міських явищ, в яких порівняно легко аналітично розділити складові елементи, стани та відношення, тобто вони містять підсистеми, які демонструють відносну автономію. Зокрема, транспортні системи, торговельні системи та системи дистрибуції були плідними сферами застосування теорії урбосистем [148].

У дослідженні М. Метерена, зазначається, що системна перспектива передбачає розуміння міста у функціональних термінах – географічне зовнішнє середовище, тобто межа міського середовища чи міжміської системи, відрізнятиметься залежно від міської функції. Географія ринків праці, транспортних систем, систем роздрібної торгівлі, інституційних кордонів, просторів повсякденної діяльності та соціальних спільнот матиме різну географію та, отже, різні кордони [148]. Місто є перетином безлічі різних

взаємопов'язаних і переплетених урбосистем, що працюють у різних масштабах: від районного до глобального.

Із вищезазначеного витікає, що міста, в залежності від охоплення та масштабу дослідження, можуть розглядатися як складні системи, з безліччю внутрішніх підсистем, а також як окремі елементи більш глобальної урбосистеми, що включає в себе безліч окремих міст та поселень, сполучених між собою різномірними зв'язками. Так, А. Пред висуває поняття системи міст, що являє собою: національну або регіональну сукупність міст, які взаємозалежні таким чином, що будь-яка істотна зміна в економічній діяльності, професійній структурі, загальному доході чи населенні одного міста-члена прямо чи опосередковано призведе до деяких змін в економічній діяльності, структурі зайнятості, загальному доході або чисельності населення одного або більше інших членів групи [167, с. 13].

В багатьох дослідженнях, зокрема, вітчизняних, поняття урбосистеми розглядається в аспекті природокористування. Наприклад, М. Голубець визначив урбосистему, як нестійку природно-антропогенну систему, яка формується на урбанізованих територіях і містить техносистему, природну екосистему та соціальну систему [6]. У даному випадку вже робиться більший наголос на тісному співіснуванні людського суспільства з продуктами його діяльності та природного середовища.

Більш фундаментальним, в аспекті природокористування, є визначення М.Реймерса, за яким урбосистема – «нестійка природно-антропогенна система, що складається з архітектурно-будівельних об'єктів і різко порушених природних екосистем» [27, с. 402]. Антропогенний вплив на екосистему тут вже вважається безумовним, а межі міст позначаються межами архітектурно-будівельних об'єктів.

Загалом, урбосистему можна уявити як особливу екосистему, яка функціонує в межах урбанізованого середовища. Це дуже своєрідні типи екосистем майже повністю штучні, але включають в себе, в різних пропорціях, всі інші типи екосистем (ліси, озера, річки та сільськогосподарські угіддя, які

можуть бути частиною міської околиці) і зазнають сильного впливу людської діяльності [202]. У науковій праці Г. Мозер зазначається, що урбосистема є екосистемою у своїй безпосередній манері та складається з елементів та систем, які роблять сформоване урбаністичне середовище міцнішим [153, с. 88]

Ключовою ознакою, що впливає із сукупності понять урбосистеми є те, що вона складається з природних і антропогенних об'єктів, які є невідривними один від одного і перебувають у тісному взаємозв'язку. Причому, місто може завдавати суттєвого негативного впливу на те природне середовище, в якому воно розташовується. Містобудування та подальше функціонування міста може не тільки викликати порушення певних локальних екосистем, але може привести також і до повного їх руйнування. Міста впливають на міграцію тварин, на зміну структури біоценозу – популяції одних видів можуть інтенсивно збільшуватися, інших – навпаки зменшуватися. З життєдіяльністю міста пов'язана також зміна геологічної будови, рельєфу, клімату території, умов харчування підземних вод, їх хімічного складу [9].

В свою чергу, природні об'єкти, і ті природні умови, які вони формують значно впливають на міське планування і задають вимоги до забудови, які можуть бути актуальними для одного міста, й не актуальними для іншого. Наприклад, в містах, розташованих в гірській або приморській місцевості, схильних до підвищеного ризику певних стихійних лих будуть діяти свої, особливі нюанси щодо проектування будівель або прокладання вулично-дорожніх мереж. Природні умови також впливають на наявність або відсутність в містах різних інфраструктурних об'єктів, таких як мости, тунелі, греблі, електростанції, і навіть певних видів транспорту.

Нарешті, природні умови визначають спеціалізацію міста: в залежності від особливостей природи місто може спеціалізуватися на туризмі, або добувній промисловості, це може бути портове місто, або місто, що має важливе транзитне значення, тощо. Згодом, спеціалізація міста, з якою воно

починає тісно асоціюватись, впливає на його місцеві культурні особливості та менталітет місцевого населення.

Враховуючи подібність та тісне співіснування урбосистем та природних екосистем, у багатьох дослідженнях починає фігурувати поняття урбоекосистеми, яке, зокрема, впроваджує екосистемний підхід в урбаністичні дослідження. За Х. Шрінівас, урбоекосистеми – це динамічні екосистеми, які мають подібні до природних екосистем взаємодії та поведінку. Однак, на відміну від природних екосистем, урбоекосистеми є гібридом природних і штучних елементів, на взаємодію яких впливає не лише природне середовище, а й культура, поведінка людей, політика, економіка та соціальна організація [181].

Більш спрощено урбоекосистема може бути сформульована, як тип екосистеми, в якій абіотичні та біотичні умови були значно змінені для задоволення потреб людини [201].

Примітною особливістю міських екосистем, за якою вони виділяються від будь-яких інших екосистем є те, що людський компонент та антропогенний вміст складають більшу частину цієї екосистеми – навіть якщо вона може перетинатися з іншими екосистемами [217, с. 15].

В одному з нещодавніх досліджень у визначенні урбоекосистеми підкреслюються його основні компоненти: біотичні фактори, такі як мікроби, рослини, тварини; абіотичні фактори, такі як повітря, вода, ґрунт, поживні речовини; та соціологічні фактори, такі як економіка, людські потреби, діяльність та звичаї [150].

За С. Пікеттом, урбоекосистемою можна вважати будь-яку екологічну систему, що розташована в межах міста чи іншої густонаселеної території, або, у ширшому розумінні, більша екологічна система, яка становить цілу мегаполісну територію [164]. У тому ж дослідженні також зазначається, що окрім типових біологічних та фізичних компонентів урбоекосистеми, які притаманні іншим екосистемам, їх біологічний комплекс також включає людські популяції, їхні демографічні характеристики, інституційні структури

та соціальні й економічні інструменти, які вони використовують. Фізичний комплекс включає будівлі, транспортні мережі, модифіковані поверхні (наприклад, стоянки, дахи та озеленення), а також зміни в навколишньому середовищі, спричинені людськими рішеннями. Фізичні компоненти урбоєкосистем також включають використання енергії, імпорт, трансформацію та експорт матеріалів.

У той же час, у деяких дослідженнях підкреслюється ієрархічність структури, який нами раніше зазначався при розгляді урбосистем. Так, за В. Бардовим, урбоєкосистема – це природно-територіальний комплекс (геокомплекс) зі всією його ієрархічною структурою – від ландшафту до фації, який знаходиться під безпосереднім впливом (минулим, сучасним, майбутнім) міста [1, с. 298]. Окрім того, урбоєкосистемам властивий вплив зростання міського населення і підтримки інфраструктури будівель на прилеглі до міста території. В їх число входять передмістя, навколишні міста, а також сільськогосподарська діяльність і природні ландшафти. У містах при взаємодії природних екосистем і міської інфраструктури відбувається просторове розчленовування природних систем, зміни в умовах і режимах її функціонування. Наслідком цього є дискретність поширення, зменшення територій, зайнятих однією безперервною в просторі природною системою.

Таким чином, в різних визначеннях урбоєкосистеми неодноразово наголошується на унікальності міського середовища, як окремої частини географічного простору, зосередженої в чітко визначеному екстенті, в якому існує суттєвий взаємний вплив між техногенними елементами та природним середовищем.

На підставі зазначеного вище положення, а також розглянутих понять урбосфери, урбосистеми та урбоєкосистеми, доцільним є виокремлення поняття *урбогеосистеми (УГС)*, яке вперше було введено С. Костріковим. Власне, урбогеосистема – це нестала природно-антропогенна система, яка є сукупністю архітектурно-будівельних об'єктів та різко порушених екосистем, які колись існували і існують на території певного міста в визначеному

екстенті географічного простору, що знаходиться під впливом жителів цього географічного простору [13].

Ключовою властивістю, що витікає з поняття УГС є її прив'язка до певного екстенту географічного простору, що забезпечує всі передумови до її моделювання та дослідження за допомогою геоінформаційних систем (ГІС).

З впровадженням ГІС-моделювання УГС може бути представлена у вигляді точкових, лінійних та полігональних об'єктів, які відповідають базовим графічним примітивам ГІС, що складають основу векторного моделювання – точкам, лініям, полігонам. При цьому, в такому моделюванні окреме місто може розглядатися з одного боку – як точковий об'єкт, що має просторові зв'язки з іншими містами, а з іншого – як полігональний об'єкт, що включає в себе просторові зв'язки між окремими частинами міста. Така масштабованість міста дозволяє виділити поняття екстернальної та інтернальної УГС (рис 1.1.) [13].

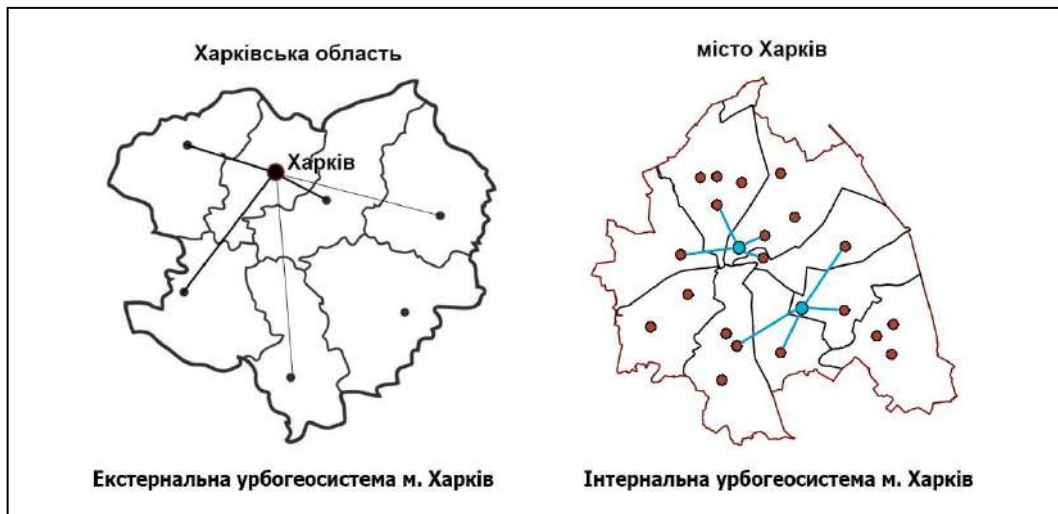


Рис.1.1. Екстернальна та інтернальна урбогеосистема на прикладі м. Харкова.

Для екстернальної УГС характерні просторові зв'язки між окремими містами. Набір з певної кількості міст в межах регіону являє собою матрицю, яка визначає ряд лінійних характеристик, що відображають просторові зв'язки в екстернальній УГС з точки зору соціального, промислового, комерційного та інформаційного трафіку.

Внаслідок високих темпів урбанізації посилюється вплив центральних, густонаселених міст на менші міста, розташовані в найближчому радіусі – між такими містами посилюються економічні відносини, удосконалюється транспортне сполучення, що в свою чергу полегшує маятникові міграції – в якийсь момент такий тісний зв'язок між містами призводить до утворення агломерацій. При цьому, малонаселеним містам, розташованим віддалено від центральних характерний уповільнений розвиток, обмежений спектр послуг соціальної сфери, а також відтік населення в більш розвинені міста [157].

В дослідженнях екстернальних УГС досить ефективним є проведення ранжування міст, шляхом аналізу різних зв'язків і взаємозалежностей між усіма парами міст в регіоні. Проведення такого аналізу дозволяє виділити різні емерджентні властивості УГС, наприклад – певні зв'язки між містами в розрізі міграційних процесів. Результатом аналізу може бути двовимірною карта, на якій за допомогою ліній зображується інтенсивність зв'язків між містами. У ГІС-моделюванні часто використовуються О-Д дані (джерело-призначення), які показують парний зв'язок між містами в їх сукупності. Що більше парних зв'язків має певне місто, то вище його ранг [85].

Інтернальна УГС являє собою місто в великому масштабі, якому властиві просторові взаємодії між окремими частинами міста. Характер взаємодій між елементами інтернальної УГС істотно відрізняється від тих, які відбуваються в екстернальній. Певні просторові відносини, на які слід звернути увагу, формуються між об'єктами сфери обслуговування і пунктами попиту (населенням). Такі відносини, в першу чергу представляють інтерес для муніципальних досліджень. В умовах високоурбанізованого середовища, кожний пункт обслуговування, в залежності від типу послуг, має певний радіус обслуговування, в межах якого він здатний охоплювати максимальну кількість населення. Сучасні ГІС надають ряд інструментів для просторового аналізу міського середовища, які дозволяють вирішувати завдання з пошуку оптимальних місцеположень пунктів обслуговування, прокладання

оптимальних маршрутів, аналізі поточної ситуації певної функції УГС, тощо [28].

У інтернальних УГС високу роль набуває міське планування, метою якого є забезпечення комфортності проживання населення, а також оптимізація міських процесів. В результаті міського планування утворюються функціональні зони міста, кожна з яких має свою специфіку забудови. Серед функціональних зон як правило виділяють комерційну, індустріальну, житлову, інституційну та рекреаційну зону. При цьому житлова зона в свою чергу може поділятися на окремі підзони в залежності від щільності забудови. Забудову цілком можна вважати ключовим елементом інтернальної УГС, адже саме вона визначає межі міста в географічному просторі і саме за рахунок появи нової забудови розширюється територія міського середовища.

На відміну від тих елементів УГС, які розглядалися раніше – забудова може бути змодельована в тривимірному вигляді. Таке моделювання може бути реалізовано в сучасних ГІС на підставі, наприклад, обробки даних лідарної зйомки місцевості. Отримані моделі мають високу точність, а сам спосіб їх отримання є економічно ефективним [31]. Таким чином, тривимірне моделювання виводить урбаністичні дослідження на якісно новий рівень. Тривимірна модель міста дозволяє отримувати різні емерджентні властивості УГС, які важко виявити за допомогою двовимірних карт. Важливою перевагою даного підходу є те, що сама обробка лідарних даних і подальша побудова моделей є автоматизованим процесом, що дозволяє регулярно проводити лідарну зйомку міського середовища і відслідковувати будь-які істотні зміни просторової структури інтернальної УГС.

В рамках застосування ГІС була впроваджена концепція дослідження і аналізу УГС через ГІС-засоби на підставі таких викликів, як: посилення урбанізаційних процесів, стрімке зростання регіонів з великими міськими спорудами, необхідність автоматизованого моніторингу забудови для визначення кількості та якості архітектурних змін, необхідність точного

моніторингу екологічної ситуації з розширеним аналізом даних ДЗЗ, необхідність моделювання рельєфу для урбанізованих територій, тощо [118].

Реальна урбогеосистема, що функціонує в певній мірі географічного простору, може бути представлена урбогеосистемною онтологічною моделлю (УОМ), яка зосереджена на підтримці та взаємозв'язку трьох складових: міське населення, муніципальна інфраструктура, урбанізаційні процеси та явища (рис 1.2.) [39]. В сукупності така модель забезпечує стійкий розвиток міста та може стати припущенням до реалізації концепції розумного міста.



Рис. 1.2. Онтологічна модель УГС з місцем «розумного міського середовища» у всій ієрархії середовищ, пов'язаних с розумним містом (побудовано автором за [118]).

Розумне місто, з точки зору урбогеосистемного підходу – це місто, яке функціонує як система підсистем надійним, стійким і інтелектуальним чином. Це місто, яке є повністю прихильним цифровим технологіям, практиці управління інформацією і державній політиці. Три опорних стовпи для такого міста – це міське населення, керовані міські процеси і явища і муніципальна інфраструктура. Ядром же всієї конструкції є «розумне міське середовище».

1.1.2. Системний підхід в урбаністичних дослідженнях суспільної географії.

Системний підхід є одним з найголовніших загальнонаукових методів дослідження та пізнання складних об'єктів, а також вирішення складних проблем у сучасному світі. Даний підхід передбачає сприйняття та розгляд досліджуваного об'єкту в якості системи, яка складається з сукупності внутрішніх елементів, відношень та зв'язків, що формують певну цілісну структуру та забезпечують ефективне виконання загальної функції. Так, системні властивості дозволяють через пізнання окремих елементів системи простежувати стан всієї системи, і навпаки, через пізнання цілої системи, робити певні висновки щодо стану її окремих елементів.

Щодо урбаністичних досліджень, в якості основи до впровадження системного підходу може бути розглянуте місто, якому цілком притаманні вищезазначені характеристики системи. При цьому, в залежності від предмету дослідження, місто може складатися з різних за своєю природою системних елементів з так само різними зв'язками та відношеннями, які спрямовані на ефективне виконання окремої функції міста. Сукупності таких різнорідних елементів утворюють окремі підсистеми – компоненти міста, функціонування яких, у підсумку, спрямоване на досягнення єдиної мети – підвищення якості життя людства [42].

Місто втілює людську спільноту в систему, яка включає в себе такі складові, як економіка, культура, політика, екологія та інші. Елементи цієї системи знаходяться в тісному взаємозв'язку і взаємозумовленості. Тривале ігнорування хоча б одного з них призводить до деградації всієї системи, і може супроводжуватися важкими екологічними, соціальними, економічними і політичними наслідками.

Подібно до природних екосистем, яким притаманна саморегуляція, а також кругообіг речовини та енергії між біоценозом й абіотичним середовищем, міським системам – урбосистемам характерна регуляція суспільством, а також внутрішній кругообіг речовини, енергії та інформації

між своїми компонентами. Урбосистема фактично є зміненою людиною екосистемою, адже від самого початку вона займає місце існуючої екосистеми, порушуючи останню [58]. Таким чином урбосистема утворює систему природно-антропогенного характеру, яка складається зі згаданих екосистемних компонентів: *абіотичне середовище* (кліматичні, гідрологічні, геоморфологічні умови, які можуть бути використані та змінені людиною) та *біоценоз* (сукупність живих організмів, життєдіяльність яких порушується людиною), до яких також доповнюються *населення* (яке заселяє місто, використовує наявні біотичні й абіотичні ресурси та веде у місті економічну, виробничу, політичну та культурну діяльність) та *техносфера* (середовище та продукти діяльності людства, що формують міську інфраструктуру) (рис.1.3) [4]. При цьому, відповідальним за функціонування такої системи є саме суспільство, яке, з одного боку, залежить від природних умов та ресурсів, та зацікавлене в їх відновленні, з іншого боку, воно певним чином використовує такі ресурси та виготовляє різні технічні споруди, які можуть негативно вплинути на оточуючу природу, що зрештою позначиться на якості життя самого суспільства.



Рис.1.3. Компоненти урбосистеми (побудовано автором за [4]).

Як вже зазначалося, будь-якій системі притаманна зв'язність її складових елементів, при якій зміна стану її окремого елемента призведе до зміни стану усїєї системи. Тож від того, як саме суспільство використовує

наявні природні ресурси, як воно облаштовує існуюче природне середовище, який характер життєдіяльності воно веде та які продукти воно виробляє, від цього зрештою, залежатиме стан функціонування урбосистеми. Системний підхід до урбаністичних досліджень в такому випадку дозволяє виявляти певні проблеми у функціонуванні окремих компонентів урбосистеми, простежувати їх системний взаємозв'язок з іншими компонентами, знаходити першопричину виявлених проблем та розробляти рішення щодо їх подальшого усунення.

Якщо розглядати системний підхід саме з точки зору суспільної географії, то в якості його основи можна розглянути загальний прояв суспільства на Землі (не обмежений лише його урбаністичними ознаками), що утворює систему, яка функціонує саме у географічному просторі. Такий прояв системності суспільства у географічному просторі характеризується поняттям *соціогеосистеми* – гетерогенної системи, яка містить різні за рівнем узагальнення та ієрархії соціальні елементи або підсистеми, а також техногенні, мінеральні та біогенні елементи (підсистеми), що знаходяться у взаємодії через потоки речовини, енергії та інформації в географічному просторово-часовому континуумі [21].

Виходячи з визначення можна з'ясувати, що соціогеосистема складається з трьох підсистем: соціуму, як визначальної складової (бо вона визначає територію), біоти (біологічних природних систем) і абіоти (мінеральних природних систем) (рис. 1.4.). Біота і абіота в соціогеосистемі мають первинний (безпосередній) зв'язок з двостороннім рухом речовини, енергії та інформації. У той же час соціум взаємодіє з природними складовими через процес природокористування, тобто через вторинний зв'язок з двостороннім рухом речовини, енергії та інформації. Важливо відзначити, що основним способом впливу соціуму на природні компоненти є природокористування, від якого залежить взаємодія соціуму з біотою та абіотою, а також задоволення всіх людських потреб. Засобами цього впливу є господарчі системи соціуму (через сільське господарство, промисловість, транспортні системи, будівництво, тощо).

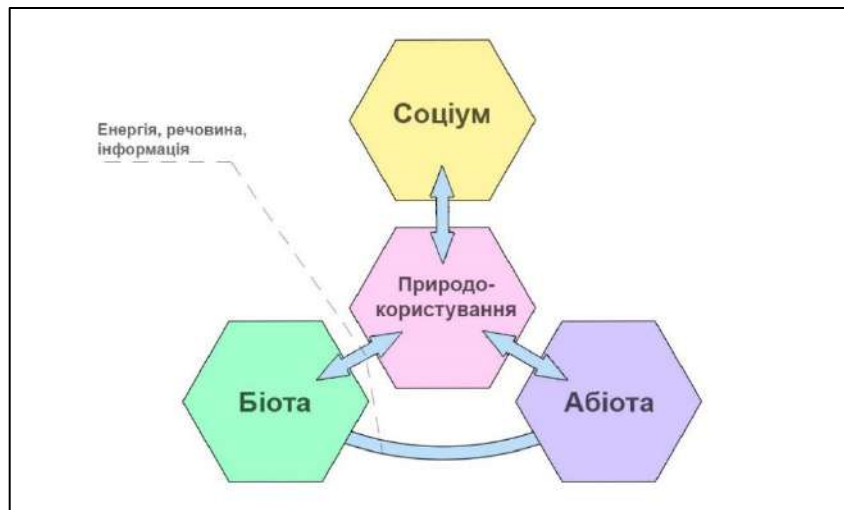


Рис. 1.4. Схема соціогеосистеми (побудовано автором за [40])

На підставі представленого поняття урбосистеми, яка обмежується урбаністичними ознаками, та поняття соціогеосистеми, яка функціонує у неперервному географічному просторі, доцільним є виокремлення поняття *урбогеосистеми*, яка вже визначалася нами у попередньому підрозділі. УГС є окремим тематичним класом та частковим виявленням феномену соціогеосистеми у певному екстенті географічного простору, який співпадає з межами якоїсь урбанізованої території. Головним критерієм останньої є наявність на ній населення, переважно не зайнятого у сільському господарстві.

Відповідно до визначеного складу урбосистеми та соціогеосистеми, урбогеосистема може бути представлена як сукупність біогеоценозу, населення, техносфери та абіотичного середовища, які взаємодіють між собою та обмінюються енергією, інформацією та речовиною, знаходяться під впливом та управлінням суспільством і існують в певному екстенті географічного простору (рис. 1.5.).



Рис.1.5. Взаємозв'язки в УГС (побудовано автором за [11]).

Будь яка система має ряд характерних властивостей, які відрізняють її від інших складних та множинних об'єктів. Такими властивостями є цілісність, гетерогенність, ієрархічність, відкритість, цілеспрямованість, емерджентність, тощо (рис. 1.6). Всі ці властивості певним чином проявляються і в УГС.

Цілісність УГС проявляється у тому, що, поєднуючись у систему, сукупність її окремих елементів утворюють єдине ціле, по відношенню до географічного простору. При цьому істотне порушення якогось окремого елемента УГС позначиться на стані всієї УГС. Наприклад, наявність заторів на окремих ділянках міських доріг призводить до певного уповільнення функціонування всього міста.

Гетерогенність полягає у тому, що УГС складається з неоднорідних компонентів – вони мають різну природу походження, різну функцію, різний зміст підсистемних елементів, тощо [13]. Наприклад, різко порушена екосистема та транспортна система міста – є двома принципово різним за своєю сутністю складовими УГС, які при цьому є однаково важливими її частинами.

Ієрархічність УГС проявляється у тому, що вона складається з безлічі різнорангових підсистем, різнорангових просторових зв'язків та відношень. При цьому, що нижче ранг, то більш локалізованою та спеціалізованою є складова УГС. Яскравим прикладом є вулично-дорожня мережа міста, що має основні транспортні артерії (підсистема вищого рангу), які розгалужуються на безліч окремих вулиць та провулків міста (підсистеми нижчого рангу), які досягають його найвіддаленіших та найізольованіших ділянок.

Відкритість УГС проявляється у тому, що вона перебуває у постійній взаємодії з навколишнім середовищем, обмінюючись з ним речовиною, енергією та інформацією. Прикладом відкритості УГС є наявність в міста різних зовнішніх транспортних, економічних, політичних, соціально-демографічних стосунків з іншими містами.

Емерджентність УГС полягає у появі нових властивостей і якостей урбогеосистеми, які не притаманні окремим елементам, що входять в її склад [46]. Наприклад, якість життя у місті не може бути виявлена при дослідженні його окремого району у відриві від усієї міської системи, адже вона є комплексною характеристикою, яка має враховувати риси кожного окремого компоненту УГС, з сукупності яких і утворюється розуміння якості життя у місті, а також образу та стилю життя.

Цілеспрямованість УГС полягає у наявності загальної мети існування урбогеосистеми, на досягнення якої спрямовані всі її компоненти. Наприклад, такою метою є всебічне забезпечення якісного існування населення та біоти з можливістю їх розвитку та процвітання.



Рис.1.6. Властивості урбогеосистеми.

Будь яка система може бути схематично змодельована за допомогою певних умовних знаків – графічних примітивів. У випадку УГС, такими примітивами є, перш за все, точки, лінії та полігони у двовимірній площині та дискретні 3D-примітиви у тривимірній площині. Більш того, за рахунок того, що УГС існує у географічному просторі, ці знаки моделюють реальні об’єкти та явища, що мають просторову прив’язку [124].

Ідеальним середовищем для моделювання УГС є ГІС, в яких будь які просторові об’єкти можуть бути змодельовані саме за допомогою точок, ліній, полігонів та 3D-об’єктів. *Точкою* може бути змодельований будь який елемент УГС, якщо відображення його територіального охоплення не є принциповим у конкретному контексті дослідження (наприклад, будівлю можна відобразити точкою, якщо вона виступає лише як пункт призначення при моделюванні маршруту); *полігонами*, натомість, моделюються об’єкти чи явища, для яких відображення такого охоплення є необхідним (будівля моделюється полігоном при аналізі міського планування, адже тут важливим є наглядне відображення контуру будівлі); 3D-об’єктами моделюються об’єкти, для яких важливо підкреслити їх тривимірні характеристики (будівля моделюється у вигляді 3D-моделі при аналізі видимості у міському середовищі, для наочної візуалізації висоти забудови, що перешкоджає видимості); лініями моделюються будь які

зв'язки та відношення між об'єктами УГС. Інформація про розташування об'єктів, їх контури, форму, напрямок, а також якісна та кількісна атрибутивна інформація, яка характеризує ці об'єкти, може бути отримана з різних онлайн-карт, з геопросторових баз даних та з даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моделювання двовимірних об'єктів, та з даних лідарної зйомки, для моделювання тривимірних об'єктів.

При моделюванні УГС певним чином проявляється її еквіпотенційність, яка полягає у тому, що, у залежності від масштабованості, окремий об'єкт УГС може розглядатися як система, або система може розглядатися як неподільний об'єкт. З цієї властивості витікає поділ УГС на екстернальну та інтернальну. При моделюванні інтернальної УГС, місто розглядається як система, що складається з безлічі внутрішньоміських елементів, зв'язків та відношень; при моделюванні екстернальної УГС, місто розглядається як неподільний об'єкт, що є частиною системи дещо вищого рангу, яка охоплює безліч інших міст [85].

Таким чином, урбогеосистемний підхід, як прояв системного підходу в урбаністичних дослідженнях суспільної географії, полягає у моделюванні міста у ГІС-середовищі за допомогою графічних примітивів, які воно надає, та подальшому аналізі просторових зв'язків та відношень між об'єктами та компонентами міста з точки зору системного підходу за допомогою ГІС-інструментів.

Відповідно до зазначеного вище, можна встановити алгоритмічну послідовності дослідження урбогеосистем за допомогою ГІС-засобів, що поєднує різні етапи дослідження й аналізу УГС у вигляді блок схеми (рис 1.7.). Така схема складається з декількох алгоритмічних блоків, які стійко поєднують в собі тематичну географічну модель, методику дистанційного зондування міст, а також базові і модифіковані функції ГІС [124].

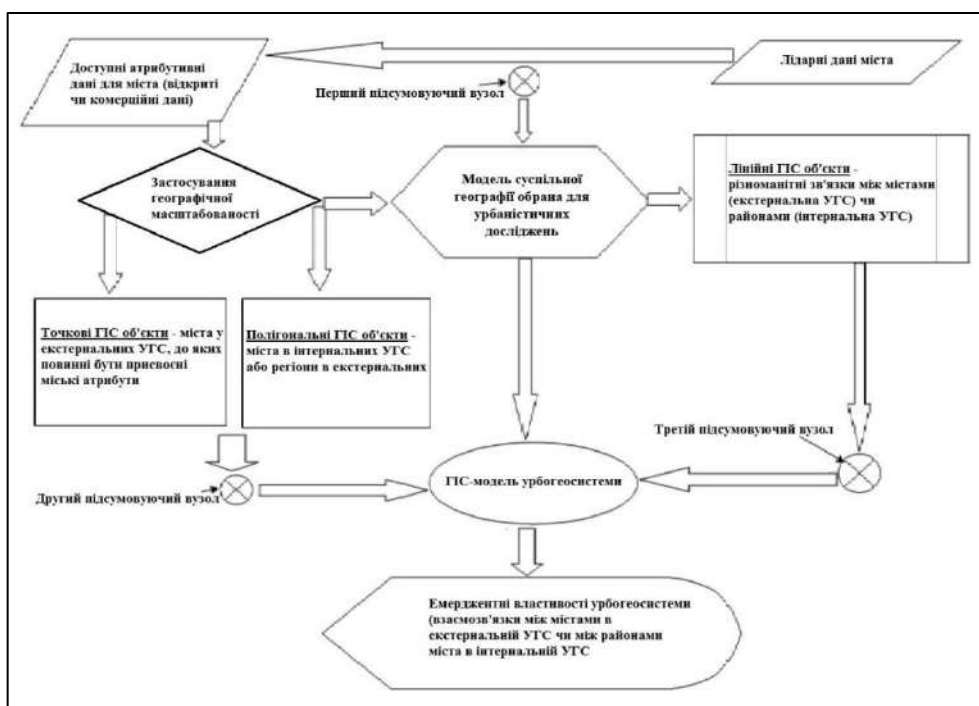


Рис. 1.7. Алгоритмічна послідовність дослідження урбогеосистеми через засоби ГІС [124].

Алгоритмічна схема починається з блоку збору лідарних даних міста, який забезпечується за допомогою ДЗЗ із застосуванням технології *LiDAR*. Надалі ці дані піддаються обробці в ГІС з подальшим виокремленням тривимірних моделей будівель.

Оброблені лідарні дані можуть істотно поліпшити другий алгоритмічний блок даних – блок атрибутивних даних для міста. Атрибутивні дані, що відображають різні характеристики міських об'єктів, можуть бути як комерційними, так і знаходитися у відкритому доступі. Атрибути призначаються різним типам об'єктів ГІС відповідно до стандартизованих процедур [44]. Атрибути відображають основні властивості об'єктів УГС, наприклад площа об'єкту, його тип, зміст, походження, призначення, тощо. Можливість поліпшення атрибутивної інформації міста за допомогою оброблених лідарних даних дозволяє ввести перший підсумовуючий вузол в дану блок-схему, що встановлює початкову ключову точку геообробки

Наступний алгоритмічний блок – застосування географічної масштабованості – направляє дослідження або на вивчення екстернальної

УГС, або інтернальної, в залежності від предмету та мети дослідження. Далі йде другий підсумовуючий вузол блок-схеми, який є проміжним ключовим моментом геообробки і перенаправляє потік обробки на моделювання того чи іншого типу УГС.

Основним блоком є блок моделі предметної області – моделі суспільної географії, обраної для урбаністичних досліджень, яка забезпечує найбільш ефективну і точну оцінку існуючих просторових закономірностей і закономірностей у відповідності до змісту блоків введення даних в даній блок-схемі [118]. Застосування масштабованості разом з обраною моделлю предметної області дозволяє отримати початковий набір лінійних зв'язків між міськими системними одиницями. Перед остаточним завершенням ГІС-моделі УГС лінійні ГІС-об'єкти піддаються остаточній геообробці на третьому підсумковому вузлі блок-схеми.

Останній блок – емерджентні властивості урбогеоеcosystemи через ГІС-візуалізацію, має розкривати основні властивості УГС, які витікають з співставлення поєднання просторових об'єктів УГС, що відображають також атрибутивну інформацію, та аналізу просторових зв'язків й відношень між ними.

1.2. Дистанційне зондування міського середовища для цілей його ГІС-моделювання (огляд попередніх досліджень)

В результаті стрімкого розвитку та вдосконалення технологій збору та автоматизованого дешифрування даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), їх використання стало одним з найбільш оперативних, надійних і ефективних джерел інформації для моніторингу стану і динамічних змін в урбанізованому середовищі.

Технології ДЗЗ у поєднанні зі збором даних на місці в останні десятиріччя все більш використовуються для моніторингу, вимірювання та моделювання багатьох компонентів, що складають природні і антропогенні

екосистемні цикли. Більш того, гіперспектральні зображення надають можливість детальної ідентифікації матеріалів і більш точної оцінки їх наявності на поверхні Землі, дозволяючи використовувати збір даних ДЗЗ замість збору даних, який раніше обмежувався лабораторними випробуваннями або польовими дослідженнями [102].

Завдяки останнім досягненням, методи і набори даних ДЗЗ стали важливим інструментом для розуміння Землі, моніторингу світових природних ресурсів і навколишнього середовища, управління впливом природних і антропогенних ризиків і лих, а також сприяння стійкості та продуктивності природних і антропогенних екосистем [209]. За допомогою регулярного збору даних про земну поверхню ДЗЗ може надати важливу інформацію і знання, які доповнять статистичний аналіз при оцінці показників досягнення сталого розвитку міст.

ДЗЗ є одним з найбільш ефективних інструментів для дослідження урбанізаційних процесів. Зокрема, такий інструмент може стати надійним джерелом інформації про обсяг всесвітньої урбанізації, про місцезнаходження і розподіл населених пунктів в міських і сільських районах.

Знімки, отримані в результаті ДЗЗ представляють ефективний підхід до подолання нестачі об'єктивної просторової інформації про структуру та просторово-часовий розвиток людських поселень на Землі. Європейський об'єднаний дослідницький центр (*JRC, Joint Research Center* – англ.) спільно з глобальним шаром населених пунктів (*GHSL, Global Human Settlement Layer* – англ.) представив процедуру автоматичного виокремлення забудованих територій шляхом аналізу глобального покриття *Landsat* для кількох часових відрізків [163]. Також було запропоновано метод, заснований на об'єктно-орієнтованому аналізі і системі віртуальних машин, для класифікації великих міських територій за даними *Landsat 8* [211]. Іншими авторами, в свою чергу, запропоновано метод, заснований на комплексному аналізі супутникових зображень *ASTER* і геоінформаційних даних, для створення нової глобальної маски населених пунктів з високою роздільною здатністю [149].

Німецьким центром даних дистанційного зондування в той же час розпочато внутрішню ініціативу отримання глобального міського футпрінта (ГМФ) – області присутності людини на Землі у вигляді растрової карти, яка відображає структуру населених пунктів з просторовою роздільною здатністю 12 м. Метою цього заходу була розробка повністю автоматизованої платформи обробки для створення карти населених пунктів світу з унікальними просторовими деталями шляхом аналізу глобального охоплення зображень *TerraSAR-X* і *TanDEM-X*, зібраних в контексті *TanDEM* [89]. Створення шару ГМФ засноване на процесорі міського футпрінта. Це повністю автоматичне, універсальне і автономне середовище обробки, що керує великим набором модулів обробки і аналізу. Отримання ГМФ відбувається в кілька етапів: виокремлення об'єктів, класифікація, мозаїка, автоматична постобробка.

При відстані між пікселями 12 м дані ГМФ являють собою точну інвентаризацію як великих міських агломерацій, так і розосереджених дрібних забудованих територій в сільських регіонах. ГМФ дозволяє проводити детальний кількісний і якісний аналіз та порівняння властивостей поселень від місцевого муніципального рівня до глобального масштабу. Набір таких даних допомагає краще зрозуміти феномен урбанізації і належним чином відреагувати на майбутні виклики, пов'язані з розростанням міст, що може надати цінну інформацію, особливо у віддалених і слаборозвинених регіонах Землі, де відповідні географічні дані часто відсутні [88].

Ще одним завданням, яке допомагає вирішити ДЗЗ є визначення точного розташування і виокремлення будівель, що може послугувати одним з найважливіших джерел інформації для міського управління, оцінки чисельності населення і оцінки навколишнього середовища.

В одному з досліджень було запропоновано морфологічний індекс будівель (МІБ) для автоматичного виявлення будівель, який, як було продемонстровано, є ефективним морфологічним показником для виокремлення будівельних конструкцій із зображень з високою роздільною здатністю [105]. Основна ідея МІБ полягає в побудові взаємозв'язку між

внутрішніми властивостями будівель (наприклад, яскравістю, контрастом, розміром і спрямованістю) і набором морфологічних операторів. МІБ, що розглядається як ефективний індикатор будівлі, в багатьох дослідженнях застосовувався для виявлення будівель по зображеннях ДЗЗ з високою роздільною здатністю. Наприклад, досліджувалася чутливість текстурних вимірювань на основі контрасту і морфологічних характеристик з використанням зображень ДЗЗ при використанні різних методів поліпшення зображення [187].

Автоматичне виокремлення будівель із зображень з високою роздільною здатністю є активною дослідною темою та залишається складним завданням в області комп'ютерного зору і ДЗЗ. Так інформації на основі зображення не достає геометричної інформації, що відображається на тривимірній поверхні. Наприклад, дуже складно, ґрунтуючись тільки на інформації про зображення, автоматично відрізнити дахи будівель від паркувань з такими ж спектральними і просторовими характеристиками [208].

Інформація про висоту забезпечує важливу ключову функцію для точного виявлення будівель і виокремлення їх від інших подібних міських зон, оскільки будівлі за своєю природою є височинними об'єктами. Різні джерела даних ДЗЗ можуть використовуватися для генерації інформації про висоту, включаючи стереозображення і лідарні дані. Серед цих джерел в окремих дослідженнях застосовувалися легкодоступні стереофонічні супутникові зображення поза надиром, які дозволяють генерувати дані про висоту для підтримки виявлення будівель. Так було запропоновано принцип виявлення будівель, заснований на встановленні порогового значення для третього виміру, що ідентифікує височинні об'єкти [186]. Цей вимір являє собою стереофонічну інформацію, яка може становити або висоту, або невідповідність. Методологія виявлення включає три етапи (рис 1.8.):

1. обробка стереозображення – на даному етапі виконується підготовка стереофонічної інформації, яка включається для виявлення будівель. Тут

використовуються різні фотограметричні підходи, які полягають в зіставленні пар зображень, з метою пошуку точних збігів точок та фіксації висот.

2. виявлення будівлі – на цьому етапі виконується сегментація зображення, а також фільтрація сторонніх об'єктів, після чого окреслюються будівлі, за допомогою операції визначення порогу для нормалізованої стереофонічної інформації.

3. оцінка продуктивності – на даному етапі оцінюється ефективність виявлення будівель шляхом порівняння нанесених на карту дахів будівель з еталонним набором даних.



Рис.1.8. Принцип стереофонічної методології виявлення будівлі (побудовано автором за [186]).

Сучасні міста є складними утвореннями, вони займають відносно невеликі і фрагментовані частини глобального ландшафту, їх краї складно описати, а їх склад надзвичайно неоднорідний з точки зору матеріалів поверхні, їх просторових структур і розташування. Виходячи з цього існує потреба в досить докладній і послідовній базі даних про характер і внутрішній склад міст. Супутникові дані можуть допомогти розкласти міський земний покрив на окремі загальноприйняті типи, але цьому перешкоджає складність міських будівель, неоднорідність матеріалів і різноманітність спектральних властивостей.

На підставі супутникових даних було розроблено схему класифікації локальних кліматичних зон (ЛКЗ), з метою забезпечення раціонального і

універсального опису міських ландшафтів, в рамках дослідження явища міського теплового острова (рис. 1.9) [183]. Дана схема забезпечує основу для збору даних за різними характеристиками міського покриття, які регулюють багаточисельні кліматичні і гідрологічні впливи. Цінність цих даних була продемонстрована в ряді досліджень міського моделювання і спостережень, наприклад, ці дані були інтегровані в схему наземного міського енергетичного і водного балансу і модель прогнозування погодних досліджень для вивчення міського впливу на окремі міста.

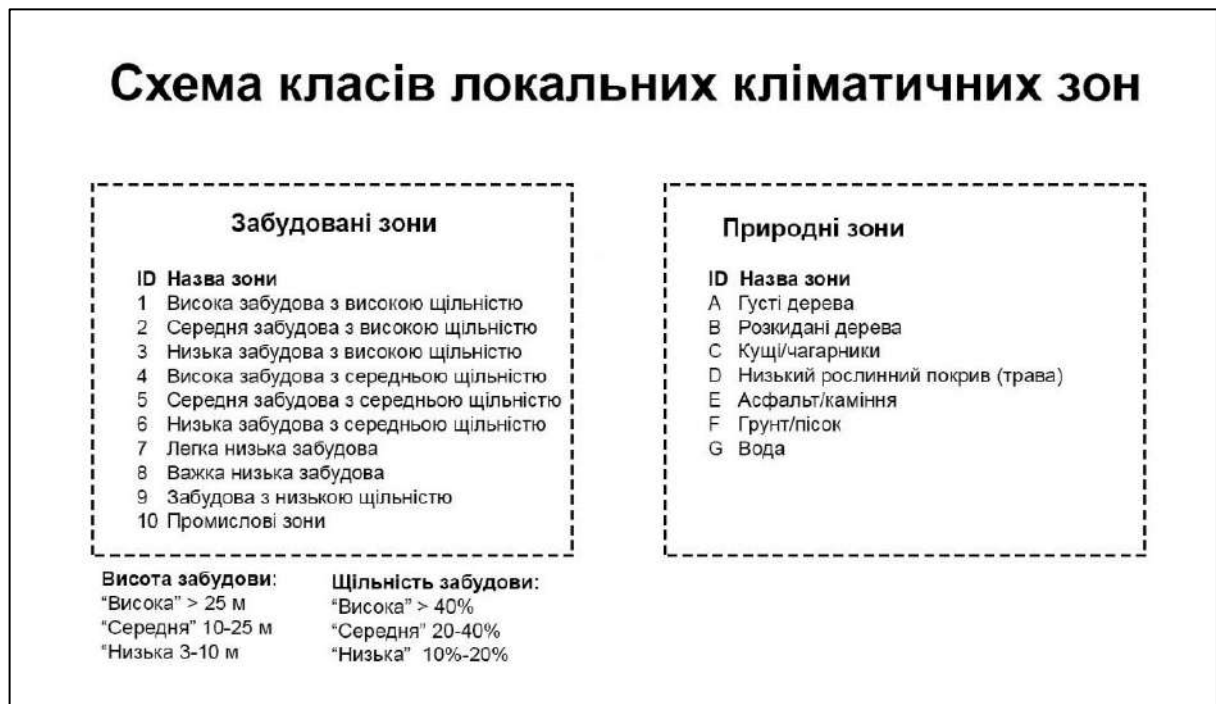


Рис.1.9. Класифікація локальних кліматичних зон (побудовано автором за [183]).

ЛКЗ є загальною типологією міських зон, яка може бути нанесена на карту з використанням даних ДЗЗ і контрольованого класифікатора. Є чимало свідчень того, як ЛКЗ можуть розрізнити вплив на клімат різних типів урбанізації, але сама схема потенційно забезпечує набагато більш широке охоплення в таких областях, як планування або реагування на надзвичайні ситуації.

Ще одне застосування ДЗЗ пов'язане з картуванням непроникних поверхонь міста. В умовах високої урбанізації значна частина земної поверхні

покривається непроникними матеріалами, що призводить до більш високого рівня поверхневого стоку і створює навантаження на міську інфраструктуру. Такі поверхні як дахи, дороги, тротуари і бетоновані поверхні, не дозволяють воді проникати в ґрунт і можуть вказувати на ступінь урбанізації. В окремих дослідженнях вказувалося на необхідність відстеження непроникних поверхонь в міських дослідженнях через їх ефективність при картуванні урбанізації [74]. Зокрема, в країнах, що розвиваються, де відсутні системи щорічного моніторингу, картування таких поверхонь може мати вирішальне значення.

З подібною тематикою проводилося дослідження, зосереджене на картуванні непроникних поверхонь міста Ханоя, В'єтнам, з використанням зображень *Landsat* [106]. При картуванні типи земного покриву були розділені на непроникні поверхні, проникні поверхні (рослинність) і воду. Картування непроникних поверхонь було засновано на двох протилежних кореляціях: негативна кореляція між непроникною поверхнею і нормалізованим різницеvim індексом рослинності (НРІР) і позитивна кореляція між непроникною поверхнею і температурою поверхні Землі. Зокрема, чим вище значення НРІР, тим нижче непроникність, а чим вище значення температури поверхні Землі, тим вище непроникність. У якості відправної точки для цього дослідження була висунута одна гіпотеза: непроникність збільшувалася з часом з 1988 по 2015 рік, що представляло собою період швидкого розростання міст [180]. Щорічне картування непроникних поверхонь дозволило оцінити темпи зростання міст, що відстежувалось на збільшенні кількості цих поверхонь.

У ще одному дослідженні зазначалося, що для того, щоб отримати точну і надійну кількісну оцінку наслідків демографічного зростання, змін навколишнього середовища і політики розвитку, необхідно отримати точну характеристику взаємодії людини і середовища (ВЛС) [143]. На думку авторів, основна проблема полягає в тому, що ВЛС є результатом багатовимірних явищ. Таким чином, точне уявлення про ВЛС може бути отримано тільки

шляхом збору інформації з декількох різномірних джерел. Серед них ключову роль грають правильно оброблені набори даних ДЗЗ, оскільки вони дозволяють отримати фізико-хімічний склад поверхні Землі або охарактеризувати складові частини атмосфери і якість води [142].

ДЗЗ дозволяють ефективно досліджувати фізико-хімічний склад навколишнього середовища, наприклад співвідношення якості повітря і забруднення води. Правильна обробка аеротеплових інфрачервоних записів в даних ДЗЗ дає інформацію про концентрацію сажі. Побудова карт якості повітря і води на основі таких даних дозволяє досліджувати вплив забруднення води і повітря на деякі аспекти міського життя, такі як первинна медико-санітарна допомога, активний транспорт і кількісний вплив забруднюючих речовин [142]. Карти будуються з використанням переваг фізичних процесів, викликаних забруднювачами у вигляді чорних твердих частинок, а також в яскравості, що випромінюється та реєструється багатоспектральними датчиками. Отримання таких результатів і їх грамотна інтерпретація надають важливий інструмент для вирішення фундаментальної проблеми майбутнього зростання, планування і розвитку міст.

Згадані раніше аеротеплові інфрачервоні зображення також застосовувалися з метою оцінки енергоефективності будівель. Дані теплових інфрачервоних датчиків використовувалися для визначення температурних аномалій в оболонці будівлі, де відроблене тепло виходить з конструкції [97]. В даному дослідженні відроблене тепло являє собою нагріте повітря, яке виходить з дому замість того, щоб залишатися всередині і підтримувати тепло в будинку. Крім того, виміряне відроблене тепло, яке покидає захисну конструкцію будівлі, може вважатися мірою енергоефективності самої будівельної конструкції.. Результати цього дослідження показали, що при належній обробці кольорові теплові карти є дуже ефективними в контексті даного дослідження, адже вони надають достатньо точну інформацію про розподіл теплових втрат між різними забудовами і є інтуїтивно зрозумілими та відносно недорогими у виробництві.

Загалом, з появою аерофотознімків за тепловими інфрачервоними датчиками картування теплових втрат та відробленого тепла дозволило виокремлювати унікальну інформацію щодо енергоефективності забудов, в масштабах як окремих будинків так і територій цілих районів та міст, що було продемонстровано у низці застосувань [87, 166, 195].

Інтеграція ДЗЗ і ГІС отримала широке поширення і була визнана потужним і ефективним інструментом для виявлення змін в землекористуванні (ЗК) і земельному покриві в містах [86, 99, 196]. Супутникове ДЗЗ збирає багатоспектральні дані, дані з різною роздільною здатністю і часові дані та перетворює їх в інформацію, що представляє надзвичайну цінність для дослідження і моніторингу міського середовища, а також для створення наборів даних про земельний покрив в містах. ГІС, у свою чергу, забезпечує гнучку середовище для введення, аналізу і відображення цифрових даних з різних джерел, необхідних для ідентифікації міських об'єктів, виявлення змін і розробки баз даних.

Супутникові зображення є ефективним джерелом вичерпної, точної, періодичної і легко оновлюваної інформації про міське середовище. Окрім того, однією з найбільш важливих тем досліджень в області ГІС технологій є обробка цих джерел для отримання вхідних даних. Існує ряд методологічних проблем, пов'язаних із застосуванням ДЗЗ для міського аналізу, які все ще знаходяться на експериментальній стадії. Так, в одній із робіт обговорюється два центральних питання: (1) пошук процедур класифікації, які дозволяють виокремити різноманітні міські типи ЗК, і (2) розробка універсальних методик класифікації в різних міських умовах, які дозволяють розширити поширення і застосовність ГІС [133].

Перша проблема виникає через недоліки в розрізненні різних типів ЗК на основі спектральної інформації, отриманої супутниковими датчиками; в такому випадку поверхні з однаковими значеннями спектральної відбивної здатності можуть відповідати дуже різним типам ЗК та міським функціям.

У другому питанні вважається, що процедура отримання карти землекористування, створеної шляхом класифікації супутникових зображень, не має обмежуватися певною територією, певним часом чи конкретною програмою, оскільки вона не є остаточним продуктом, а скоріше вважається загальною процедурою для різних процесів дослідження та планування міст.

Одна з головних переваг ДЗЗ стосовно до міського середовища – це придатність для вивчення протяжності, величини і еволюції забудованої території міста [133]. Поточні дослідження спрямовані на те, щоб вийти за рамки спроб отримати детальну інформацію про диференціацію покриття всередині, а також визначити щільність поселень і характеристики різних типів ЗК. Також набувають розвитку різні методи геовізуалізації щільності в міських районах, серед яких примітними є методи дискретного представлення щільності міст, засновані на виявленні покриття з використанням обробки багатоспектральних зображень.

Отримання дискретних значень щільності за допомогою цифрової обробки супутникових зображень дозволяє отримати більш точну інформацію щодо фактичної площі, займаної кожним з різних рівнів щільності, на відміну від інформації, отриманої шляхом побудови суцільних поверхонь. Наприклад, на підставі супутникових знімків *Landsat 5 TM* і методології спектральної сигнатури, було проведено дослідження щодо виявлення міських класів щільності [133].

Генерація класів складалася з трьох етапів. По-перше, було проведено неконтрольовану класифікацію міської території та виділено п'ять міських класів. По-друге, спектральна сигнатура кожного класу була побудована за допомогою вибірок. Для кожного діапазону в кожному класі було розраховано середнє значення і стандартне відхилення, щоб їх можна було використовувати в контрольованих процесах класифікації. Нарешті, було проведено спектральний аналіз суміші. З використанням декількох спектральних бібліотек, було визначено, який саме кінцевий елемент входить до складу кожного класу, та розраховано їхню частку в кожному класі.

Використовуючи цю інформацію, можна було охарактеризувати класи відповідно до кількості забудови та зелених насаджень, які вони мають. На рис 1.10 наведено результати обробки зображення зі спектральною сигнатурою та характеристиками кожного класу. До таблиці включено частку покриття відповідно до класів, а кількість забудови та зелених насаджень класу зі знімком наведено як приклад.






Спектральна характеристика класів щільності			
Клас	Спектральна сигнатура (мінімум і максимум для кожної групи та класу)	Характеристика	Приклад
Низька щільність	B1: 0.100789–0.144165 B2: 0.100883–0.158503 B3: 0.090548–0.157492 B4: 0.283694–0.403982 B5: 0.199319–0.265179 B7: 0.135501–0.193289	30%-45% забудованої площі (20% цементу, 15% асфальту, 5% червоної черепиці, 5% цементних споруд), решта - зелена зона (35% трава і 20% дерева).	
Середня щільність (A)	B1: 0.096573–0.141425 B2: 0.097905–0.150625 B3: 0.100774–0.158934 B4: 0.152680–0.261476 B5: 0.155724–0.232228 B7: 0.091262–0.188210	55%-85% забудованої площі (62% асфальт, 7% бетонні дороги, 4% цементу і 5% доріг з сипучих матеріалів), решта - зелена зона (трава).	
Середня щільність (B)	B1: 0.107656–0.152816 B2: 0.124758–0.174898 B3: 0.131844–0.190040 B4: 0.185933–0.300921 B5: 0.181205–0.282537 B7: 0.143892–0.227124	55%-85% забудованої площі (60% цементних споруд і 25% цементу), решта - зелена зона (трава).	
Середня щільність (C)	B1: 0.090806–0.139462 B2: 0.110516–0.178774 B3: 0.125206–0.219218 B4: 0.221674–0.252586 B5: 0.227136–0.369960 B7: 0.196043–0.349435	55%-85% забудованої площі (45% асфальту, 20% червоної черепиці, 20% цементу), решта - зелена зона (дерева).	
Висока щільність	B1: 0.140074–0.227186 B2: 0.139103–0.260147 B3: 0.151912–0.270692 B4: 0.144505–0.337661 B5: 0.178452–0.376528 B7: 0.150452–0.425840	85%-100% забудованої площі (40% цемент, 50% цементні споруди, 6% червона черепиця і 4% асфальт)	

Рис.1.10. Класифікація міської щільності за даними ДЗЗ (побудовано автором за [133]).

Усього виділено 5 класів щільності, кожен з яких вказує на певну ступінь урбанізованості території. Характерною ознакою збільшення цього показника є поступове зниження частки зелених зон та поступове збільшення частки цементу і цементних споруд, що складають будівлі. При максимізації щільності знижується навіть частка асфальтованого покриття, яке у містах займає вільний простір між будівлями. Досягнення певних критичних відміток

цих показників при забудові міста може мати ряд негативних наслідків, що проявляються не тільки в негативному екологічному впливі, але й у перевантаженні окремих ділянок міста через незіставний обсяг забудови з обсягом вільного простору навколо неї. Розроблена класифікація міської щільності може допомогти у визначенні таких критичних відміток та накласти певні обмеження щодо забудови тих міських ділянок, що підпадають під останній клас, а також сприяти підвищенню зелених насаджень, зокрема, у класах середньої щільності. Недоліком даної класифікації, на нашу думку, є те, що в ній не враховується висота забудови, яка також є важливим показником ступені урбанізованості території. Доповнення цієї класифікації інформацією про висоту забудови, отриману з лідарних даних, дозволило б виявити додаткові підтипи щільності, наприклад тих, що наводилися раніше у схемі класифікації локальних кліматичних зон.

Розглянуті в даному розділі дослідження з використанням даних ДЗЗ винесені в окрему таблицю (табл.1.1). З таблиці видно, що такі дані мають широкий діапазон використання, а також значну функціональну гнучкість, що дозволяють застосовувати їх в багатьох міських дослідженнях.

Таблиця 1.1.

Застосування ДДЗ в урбаністичних дослідженнях (узагальнено автором за [86, 89, 97, 99, 105, 106, 133, 142, 183, 186, 196])

Автори та розробники	Спосіб застосування ДДЗ в дослідженні	Проблема
T. Esch, V. Heldens, A. Hirner та ін., Німецький центр ДДЗ	Створення глобального міського футпрінту	Інвентаризація міських утворень, відстеження урбанізації
X. Huang, L. Zhang	Розрахунок морфологічного індексу будівель	Визначення точного розташування та виокремлення будівель
A. Suliman, Y. Zhang	Обробка стереофонічних зображень	Ідентифікація височинних об'єктів, виокремлення будівель
I.D. Stewart, T.R. Oke.	Виявлення локальних кліматичних зон	Класифікація та опис міських ландшафтів
Hung Q. Ha, Qihao Weng.	Розрахунок різницевого індексу рослинності та температури земної поверхні	Картування непроникних поверхонь, відстеження урбанізації

Andrea Marinoni, Paolo Gamba, J. Goodhew та ін.	Обробка аеротеплових інфрачервоних зображень	Дослідження фізико-хімічного складу міського середовища, оцінка енергоефективності будівель
M. Ehlers та ін., P. Treitz та ін., P.M. Harris, S.J. Ventura	Інтеграція в ГІС	Картування типів землекористування
Santiago Linares and Natasha Picone	Класифікація міської щільності за спектральними показниками	Аналіз та відстеження міської щільності міської забудови

З роками кількість нових способів застосування даних ДЗЗ, а також нових запитів на їх застосування тільки розширюється. Разом з цим поліпшуються і технологічні аспекти ДЗЗ: підвищується якість зображень, швидкість збору даних, а також їх обсяг, при цьому інструменти ДЗЗ стають все більш доступними для використання в приватних цілях.

1.3. Лідарна з'йомка та геообробка її результатів для відтворення і 3D-подання міського середовища.

1.3.1. Особливості збору, збереження і обробки лідарних даних.

Виходячи зі змісту попереднього підрозділу, можна зазначити, що використання ДЗЗ є одним з найбільш ефективних та надійних джерел інформації для сучасних урбаністичних досліджень. Окремий інтерес у цій сфері представляють технології відстеження та моніторингу міської забудови. Серед усіх методів ДЗЗ, найбільш релевантним для цього запиту є технологія лідарної зйомки (*LiDAR, Light Identification Detection and Ranging – англ.*), яка заснована на отриманні та обробці інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища поглинання і розсіювання світла в прозорих і напівпрозорих середовищах [31]. Дана технологія вимірює відстані (або дальності) в залежності від часу між передачею і прийомом лазерних сигналів. Можуть використовуватися як імпульсні, так і безперервні лазери: імпульсні лазери передають енергію з

дуже короткою тривалістю і визначають дальність дії на основі амплітуд прийнятих сигналів; Навпаки, лазери безперервної дії визначають дальність дії на основі різниці фаз між переданим і прийнятим сигналами.

Лідарна зйомка – це активний метод ДЗЗ, який може використовуватися на космічних, повітряних і наземних платформах. Основними компонентами апаратного забезпечення лідача є: транспортний засіб або пристрій (літак, гелікоптер, БПЛА, автомобіль), лазерний далекомір, який вимірює дальність (система лазерного сканування), *GPS* (глобальна система позиціонування) та *INS* (внутрішня система позиціонування) (рис. 1.11). Системи позиціонування вимірюють розташування і орієнтацію датчика, які в поєднанні можуть визначати тривимірні координати виявлених об'єктів.



Рис. 1.11. Компоненти апаратного забезпечення лідача (побудовано автором за [184]).

Лідар виконує лазерне сканування земної поверхні під час руху повітряного транспортного засобу за спеціальним маршрутом по цільовій території. Відбивання лазерних променів від об'єктів земної поверхні приймається сенсорним пристроєм лідача. При виконанні цієї операції записується точний час між моментом випускання лазерного імпульсу до моменту його повернення, який дозволяє визначити відстань між лідаром та сканованим об'єктом. На підставі супутньої *GPS* та *INS* інформації, з цих відстаней визначаються тривимірні точки, які у сукупності формують хмару точок, що імітує поверхню землі, що сканується [103].

Лазерні імпульси, що випускаються лідаром, відбиваються як від об'єктів, що знаходяться на поверхні землі, так і від об'єктів, що знаходяться над землею: від рослинного покриву, будівель, мостів, тощо. Один лазерний імпульс може відобразитися і повертатися до сенсора як один раз, так і декілька. Будь-який лазерний імпульс зазнає кілька відбивань при його русі до земної поверхні, розділяючись на стільки частин, від якої кількості поверхонь він відбився (рис. 1.12).

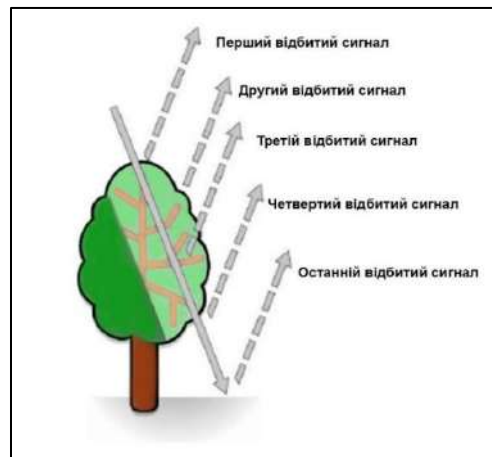


Рис. 1.12. Відбиття лазерних імпульсів від земної поверхні (побудовано автором за [184]).

Перший повернутий сигнал є найбільш показовим і відповідатиме найвищому об'єкту ландшафту, такому як, наприклад, верхівка дерева або дах будівлі. Перший відбитий сигнал може також відповідати і земній поверхні. В цьому випадку лідаром буде захоплено тільки одне відбиття.

Велика кількість повернень використовується для отримання висот декількох об'єктів, що знаходяться на шляху лазерного імпульсу. Відбиті сигнали з середини "спектра" зазвичай відповідають рослинності, а останні відбиті сигнали використовуються для моделей поверхні землі [210].

Скануючі лідари у системах машинного зору формують дво- або тривимірну картину навколишнього середовища, і ця обставина дуже вдало корелює з можливостями сучасних ГІС-платформ подавати тривимірну візуалізацію довкілля у вигляді тривимірної сцени.

Для кращого обміну лідарними даними, Американське товариство фотограмметрії і дистанційного зондування (*ASPRS*) представило послідовний двійковий формат файлу *LASer (LAS)*, що містить записи лідарних даних або інших хмар точок. Кожен файл *LAS* може складатися з загальнодоступного блоку заголовку, будь-якої кількості записів змінної довжини, записів точкових даних і будь-якої кількості записів розширеної змінної довжини. У загальнодоступному блоці заголовку зберігається основна зведена інформація, така як кількість і межі точок. Окрім позиційних значень в *LAS* може фіксуватися додаткова інформація. Для кожного лазерного імпульсу в метаданих *LAS*-файлу зберігаються різноманітні атрибути (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Атрибути *LAS*-файлу (складено автором за [184])

Атрибут <i>LAS</i> -файлу	Опис атрибуту
Інтенсивність	Потужність відбитого лазерного імпульсу в конкретній точці, що частково залежить від відбивної здатності об'єкту, що сканується.
Номер відбитого сигналу	Лазерний імпульс може створити до п'яти відбитих сигналів в залежності від об'єктів, від яких він відбивається і можливостей лазерного сканера. Перший повернутий імпульс буде позначений як відбитий сигнал номер один, другий – як номер два і т.д.
Кількість відбитих сигналів	Загальна кількість відбивань даного імпульсу (кількість зафіксованих точок)
Класифікація точок	Кожна точка може відноситися до певного класу, що характеризує тип об'єкту, що відбиває лазерний імпульс, наприклад рослини (класи 3-5 для низької, середньої та високої рослинності), будівлі (клас 6), земна поверхня (клас 2).
Ребро лінії польоту	Точки відображаються в залежності від значення, яке дорівнює нулю або одиниці. Точки, що знаходяться на лінії польоту, мають значення, рівне одинці, решта – рівне нулю.
RGB-значення	Якщо цифрова камера інтегрована з лідаром, кожна лазерна точка може бути пов'язана з пікселем зображення на основі фотограмметричних методів. В такому випадку запис точкових даних може також зберігати спектральні (наприклад, синій, зелений, червоний і ближній інфрачервоний) значення відповідного пікселя.
<i>GPS</i> -час	Час, що відповідає моменту випускання імпульсу;
Кут сканування	Значення у діапазоні від -90° до $+90^\circ$, яке характеризує кут, під яким була отримана точка.
Напрямок сканування	Напрямок руху сканера в момент випускання лазерного імпульсу; Значення, рівне одиниці, відповідає позитивному напрямку сканування (сканер рухається зліва направо), а рівне нулю – негативному (сканер рухається справа наліво)

Важливим атрибутом LAS-файлу є класифікація точки, яка повідомляє, чи повертається лазерна точка з землі, рослинності, будівлі, водойми, тощо. Для лазерної точки клас, ймовірно, є другою за важливістю інформацією після координат X , Y і Z точки. Якщо лазерні точки не класифікуються (тобто значення класу рівне 0 або 1), набір лідарних даних в значній мірі обмежується тривимірною візуалізацією хмар точок. Навпаки, класифікована хмара точок дозволяє аналітику проводити безліч корисних аналізів, таких як створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) з використанням точок, класифікованих як гола земля (значення класу 2), картографування рослинності з використанням точок зі значеннями класу 3-5 і виокремлення будівель з використанням точок із значенням класу 6 [12].

Обробка і аналіз лідарних даних зазвичай включає дві основні процедури: (1) класифікація лазерних точок і (2) інтерполяція дискретних точок на безперервну поверхню. Так, для створення ЦМР потрібна класифікація чи виокремлення відбитих сигналів від землі і інтерполяція цих сигналів в растрову або триангуляційну нерегулярну мережу (*TIN, Triangulated Irregular Network* – англ.) [80].

Класифікація лазерних точок означає визначення типу матеріалів або об'єктів земної поверхні, які генерують лазерні відображення чи точки. Наприклад, лазерний імпульс, який передається від літака до дерева, може генерувати три сигналу: перший – від поверхні крони дерева, другий – від гілок і листя під кроною дерева, і останній – від землі під кроною дерева.

У багатьох застосуваннях лідарних даних необхідною є класифікація точок на 2 базові класи – наземні та неназемні. Перші використовуються для створення ЦМР, які в свою чергу можуть знадобитися для моделювання різних висотних об'єктів на земній поверхні. Наприклад, висоту будівлі можна розрахувати як різницю між відмітками лазерних точок на даху будівлі і ЦМР. Виокремлення відбитих сигналів від земної поверхні з хмари точок зазвичай є першим кроком обробки лідарних даних – цей етап називається фільтрація.

На відміну від оптичних або радіолокаційних зображень, лідарні дані не дозволяють безперервно вимірювати або відображати земну поверхню. Кожен лазерний імпульс і його відображення по суті є окремими точками навколишнього середовища навіть при дуже високій щільності точок. Для створення просторово безперервних цифрових об'єктів та тривимірних карт з сукупності цих дискретних точок необхідна інтерполяція [114].

Будь які алгоритми фільтрації лідарних даних зазвичай засновані на двох критеріях:

1. земля має найменшу висоту у порівнянні з об'єктами над нею [115];
2. висота і нахил змінюються повільніше для голих ділянок землі, ніж для цифрових моделей поверхні (ЦМП) [72].

Серед великої різноманітності розроблених алгоритмів фільтрації найбільш ефективними є поверхневі підходи. Такі підходи починаються з початкової поверхні, яка наближається до голої землі, а потім генерують іншу приблизну поверхню голої землі, яка використовує інформацію з попереднього кроку. Цей процес може повторюватися ітеративно доки наступна поверхня не буде істотно відрізнитися від попередньої.

Достатньо популярним є алгоритм, що заснований на векторній структурі даних *TIN*-моделі, яка складається з мозаїчної сітки трикутників, що не перекриваються [57]. Кожен з цих трикутників складається з нерівномірно розподілених точок. Даний алгоритм працює наступним чином:

1. за лідарними точками будується сітка, де найнижчі точки сітки обираються в якості первинних точок, які використовуються для побудови початкової *TIN*-моделі. Розмір сітки має бути досить великим (наприклад, 50-100 м), щоб гарантувати, що найнижча точка в кожному осередку сітки є відображенням від землі;
2. точки додаються в *TIN*, якщо вони близькі до трикутної грані та мають невеликі кути до трикутних вузлів, що їх перекривають;
3. ущільнення *TIN* триває доти, доки більше не можна буде додати точки землі.

Основна ідея даного підходу полягає в тому, щоб почати з невеликого набору земних точок, а потім ітеративно додавати точки землі, що залишилися. На відміну від такої стратегії «складання», точки землі також можуть бути виокремлені за допомогою «віднімання» – з усіх точок хмари ітеративно видаляються точки, не пов'язані з землею; точки, що залишаються в кінці ітерації, є точками землі [57].

Альтернативною структурою даних для моделювання поверхні землі є растрова. Подібно до підходів на основі *TIN*, алгоритми фільтрації на основі растру також можуть бути розроблені на основі стратегії «складання» або «віднімання». Так було розроблено алгоритм «субтрактивної» растрової фільтрації [126]. Використовуючи простий кригінг, один з методів інтерполяції, автори алгоритму спочатку відтворюють поверхню, використовуючи всі точки; потім точки зі значними додатними значеннями видаляються, а іншим привласнюються ваги відповідно до їх значень: точки зі значними від'ємними значеннями з більшою ймовірністю відносяться до земних точок і, отже, їм будуть присвоєні вищі ваги. Поверхні ітеративно доповнюються залишеними точками з вагами до збіжності.

Однією з головних проблем інтерполяції з точок у растр є складні обчислення, оскільки хмара точок зазвичай містить кілька мільйонів точок на квадратний кілометр, і інтерполяція зазвичай включає використання точок в межах локальної околиці кожної точки, що вимагає додаткових обчислювальних ресурсів для індексації і пошуку. Тому ефективний алгоритм повинен мінімізувати використання інтерполяції в процесі фільтрації. Наприклад, в одному з досліджень спочатку було створено растрову сітку з високою роздільною здатністю (наприклад, 1 м), яка містить висоти найнижчих точок, а потім застосовано морфологічні операції на основі зображень (конкретніше, відкриття) для видалення надземних об'єктів, таких як будівлі і дерева [72]. Для ідентифікації будівель різних розмірів, автори використовували сусідні вікна поступово зростаючих розмірів для морфологічного розкриття. Їх алгоритм використовував той факт, що будівлі

мають різкі перепади висот по краях, щоб відокремити будівлі від незначних нерівностей місцевості, і тому він називається морфологічним методом на підставі країв. Наземні точки ідентифікуються шляхом порівняння кожної точки з остаточним морфологічно відкритим растром (який приблизно відповідає голій землі). Нарешті, для інтерполяції гладкої ЦМР використовується кригінг. Оскільки інтерполяція використовується тільки один раз, алгоритм є достатньо швидким та ефективним.

Після відокремлення наземних і не наземних точок за допомогою фільтрації, не наземні точки можна додатково класифікувати на будівлі, дороги, рослинність та інші класи. Для класифікації точок та виокремлення земних об'єктів використовуються різні методики, частина з яких буде розглянута у наступному підрозділі.

1.3.2. Застосування даних лідарної зйомки в міських дослідженнях (огляд попередніх досліджень).

Технологія лідарної зйомки набуває все більшого спектру застосувань в останні десятиліття, як в регіональному, так і в локальному масштабі. Скануючі засоби та способи їх транспортування стають все більш доступними, а інструменти обробки лідарних даних стають все більш потужними та мультифункціональними.

Тривимірне моделювання міської місцевості та окремих міських об'єктів на основі лідарних даних знайшло своє застосування у багатьох міських дослідженнях. Далі нами буде розглянуто низку прикладів застосування лідарних даних в рамках різних користувацьких сценаріїв міських досліджень.

Однією з найбільш розповсюджених задач, що виконується з використанням лідарних даних є виокремлення та тривимірне моделювання будівель з лідарної хмари точок. Таке застосування лідарних даних полягає у визначенні та відокремлення точок, які відповідають будівлям, від решти точок з набору лідарних даних. Цей процес може бути складним через різницю

в висоті та геометрії будівель порівняно з іншими об'єктами, такими як дерева чи дороги.

Існує безліч різних алгоритмів з аналізу та обробки хмари точок для коректного виокремлення будівель, серед яких слід виділити роботу із застосуванням моделі суміші Гаусса для сегментації даху будівлі по лідарних точках [214]. Автори даного підходу використовували тривимірну гауссову модель для опису розподілу лідарних точок в межах плоскої ділянки. Через обмежену точність лідарних даних хмари точок плоских дахів неточно лежать на математичній площині, та розкидані по тонкій пластині близько даху, а відхилення точок від площини відповідають розподілу Гаусса з центром в нулі. Таким чином, фрагмент хмари точок окремої будівлі може бути представлений тривимірною гауссовою моделлю суміші, яка являє собою лінійну суперпозицію гауссових розподілів. За такими властивостями вона може бути виокремлена від решти точок.

Окрім гауссової моделі, для виокремлення будівель існують приклади застосування методу *RANSAC* (*RANdom SAMple Consensus* – англ.), який призначений для оцінки параметрів моделі на основі підбору випадкових вибірок [90]. Алгоритм, побудований на основі *RANSAC*, може в кілька ітерацій аналізувати фрагмент хмари точок будівлі з метою пошуку такої сукупності точок, яка найкращим чином описуватиме модель будівлі.

На рис. 1.13. наведено порівняння результатів впровадження моделі суміші Гаусса та методу *RANSAC* стосовно аналізу хмари точок двох окремих будівель. Так, якщо для першої будівлі (рис. 1.13А) гауссова модель виявляє два перетини площини даху (рис. 1.13Б), то *RANSAC* для цієї ж будівлі цих перетинів не виявляє та відображає лише площини даху (1.13В). Для другої будівлі (1.13Г) гауссова модель виявляє три перетини даху і площини (1.13Д), тоді як *RANSAC* виявляє лише один перетин з площинами (1.13Е). Таким чином, з цього порівняння видно, що модель суміші Гаусса демонструє більшу точність аналізу лідарних даних, хоча *RANSAC* можливо буде більш

придатним для автоматизованого аналізу великих обсягів лідарних даних, про що детальніше йтиметься у другому розділі дисертації

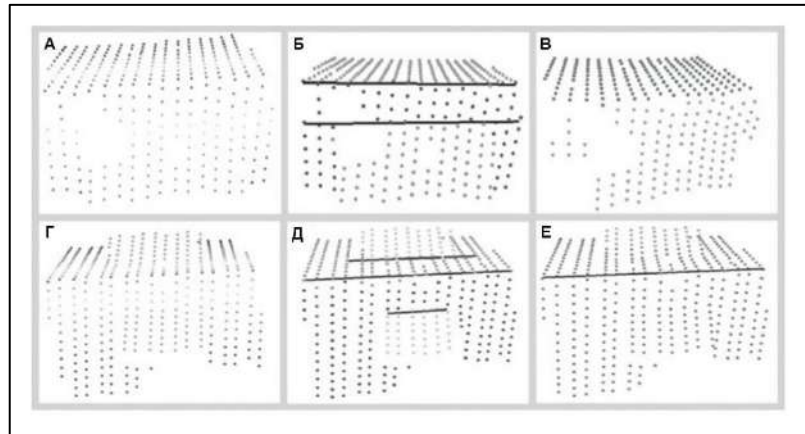


Рис. 1.13. Порівняння результатів роботи алгоритмів за моделлю суміші Гаусса та методу *RANSAC*. А та Г – перша та друга будівля відповідно; Б та Д – результат роботи моделі суміші Гаусса для першої та другої будівлі, В та Е – результат роботи алгоритму *RANSAC* для цих же будівель [80].

Побудова точних моделей будівель на земній поверхні з точною геоприв'язкою на підставі даних лідарної зйомки відкрило можливості для досліджень особливостей вертикального та горизонтального розростання міст. Найбільш характерним застосування у цьому аспекті є відстеження змін у забудові при зіставленні лідарних даних [83].

Для виявлення змін необхідне застосування двох наборів лідарних даних, що покривають досліджувану місцевість – первинних та вторинних даних (первинні, відповідно, збираються під час першого проведення лідарної зйомки, вторинні – під час другого; таким чином, фіксуються ті зміни, які відбуваються між цими проведеннями лідарної зйомки).

В одному з досліджень, з лідарних даних були побудовані цифрові моделі рельєфу (ЦМР), цифрові моделі поверхні (ЦМП), цифрові моделі висот (ЦМВ = ЦМП – ЦМР) і різницеві цифрові моделі поверхні (рЦМП), в ході ГІС-обробки яких створюється карта забудова, яка відображає 4 класи будівель (рис 1.14):

1. Нові будівлі, що з'явилися на місці раніше існуючої високої та середньої рослинності (1 тип);

2. Нові будівлі, що з'явилися на голій землі або поверх існуючих будівель (2 тип);

3. Знесені або пошкоджені будівлі (3 тип);

4. Існуючі будівлі, які не зазнали істотних змін (4 тип).

За даною методикою, виявлення змін у забудові відбувається в кілька етапів:

1) Визначення коректного порогу ухилу, який розділяє будівлі й середню або високу рослинність, з використанням зональної статистики;

2) Обчислення середнього зонального ухилу S_i з використанням шару футпринтів будівель в якості зон;

3) Співставлення первинних та вторинних даних з метою визначення об'єму змін V_{ij} в наземних об'єктах, після чого визначається;

4) Визначення об'єму V_{ij} з рЦМП, з використанням зональної суми осередків р ЦМП в межах кожного з футпринтів будівель;

5) Обчислення S_i і V_{ij} для кожного футпринту будівлі, з використанням порогового значення об'єму V_t , встановлене зі стандарту будівництва і безпеки будівель.

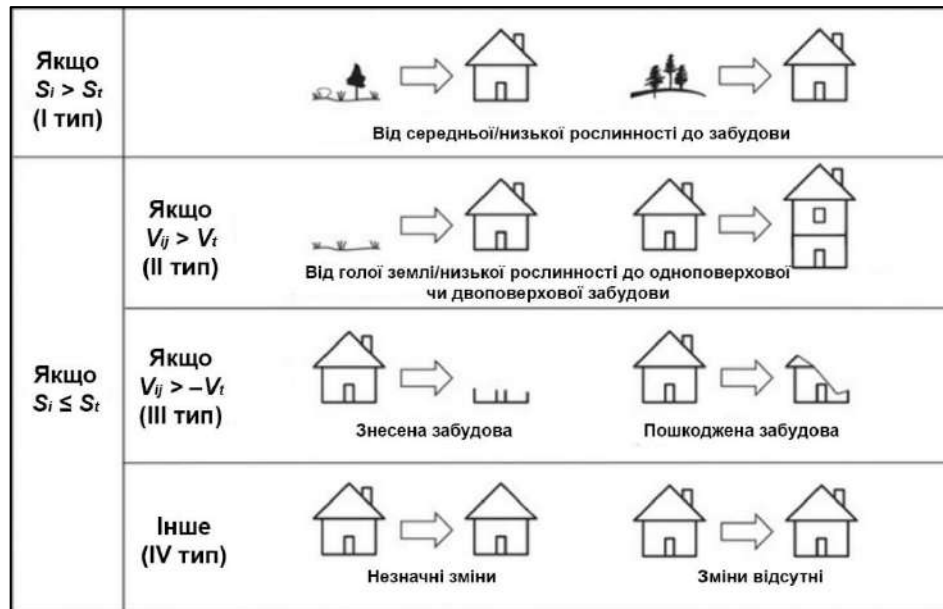


Рис.1.14. Визначення чотирьох типів змін забудови з використанням середнього зонального ухилу даху (S_i), порогового значення ухилу (S_t), зональної зміни об'єму (V_{ij}) і порогового значення об'єму (V_t) (побудовано автором за [83]).

Окрему прикладну значимість відстеження змін у забудови має у дослідженнях пошкоджень будівель та інфраструктури, що відбуваються внаслідок різних стихійних лих або бойових дій. Так, в рамках дослідження наслідків землетрусу, іншими авторами було змодельовано різні типи пошкоджень будівель. Для моделювання використовувались *TIN*-моделі з лідарних точок, створених за допомогою тріангуляції Делоне. Метод полягав у створенні випадкових точок на стінах і поверхнях будівель, які дозволяли порівнювати сигнатури тривимірних форм (*3D shape signatures*) моделей будівель для виявлення пошкоджених будівель. Через порівняння цих сигнатур отриманих з даних лідарної зйомки, виконаної до та після землетрусу, авторам вдалося виявити ступінь пошкоджень та винести отриману інформацію у спеціальну базу даних ГІС. Узагальнена алгоритмічна послідовність для автоматизованої оцінки пошкоджень з використанням лідарних даних і ГІС за зазначеним підходом наведена на рисунку 1.15.



Рис. 1.15. Схема автоматизованої оцінки пошкоджень будівель після землетрусу з використанням лідарних даних та ГІС (побудовано автором за [81]).

Ще одним, достатньо цікавим, застосуванням даних лідарної зйомки є оцінка чисельності населення за виокремленими моделями будівель.

Було представлено метод оцінки населення малих територій з використанням лідарних даних, даних *Landsat TM* і даних про земельні ділянки [82]. Суть методу полягала у використанні даних вибірових блоків перепису населення для побудови моделей найменших квадратів й моделей географічно зваженої регресії. Зокрема, визначалася чисельність населення у порівнянні з кількістю, площею та об'ємом будівель.

З використанням даних про кількість населення з 91 випадково вибраної ділянки перепису в якості залежної змінної, і даних про кількість, площу та об'єм будівель отриманих в результаті лідарної зйомки в якості незалежної, було виконано оцінку населення через побудову моделей лінійної та географічно зваженої регресії [82]. Результат показав істотну кореляцію між реальною кількістю населення та кількістю, площею та об'ємом будівель, виокремлених з даних лідарної зйомки. Проблема даного дослідження полягала у недостатній щільності точок лідарних даних, яка не дозволила точно визначити окреслення окремих будівель.

У ряді досліджень лідарні дані використовуються для виокремлення доріг [127, 129]. У багатьох випадках реалізується напіваавтоматичний підхід до виокремлення доріг для підвищення ефективності, точності і рентабельності діяльності по розробці даних. Такий підхід, з одного боку автоматизує багато часозатратних процедур, щодо окреслення міських доріг, з іншого боку – дозволяє мануально відкорегувати результат, який може містити безліч помилок, пов'язаних зі складною структурою міської місцевості.

Різні об'єкти земної поверхні мають різні значення інтенсивності лазерного імпульсу, що окремо позначаються для кожної точки лідарної хмари та ідентифікують той чи інший об'єкт земної поверхні. Зокрема, водойми, асфальтове покриття, дахи окремих будівель зазвичай мають низькі значення інтенсивності, тож за ними, у співставленні з цифровими моделями рельєфу, з хмари точок можна відфільтрувати виокремити саме точки, що відносяться до асфальтового покриття та описують міські дороги. Для цього спершу створюється зображення інтенсивності хмарних точок, а також за неземними точками генерується ЦМП. Потім зображення інтенсивності об'єднується з ЦМП і сегментується з використанням певного порогового значення. Отримується двійкове зображення, яке може відокремити попередні дороги від решти поверхні міської місцевості з усіма його об'єктами. Таке зображення надалі вже вручну редагується з метою згладжування та уточнення доріг [129].

Можливість відокремлення земних та неземних точок також сприяло застосуванню лідарних даних для моделювання ризиків міських повеней. У деяких дослідженнях на підставі даних фільтрації та інтенсивності була отримана ЦМР, що імітує потенційну повінь, спричинену штормовими нагонами у прибережних районах міста [144, 207]. Обидва дослідження продемонстрували, як використовувати результати моделювання повеней для тривимірної візуалізації та створення карт ризиків повеней. Результати моделювання показали, що ЦМР отримана за допомогою лідарних даних, дає мінімальну середньо-квадратичну помилку у визначенні висоти і площі прогнозованого затоплення. Також є приклад моделювання за лідарними даними неструктурованої сітки міського ландшафту з метою відтворення різних моделей затоплення та оцінки глибини проникнення води [198].

Дані лідарної зйомки також використовуються для картування ліній електропередач у низці досліджень. Так, авторами було розроблено алгоритм відокремлення точок, що належать лініям електропередач від інших об'єктів земної поверхні [147]. Точність визначених точок ліній електропередач склала 86,9%. Іншими авторами було також представлено список рекомендацій для точного моделювання ліній електропередач з застосуванням інформації про температуру провідника, швидкості вітру в місцевості та рівня сонячної радіації [138]. Окремо також використовувалась модель контактної кривої, за якою спочатку визначаються попередні точки з ліній електропередач, які надалі поступово збільшуються й поєднуються у цілісну лінію електропередачі – точність моделювання таким чином склала 96% [113].

Тривимірне моделювання будівель за лідарними даними також дозволяє достатньо точно оцінити очікуваний рівень потенційної сонячної радіації, що потрапляє на дахи міських будівель. В одному дослідженні подібна оцінка виконувалася з метою визначення оптимальних місцеположень для розміщення поновлювальних джерел енергії з фотоелектричними елементами [205]. Окремо також був розроблений алгоритм для ідентифікації дахів будівель та аналізу їх сонячного потенціалу. Наприклад, було виконано

достатньо успішне масштабне дослідження з оцінкою сонячної радіації по забудові м. Кебридж, штат Массачусетс [112].

Таким чином, можливості класифікації точок, а також тривимірного моделювання міського середовища на підставі обробки лідарних даних мають достатньо широкий спектр застосовувати в урбаністичних дослідженнях. Зокрема, для дослідження урбогеосистем, з розглянутих застосувань лідарних даних, найбільш привабливим є виокремлення будівель. На підставі виокремлених точок будівель можна побудувати їх тривимірні моделі, а потім візуалізувати цілий набір моделей будівель на територію певного міста у ГІС-середовищі, сформувавши таким чином тривимірну модель міста. Дискретні моделі будівель у такій візуалізації виступатимуть системними елементами інтернальної УГС. Оскільки такі моделі будуються з результатів лазерного сканування реальної місцевості, вони матимуть достатньо точну інформацію щодо геометричних властивостей будівель, а також передаватимуть точну архітектурну форму цих будівель [10, 24]. Вся ця інформація надалі може бути використана при урбогеосистемному аналізі міського середовища. Більш того, точна геометрична інформація будівель, зведена у ГІС-середовищі, може послугувати важливим ідентифікатором деяких похідних характеристик будівель, наприклад, очікуваної кількості жителів у будівлях, або очікуваного рівня енергоспоживання будівлями.

Переважність саме лідарних даних для тривимірного моделювання міста, порівняно з іншими підходами, полягає, по-перше, у високій точності отриманих в результаті сканування даних, по-друге, у можливості швидкого та ефективного збору даних на обмежених ділянках (областях інтересу), по-третє, у можливості автоматизованої класифікації та відокремлення об'єктів земної поверхні, що скануються [120]. Таким чином, ключовою перевагою технології лідарної зйомки може полягати в перспективі, що дозволяє будувати тривимірні моделі міст на значних територіях за надзвичайно короткий період часу.

Висновки до розділу 1

1. У першому розділі дисертації проведено ретроспективний аналіз розвитку урбаністичних досліджень, простежено поступове вдосконалення системного підходу до міських досліджень та подання міст як дедалі складніших системних утворень. Зокрема розглянуто ряд запропонованих різними авторами визначень урбосфери, урбосистеми та урбоекосистеми, логічним продовженням яких, в аспекті суспільно-географічних досліджень є виокремлення поняття урбогеосистеми. Ключовою особливістю УГС є її чітка прив'язка до певного екстенту географічного простору, а також подання міської системи у вигляді сукупності точкових, лінійних та полігональних компонентів. Така особливість вдало поєднується із можливостями ГІС виконувати візуалізацію просторових об'єктів саме через вказані графічні примітиви. Таким чином, у роботі обґрунтовано ГІС-модель урбогеосистеми, яка, зокрема, передбачає масштабованість УГС та можливість її подання у двох аспектах – *екстернальної* та *інтернальної* УГС.

2. Обґрунтовано основні положення щодо впровадження системного підходу до урбаністичних досліджень суспільної географії. Сучасні міста складаються з великої сукупності компонентів та елементів природо-антропогенного характеру, які перебувають у тісному системному взаємозв'язку та регулярно обмінюються між собою речовиною, енергією та інформацією. Так, урбосистема представлена такими взаємопов'язаними компонентами, як населення, техносфера, біота та абіотична середовище. У свою чергу, соціогеосистема, яка є об'єктом суспільно-географічних досліджень, представлена такими компонентами, як соціум, біота та абіота. УГС в цьому відношенні представляється частковим проявом феномену соціогеосистеми в межах конкретного екстенту географічного простору, і складається з наступних компонентів: населення, біогеоценоз, техносфера та абіотична середовище, які перебувають під впливом та управлінням суспільства. У роботі окремо підкреслено прояви основних системних

властивостей в УГС: цілісності, структурованості, ієрархічності, відкритості, цілеспрямованості та емерджентності.

3. У якості найбільш ефективного джерела та способу отримання даних про міста для їх ГІС-моделювання нами розглянуто міське дистанційне зондування Землі (ДЗЗ). На підставі аналізу існуючих урбаністичних досліджень із застосуванням даних ДДЗ було вивчено основні принципи та методики отримання та обробки подібних даних з метою виокремлення УГС-властивостей різних урбанізованих територій. Розглянуті приклади застосування ДДЗ в різних урбаністичних дослідженнях дозволили краще спланувати та оптимізувати власне дослідження різнорангових міст з використанням даних лідарної зйомки.

4. Окремим і найбільш переважним методом ДЗЗ землі для досліджень та аналізу УГС у роботі позначено метод сканування земної поверхні за допомогою технології *LiDAR*. Дані лідарної зйомки дозволяють побудувати високоточну тривимірну модель сканованої міської місцевості в цифровому ГІС-середовищі. При цьому різнорідні об'єкти міського середовища, зокрема будівлі, можуть бути виокремлені з хмари точок у вигляді дискретних тривимірних ГІС-об'єктів. Така особливість перетворення результатів лідарної зйомки добре вписується в зазначену раніше ГІС-модель УГС, і здатна значно вдосконалити її через тривимірне моделювання основних структурних елементів інтернальної УГС – будівель. Подані на основі обробки лідарних даних квазівекторні 3D-моделі будівель містять точну геометричну інформацію про реальні будівлі, а також описують їх архітектурно-морфологічні властивості, що робить їх набагато більш інформативними, ніж існуюче 2D-моделювання. Таким чином, у цьому розділі було введено основні положення щодо впровадження урбогеосистемного аналізу через тривимірне подання міського середовища.

РОЗДІЛ 2.

ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ ПІДХІД В МЕЖАХ УРБОГЕОСИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПІДСТАВІ ДИСТАНЦІЙНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДУВАННЯ (ЛІДАРНОЇ З'ЙОМКИ)

2.1. Виокремлення урбогеосистемних властивостей різнорангових міст за допомогою платформної та модульної ГІС-функціональності. Категорія урбаністичної геоситуації.

Сучасне місто є складною, неоднорідною системою з багаторівневою організацією внутрішніх компонентів. Воно постійно росте і ущільнюється, і за своєю природою є дуже мінливим – у ньому регулярно з'являються та зникають різні об'єкти, а також відбувається безліч процесів та явищ, спричинених взаємодіями цих об'єктів [42]. Те, наскільки ефективно та злагоджено відбуваються такі взаємодії впливає на функціонування міста в цілому, на його продуктивність та якість життя в ньому. Тому відстеження внутрішніх процесів, а також належне розуміння специфіки залежностей та відносин між окремими міськими об'єктами та цілими системними компонентами відкривають шлях до розробки ефективних рішень, що сприяють покращенню та розвитку міста. Розгляд міста як урбогеосистеми в цьому плані може суттєво полегшити його дослідження та дозволити найповніше зрозуміти його організацію, функціонування та взаємодію його різних компонентів.

Урбогеосистемна модель міста припускає його представлення у вигляді сукупності двовимірних графічних примітивів – точок, ліній та полігонів, а також 3D-примітивів – дискретних моделей міських об'єктів. По суті, за допомогою зазначених примітивів можна оцифрувати і відобразити будь-який міський об'єкт, процес чи явище у формалізованому вигляді у ГІС-середовищі, адже будь-яка векторна карта класичних ГІС якраз заснована на візуалізації

будь-чого через ці самі примітиви [17]. Якщо ж ми можемо представити місто з усіма його внутрішніми елементами в оцифрованому векторному форматі, то нам відкривається широкий набір інструментів ГІС-аналізу, який може бути застосований до міста, як УГС.

При коректному формуванні запиту та подачі на вхід ГІС-об'єктів міста, що мають дійсний взаємозв'язок, за допомогою ГІС-аналізу можна згенерувати якісно нову інформацію про місто та його окремі складові елементи, яку практично неможливо уявити поза урбогеосистемною моделлю. Більше того, ця інформація може бути візуалізована у вигляді зазначених раніше примітивів. Наприклад, з допомогою інструментів мережевого аналізу у ГІС можна згенерувати області доступності муніципальних послуг у вигляді полігональних об'єктів [33]. Ці області не мають будь-якого матеріального уявлення на реальній місцевості, але в ГІС вони можуть бути наочно візуалізовані, порівняні з областями доступності інших об'єктів і зіставлені з міськими об'єктами іншого типу.

Інформація, яку можна отримати під час ГІС-аналізу певного міста, характеризує урбогеосистемні властивості цього міста. Ці властивості можуть бути не очевидними при дослідженні окремих міських об'єктів чи при безпосередньому дослідженні міської місцевості, але вони проявляються у взаємозв'язку між об'єктами в УГС-моделі міста. Вони дозволяють глибше вникнути в деталі міського функціонування та краще зрозуміти причини та фактори, що визначають поточну міську обстановку [2]. По суті, в межах окремих міських підсистем ці властивості можна назвати емерджентними. У якості прикладу таких властивостей можна навести якість життя в окремих житлових масивах міста. Якщо розглядати певний житловий масив у відриві від УГС, то, ґрунтуючись на його внутрішніх параметрах (наприклад, розмірі житлової площі будівель, якості їх будматеріалів, благоустрою внутрішніх дворів), можна високо оцінити якість життя в ньому. Але якщо інтегрувати такий житловий масив до УГС, то при ГІС-аналізі можна виявити такі його властивості, як транспортна доступність, рівень шумового забруднення,

близькість до різних функціональних зон міста, які в той чи інший бік можуть суттєво вплинути на оцінку якості життя.

Важливою особливістю УГС-властивостей є їх масштабованість. Властивості, що виявляються на нижчих ієрархічних рівнях УГС можуть також виявлятися на її більш високих рівнях і впливати на її функціонування в цілому. Так, локальні проблеми в окремих житлових масивах, наприклад їх низька транспортна доступність, позначатиметься на роботі цілого сектора транспортного обслуговування, якому доведеться нести додаткові витрати для об'їзду віддалених місць. У свою чергу це може призвести до уповільнення транспортного обслуговування або зростання його вартості в тих районах, які зовсім не мають проблем з доступністю. Нарешті, вся ця ситуація, нехай і незначною мірою, але позначиться негативно на функціонуванні всього міста. Однак, ціла сукупність подібних проблем, що виділяються в різних частинах міста, може вже дійсно справити згубний ефект. Таким чином, коли йдеться про виявлення УГС-властивостей міст, часто мається на увазі виявлення подібних локальних проблем або просто спостережень, з яких потім випливає загальне розуміння того, як функціонує місто і чому в ньому склалася та чи інша ситуація [20]. ГІС, як зазначалося раніше, у цьому плані істотно полегшує виділення таких властивостей з допомогою численних інструментів аналізу та наочної візуалізації результатів.

УГС-властивості, що виокремлюються в окремих локаціях, можуть бути викликані певною специфікою даної міської місцевості, її поточним станом, умовами та конфігурацією об'єктів у ньому, тобто станом міського довкілля. Дослідження таких властивостей у ГІС іноді може виконуватися в обмеженому екстенті географічного простору, що вимагатиме лише даних на одну конкретну локацію, що покриває цей екстент. Для чіткого позначення таких міських локацій зі своїми особливостями можна виокремити *категорію урбаністичних геоситуацій (УГСит)*.

Під УГСит розуміється динамічний аспект певного стану міського середовища, у якому існують об'єкти, процеси і явища з урахуванням

особливостей стану їх самих, і які знаходиться у діалектичній єдності з цим міським середовищем. УГСит спорадично чи періодично виникають, функціонують, розвиваються, зникають і складаються знову на різних ієрархічних рівнях УГС та у різні відрізки часу [36]. По суті, поняття УГСит впливає з поняття конфігурації урбаністичного середовища – статичної картини співвідношень, прямих і зворотних зв'язків об'єктів, процесів та явищ у міському довкіллі, – та характеризує саме динамічний аспект цієї картини. Саме через залучення поняття УГСит ми можемо охарактеризувати обставини, стани і функціонування різних географічних складових міського середовища у рамках урбогеосистемного підходу.

Виокремлення УГСит є особливо зручним при аналізі тривимірних моделей міської забудови завдяки високій наочності та інформативності подібних тривимірних карт. З таких карт можна виділити набагато більше УГС-властивостей міста, наприклад, у розрізі архітектурної морфології його забудови, а також більше параметрів міських конфігурацій для розмежування геоситуацій. До того ж, геоситуаційний підхід буває дуже доцільним при аналізі лідарних даних – їх збір, розрахунок та моделювання може бути досить трудомістким процесом, тому для аналізу вибирається обмежений фрагмент лідарних даних щодо певної області інтересу з характерною геоситуацією. В результаті аналізу з цього фрагмента виділяються певні властивості та параметри даної геоситуації, які потім можуть бути екстрапольовані на інші території міста, що мають схожий тип забудови, без необхідності повторного моделювання лідарних даних [35].

УГСит формують структурні інваріанти УГС. По суті, вони є окремими частинами УГС на її різних ієрархічних рівнях. Тому переваги застосування ГІС до цілих УГС також актуальні і для категорії УГСит, що також обумовлюється її ключовими властивостями: структурна успадкованість, мінливість, повторюваність.

Під структурною успадкованістю УГСит мається на увазі прояв і вплив певних, структурних властивостей існуючих геоситуацій на нові геоситуації,

що з'являються при міському розвитку. Так, у певний момент часу у місті може бути прокладений історичний район з певним плануванням, яке задаватиме структуру розвитку майбутніх районів, де виявлятимуться деякі властивості історичного району. На прикладі порівняння історичного плану забудови міста Вашингтон (рис.2.1a), з його нинішнім планом (рис.2.1b) можна помітити, що навіть за межами планової території простежуються певні особливості планування (прокладання доріг, кварталів), які були притаманні історичному плану – це і є прояв структурної успадкованості УГСит. При перегляді тривимірної моделі забудови можна також помітити структурну успадкованість в архітектурній морфології забудови (рис. 2.1c). За рахунок описаної властивості, в результаті ГІС-аналізу можна виявити певну УГСит, а потім, вивчивши навколишню міську територію, дійти розуміння початкової причини виникнення цієї геоситуації. Тобто, при виконанні аналізу результатів, окрім вивчення поточних геоситуацій, можна побачити їх історичні передумови, а також відстежити хронологію змін та розвитку міського середовища в цілому.

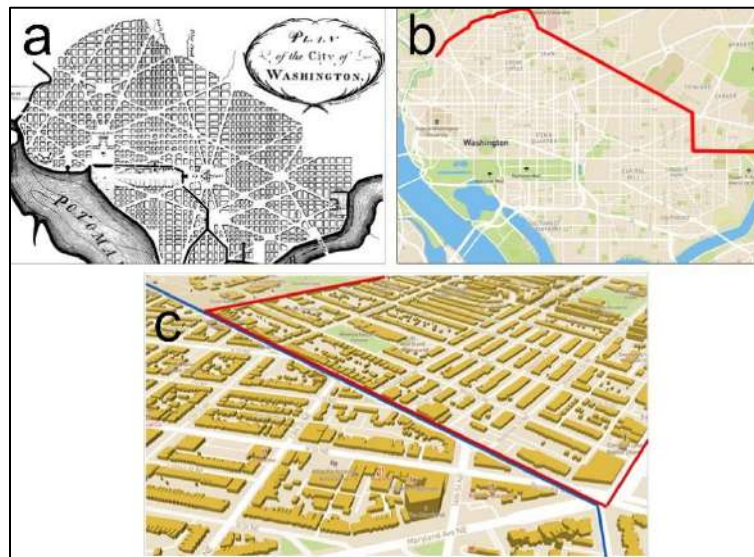


Рис.2.1. Прояв структурної успадкованості УГСит на прикладі забудови м. Вашингтон (побудовано автором за [161, 193]).

Мінливість УГСит проявляється у тому, як вони можуть з'являтися і зникати у різних частинах міста залежно від різних процесів та явищ, що у

ньому відбуваються. Тут слід зазначити, що УГСит може бути виокремлена лише у певному контексті дослідження міста. Геоситуації, що виділяються в одному контексті дослідження, можуть бути втрачені або проігноровані в іншому, оскільки разом з контекстом змінюються досліджувані показники та зміщується фокус уваги. Залежно від контексту, бувають як стійкі, постійні УГСит, наприклад, історичні райони міста, які довгі роки залишаються незмінними, так і мінливі УГСит, наприклад, центри тяжіння міського населення, які регулярно зміщуються залежно від доби та пори року. Така мінливість окремих УГСит найкраще характеризує їхню динамічну природу і є наслідком численних процесів, що регулярно протікають у місті. Однак, для ефективного вивчення подібних геоситуацій потрібне регулярне оновлення бази даних у ГІС. Завдяки тому, що міські об'єкти в ГІС впорядковані та розподілені за окремими класами, а також мають власні атрибутивні таблиці з класифікованими даними, процес оновлення даних може бути високою мірою автоматизований за допомогою введення різних скриптів, команд і правил призначення даних [45].

Повторюваність УГСит проявляється у тому, як одні й ті самі геоситуації зі спільними властивостями і характеристиками можуть багаторазово зустрічатися у різних частинах міста [35]. Такі геоситуації зазвичай мають загальну природу походження та формують різнорангові патерни УГСит. Що вище ранг патерну, то більші території він охоплює і за його більш узагальненими властивостями. Високорангові патерни характерні стійким УГСит, наприклад, цілим історичним районам міста з унікальним, у межах міста, типом забудови. Але в межах цих районів можна виявити також безліч низькорангових патернів УГСит, характерних окремим внутрішнім кварталам та групам будівель (рис.2.2).



Рис.2.2. Виокремлення різнорангових патернів УГСит на прикладі забудови м. Харків з використанням додатку *Google Earth* [36].

За рахунок цієї властивості окрему геоситуацію в ГІС можна досліджувати на обмеженому наборі даних, а потім поширити отримані результати аналізу на весь патерн даної УГСит. Наприклад, для виконання оцінки видимості на території певної міської забудови достатньо виконати її оцінку на рівні однієї окремої геоситуації, після чого можна очікувати, що ця ж оцінка буде характерною для всього патерну цієї УГСит.

Як вже зазначалося раніше, утворення патернів УГСит вдало поєднується з особливостями зберігання та обробки лідарних даних. Так, окремий фрагмент лідарних даних (*LAS*-файл із хмарою точок) може повністю відповідати певному патерну УГСит. Відповідно, для аналізу міської обстановки на основі лідарних даних може бути достатньо змодельовати забудову та виокремити УГС-властивості по обмеженому, але репрезентативному набору *LAS*-файлів, які покриватимуть ключові патерни УГСит. Отриманої таким чином інформації, у поєднанні з даними карт

глобального покриття, буде достатньо для визначення загальних властивостей розподілу міської забудови [36].

Таким чином, геоситуаційний підхід зводить ГІС-аналіз УГС до вирішення невеликих завдань за обмеженими наборами даних на невеликих міських ділянках, але в результаті такого аналізу можуть бути виведені загальні УГС-властивості досліджуваного міста.

Для ефективного виділення та аналізу УГСит необхідно застосування двох ключових складових: карти глобального покриття (відкриті бази даних) та інструментарій ГІС (рис.2.3).

Карти глобального покриття використовуються для первинного дослідження території, визначення високорангових патернів УГСит та пошуку або найбільш репрезентативних УГСит, або тих, які становлять інтерес у контексті поточного дослідження.

Далі, на міську територію загалом, і на обрані УГСит, зокрема, завантажуються всі необхідні дані. Для цього, можливо, знадобляться різні джерела даних та різні способи їх завантаження. Наприклад, векторні об'єкти можуть бути вручну оцифровані за аерофотознімками, а можуть бути вивантажені у готовому векторному форматі з відкритих баз даних, таких як *OpenStreetMap* [152]. Точкові об'єкти, зокрема, можуть бути завантажені до ГІС шляхом геокодування адрес. Якщо говорити про лідарні дані, то вони найчастіше завантажуються з різних державних і муніципальних баз даних, в яких часто може бути вбудований спеціальний інтерфейс для пошуку необхідних *LAS*-файлів у сфері інтересу. Атрибутивні дані, у свою чергу, можуть бути отримані як з глобальних баз даних, типу вже згаданого *OpenStreetMap*, так і з різних статистичних служб.

Після завантаження необхідних даних виконуються важливі проміжні етапи їх обробки та перетворення. Йдеться про інтеграцію всіх завантажених даних у єдиній геопросторовій базі даних з коректною географічною проекцією. Векторні дані мають бути розбиті за класами об'єктів, а атрибутивні дані мають бути прив'язані до відповідних об'єктів на карті [23].

За лідарними даними мають бути побудовані дискретні тривимірні моделі будівель. Крім того, для деяких розрахунків необхідне суміщення даних із різних джерел. Наприклад, з метою оцінки чисельності населення за будинками, лідарні дані (об'єм, висота будинків) зіставляються з даними переписних ділянок (чисельність населення).

Інструменти ГІС використовуються для безпосереднього аналізу УГСит, отримання УГС-властивостей та отримання якісної та наочної візуалізації результатів. Тут можна виділити чотири основні предметні сегменти інструментарію повноформатних ГІС: аналіз близькості та оверлей; аналіз динаміки процесів та явищ, визначення 3D-щільності об'єктів, загальна VA-функціональність. В результаті застосування таких інструментів на виході або створюються нові модельні сутності, що демонструють певні властивості вихідних об'єктів, наприклад, буферні зони, моделі змін, сфери видимості, або генерується нова атрибутивна, статистична інформація, що містить результат математичного підрахунку даних з різних об'єктів через просторовий та атрибутивний запит [28].

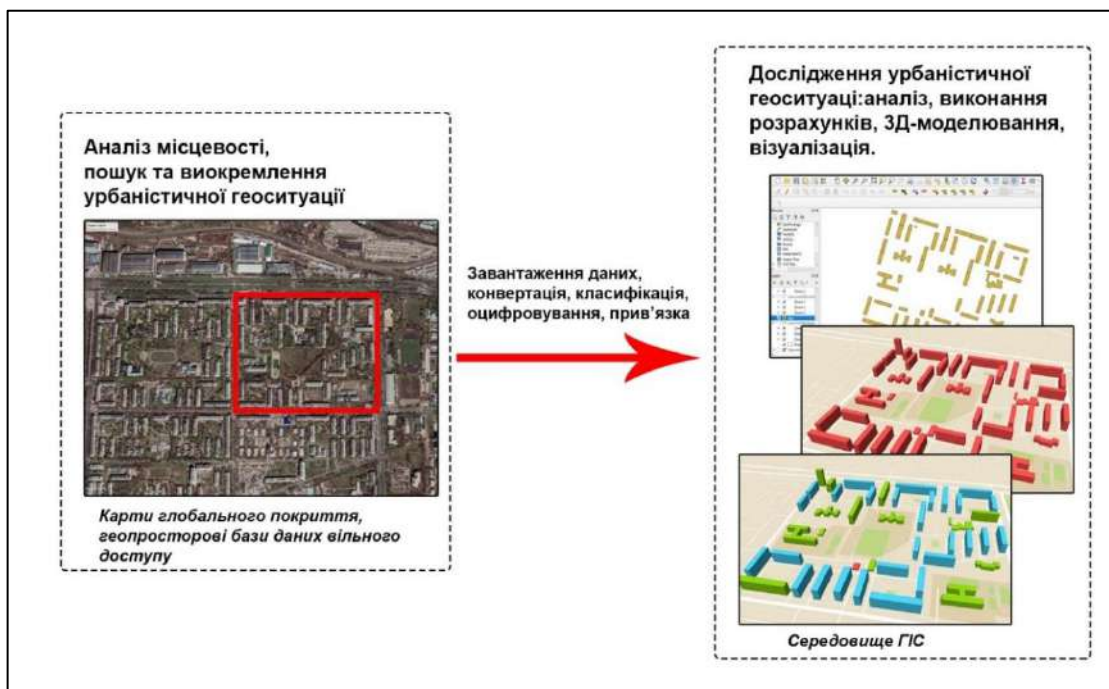


Рис. 2.3. Схема виокремлення та аналізу УГСит за допомогою онлайн-карт та ГІС [36].

Описані процедури виявлення та дослідження УГСит, серед іншого, можуть використовуватися для перевірки даних, перевірки моніторингових гіпотез, а також тестування різних експериментальних ГІС-інструментів.

Важливим кроком у розвитку сучасних ГІС-платформ є створення універсальної геоінформаційної системи, в яку будуть інтегровані всі, необхідні для міського дослідження, джерела даних. Це дозволить в єдиному геоінформаційному просторі виконувати пошук УГСит, потім відразу ж підтягувати всі необхідні за ними дані в систематизованому вигляді, і приступати до їх безпосереднього аналізу, минаючи рутинні процедури збору та передобробки даних. Для початку, такий додаток може бути розроблений для окремих міст у рамках програм їх цифровізації. В якості основи для його реалізації нами розглядається модель «Цифрове місто», яка буде розглянута в наступному розділі. Крім того, далі будуть розглянуті деякі авторські напрацювання подібної програми у вигляді веб-ГІС, що виконує обробку та тривимірну візуалізацію лідарних даних на базі карт глобального перегляду.

2.2. Побудова 3D-сутності «Цифрове Місто» як ключова передумова виокремлення та аналізу урбогеосистем.

В умовах високих темпів технологічного розвитку людства та супутньої інтенсифікації урбанізаційних процесів у розвинених країнах серед міського населення формується природний запит до комплексного впровадження новітніх технологічних розробок у життєдіяльність міста. Такий запит підкріплюється зростанням екологічної самосвідомості людства в останні десятиліття, а також всеосяжною участю інтернету у всіх видах діяльності людини та її повсякденному житті. Міста у свою чергу потребують оптимізації внутрішніх процесів та забезпечення сталого розвитку, що порушується численними проблемами соціально-економічного, демографічного, екологічного характеру. Такий стан речей викликає необхідність розробки універсальної концепції для загальної оптимізації міського функціонування та

підвищення ефективності управління містом через впровадження сучасних технологій [159]. У якості такої може бути розглянута та, що обрала популярність в останні десятиліття концепція. Йдеться про концепцію «Розумного міста».

Існує достатньо багато різних визначень поняття Розумного Міста. Усіх їх поєднує ідея інтеграції сучасних цифрових та інформаційних систем в управління міста з метою забезпечення комфортного проживання населення та сталого міського функціонування [75]. У широкому сенсі під розумним містом зазвичай мається на увазі місто з впровадженою модернізацією на шести взаємопов'язаних рівнях: суспільство, довкілля, управління, спосіб життя, мобільність та економіка [96].

У межах одного міста може різною мірою виявлятися прогрес у перелічених компонентах. Окремі компоненти можуть значно випереджати інші за рівнем розвитку, деякі навпаки значно відстають і цим роблять нерентабельними вкладення у розвиток інших компонентів. «Розумного міста» можна досягти тільки при загальному та одночасному розвитку всіх компонентів, а для цього насамперед має бути налагоджений процес збору, аналізу та систематизації даних в єдиній інформаційній системі, що забезпечує контроль та підтримку розвитку всієї міської системи на всіх її рівнях.

Описані вище процедури роботи з даними на шляху до реалізації Розумного міста найефективніше можуть бути реалізовані лише в його геопросторовій перспективі, оскільки для виконання аналізу та належного міського планування на основі зібраних даних повинен обов'язково враховуватися їх просторово-часовий контекст [118]. У такому контексті вся інформація має чітку прив'язку до локації та часу оновлення даних.

У геопросторовій перспективі впровадження Розумного міста обов'язково мають бути задіяні геоінформаційні системи, які забезпечують зберігання, аналіз та візуалізацію даних саме у просторово-часовому контексті. Крім того, у цій перспективі важлива роль у моніторингу стану міського середовища відведена системам міського ДЗЗ, які можуть

забезпечити комплексний збір різноманітних даних із географічною прив'язкою по всій території міста. Окремо слід виділити лідарну зйомку міської місцевості, яка надає високоякісні набори даних для класифікації міських об'єктів та тривимірного моделювання міського середовища.

Маючи в розпорядженні дані лідарної зйомки міста, що регулярно оновлюються, а також спеціальну ГІС-функціональність, що надає інструменти обробки, аналізу та тривимірної візуалізації можна отримати імітаційну модель певного міста. Створення такої моделі може стати відправною точкою практичної реалізації розумного міста.

Імітаційна модель міста при розробці додаткового кроссплатформенного програмного забезпечення, наповненого різним ГІС-функціоналом, що підтримує візуалізацію та управління такою моделлю, може бути перетворена на 3D-сутність «Цифрового міста». Під цифровим містом розуміється певний веб-ГІС додаток вільного доступу, що надає широкий набір функцій для введення, аналізу, обробки, виконання розрахунків, моделювання, візуалізації та виведення геопросторових даних. Центральним компонентом такого застосування має стати саме імітаційна модель міста, побудована на основі лідарних даних [17]. Цифрове місто має стати універсальною кроссплатформною міською географічною системою з інтегрованою геопросторовою базою даних. Така система має підтримувати численні користувацькі сценарії, актуальні для міського управління, проектування міського дизайну, проведення наукових досліджень, ведення бізнесу, а також для повсякденного використання.

Цифрове місто може бути проміжним орієнтиром для формування фундаментальної ідеї «Розумного міста», адже саме такий додаток здатний забезпечити загальну інтеграцію міських комунікацій, інформаційних технологій передачі даних та пристроїв інтернету речей у єдиному інформаційному просторі. Крім того, належним чином спроектоване Цифрове місто буде підтримувати ключові елементи концепції розумного міста в його геопросторовій перспективі, а саме: інновації, масштабованість, збір

вимірювання та аналіз просторових даних, вирішення екологічних проблем та взаємозв'язок між інформацією інтелектуальних лічильників та інформацією геосенсора (рис.2.4) [118].

Інновація є невід'ємним елементом проекту Цифрове місто, адже воно здатне підвищити ефективність міського моніторингу та вивести міські дослідження на принципово новий рівень, відкривши перспективи для поглиблення та деталізації таких досліджень [154]. Цифрове місто може об'єднати в собі низку рішень для міського управління та планування, для яких раніше потрібно було застосування окремих компонентів, наприклад: збір даних, їх перетворення та аналіз, які найчастіше виконували за участю трьох різних платформ, тепер будуть реалізовані в єдиному інформаційному просторі. Цифрове місто, яке саме по собі є інновацією, відкриває вікно можливостей, надаючи середовище для розробки та тестування інших інноваційних методів, інструментів, технологій, які так чи інакше застосовуються до імітаційної моделі міста.

Масштабованість цифрового міста проявляється в тому, що успішно реалізований подібний проект у конкретному місті, надалі може бути універсалізований та поширений в інших містах. Однак такі міста мають відповідати певним базовим вимогам для технічної реалізації цифрового міста, а саме: у місті мають бути забезпечені налагоджена інфраструктура інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) та регулярний збір даних системами ДЗЗ, зокрема за допомогою технології *LiDAR*. В умовах глобального технологічного розвитку людства, архітектура проекту «Цифрове місто» може бути уніфікована та застосовна спершу на регіональному рівні, а потім на національному та міжнародному [151].

У якості кінцевої точки розвитку цифрового міста в аспекті його масштабованості є єдина система, що надає карту глобального покриття та відповідну базу геопросторових даних, до якої будуть підключені дані цифрових міст та їх імітаційних моделей по всій земній кулі. Наявність такої уніфікованої системи дозволить міським дослідникам видобувати та

аналізувати УГС-властивості різних міст за допомогою моделей та інструментів цифрового міста, що надаються, потім виділяти спільні проблеми в різних містах та спільно розробляти стратегії їх вирішення.

Система цифрового міста передбачає спеціальні функції, що забезпечують одночасний збір, вимірювання та аналіз просторових міських даних, отриманих з різних джерел.

Збір даних для цифрового міста забезпечується системами міського ДЗЗ, що підтримують технологію *LiDAR*, а також іншими технологіями та методами зйомки міської місцевості. Зібрані таким чином дані мають регулярно оновлюватися для актуалізації міської обстановки. Іншим джерелом даних є системи міських датчиків, пов'язаних загальною мережею для безперервного автоматизованого збору даних про процеси, що протікають у місті, пов'язані з потоками людей, матеріалів, енергії та інформації [189]. Важливим є інтеграція даних із сторонніх інформаційних систем та баз даних, що містять геопросторові дані, наприклад, карт глобального покриття *OpenStreetMap* і *GoogleMaps*. Нарешті, має бути забезпечене користувацьке введення всіляких атрибутивних даних, які можуть бути присвоєні об'єктам цифрового міста.

Вимірювання та аналіз даних передбачає задіяння вбудованих функціональних можливостей, що забезпечують конвертацію, перетворення, аналіз та систематизацію даних, зібраних із згаданих раніше джерел. На основі отриманих первинних даних мають обчислюватись певні похідні дані, за якими розроблятимуться оптимізаційні рішення для максимізації ефективності функціонування міських інфраструктур, забезпечення всіма видами необхідних міських послуг, забезпечення екологічної безпеки та довгострокової стійкості життя мешканців розумних міст [120].

Окремо варто акцентувати увагу на лідарних даних, які відіграють визначальну роль у побудові базової моделі цифрового міста, що включає сукупність класифікованих, дискретних модельних сутностей міських об'єктів. До таких сутностей надалі будуть присвоюватися інші дані, отримані

з інших джерел збору даних, шляхом занесення їх у відповідні атрибутивні таблиці або шляхом винесення їх на окремі шари просторових даних у відповідній географічній проекції.

Важливим аспектом використання лідарних даних для побудови моделі цифрового міста є можливість їхньої автоматизованої класифікації, внаслідок якої об'єкти міста, скановані під час лідарної зйомки розподіляються за окремими тематичними класами, наприклад: будівлі, рослинність різного типу, інфраструктура [119]. Така властивість лідарних даних дозволяє здійснити оцифрування та інвентаризацію в цифровому місті всіх статичних міських об'єктів, що підлягають лідарній зйомці. Кожному об'єкту може бути присвоєно унікальний ідентифікатор, а також певний тег, що пов'язує його з іншими об'єктами, що належать до того ж типу об'єктів. Можливість автоматизованої класифікації лідарних даних вкотре підтверджує їхню визначальну роль у реалізації цифрового міста.

Для коректної обробки та аналізу зібраних даних має бути налагоджений *взаємозв'язок* насамперед між даними систем міського ДЗЗ та систем міських датчиків. Похідні дані цих систем мають бути синхронізовані та відображати цілісну картину міської обстановки у різних вимірах. Ключовою вимогою для здійснення згаданої цілісності є визначення всієї зібраної інформації у просторово-часовому контексті, що дозволить відстежувати динаміку різних взаємодій у міському просторі. Найбільш складним завданням у цьому аспекті є пошук оптимального рішення для коректного зведення та зіставлення різнорідних даних, що мають власну специфіку зберігання, обробки та візуалізації у середовищі цифрового міста [173].

Нарешті, цифрове місто може надати повноцінний геоінформаційний простір для дослідження та *вирішення екологічних проблем*. З урахуванням розглянутих раніше особливостей інтеграції різнорідних даних, можна очікувати, що цифрове місто стане оптимальним середовищем для систематизації та візуалізації даних, що є індикаторами екологічної обстановки у місті. Модель цифрового міста дозволяє не лише аналізувати

поточну екологічну ситуацію, а й дозволяє будувати прогнози подальшого розвитку ситуації на основі як реальних, так і емульованих даних за допомогою віртуальних експериментів [199]. Наприклад: на основі ЦМР може бути змодельована ситуація потенційного затоплення міста – отримана модель покаже потенційно небезпечні ділянки, до яких необхідно застосувати комплекс заходів для запобігання потенційним негативним наслідкам стихійного лиха.

Таким чином, за підтримки зазначених елементів геопросторової перспективи концепції Розумного міста проект «Цифрове місто» може стати центральним ядром цієї концепції, забезпечивши зв'язність всіх її ключових компонентів в єдиному цифровому просторі.



Рис.2.4. Ключові елементи концепції «Розумне місто», що впроваджуються проектом «Цифрове місто» (побудовано автором за [118]).

Для грамотної та послідовної розробки цифрового міста з його подальшою реалізацією йому необхідно визначити місце в концепції урбогеосистем, що є базовим теоретичним підходом у геопросторовій перспективі реалізації «Розумного міста». Саме такий підхід обраний для

побудови ефективного технологічного конвеєру для послідовної реалізації концепції розумного міста. З точки зору УГС-підходу, розумне місто – це місто, яке функціонує стійким та інтелектуальним чином, як система, що складається з низки підсистем [118].

У теоретичній площині УГС-підхід є центральною ланкою, яка об'єднує міське ДЗЗ з п'ятьма ключовими елементами розумного міста, описаними раніше. УГС також представлена урбогеосистемною онтологічною моделлю (УОМ), яка представляє триєдину схему тісно взаємопов'язаних компонентів: міські жителі, муніципальна інфраструктура та урбаністичні процеси та явища. Наділення цих компонентів інформаційно-комунікаційним зв'язком у сукупності забезпечить стійке функціонування міста відповідно до концепції «розумного міста» [44]. Цю зв'язність компонентів УОМ може забезпечити модель цифрового міста.

В рамках УГС-підходу, місто може бути представлене безперервною квазірастровою моделлю урбаністичного середовища, в якому міський простір обмежений різними поверхнями, і може бути представлений безпосередньо цими поверхнями. УГС ж є дискретною квазівекторною моделлю, що складається з двовимірних графічних примітивів, а також 3D-примітивів у тривимірному просторі, що відображають міський простір у формалізованому вигляді [124]. Цифрове місто, по суті, поєднує в єдиній ГІС-моделі квазірастрову модель урбаністичного середовища та квазівекторну модель урбогеосистеми. Урбаністичне середовище у такій моделі відображає фізичне середовище реального міста, а УГС – сукупність його елементарних складових елементів та просторових зв'язків між ними. З урахуванням сказаного вище ми можемо визначити розробку 3D-сутності цифрового міста, як ключову передумову виділення та аналізу УГС, і тим самим визначити місце цифрового міста в концепції УГС.

Таким чином, нами окреслені базові передумови та вимоги для розробки та впровадження проекту «Цифрове місто». За підтримки всіх перелічених у даному розділі елементів геопросторової перспективи Розумного міста, такий

проект може стати універсальною міською ГІС, яка забезпечує широку область користувацьких сценаріїв, що демонструють таку ефективність взаємодії користувача з системою, яка прямо відповідатиме рівню подібних взаємодій у Розумному місті в його сучасному представленні. Частина з таких сценаріїв користувача будуть наведені далі:

Відтворення віртуальних експериментів на основі тривимірної міської моделі з введеними тестовими даними, в ході яких можуть бути перевірені різні гіпотези про оптимізацію міського простору розумного міста, а також оцінено ризики потенційних стихійних лих та наслідки, які можуть бути ними спричинені [179]. Наприклад, раніше у роботі вже розглядався приклад такого експерименту, пов'язаний із потенційним затопленням міста.

Виявлення за допомогою тривимірної карти актуальних проблем у міській забудові та урбаністичних геоситуацій під час *аналізу існуючого планування*. Цифрове місто полегшує виконання подібних запитів за рахунок зручних інструментів навігації та візуального аналізу.

За допомогою цифрової моделі міста та відповідних інструментів атрибутивної вибірки можна *виявити релевантні будинки* в місті на основі заданих параметрів [29]. Така функціональність може бути використана для пошуку оптимальних будівель для розміщення сонячних батарей на основі таких базових критеріїв, як: площа будівлі, поверховість, тип даху, тощо. У свою чергу, за допомогою аналізу сонячного випромінювання спеціальними інструментами, програма зможе визначити будинки з найбільшим потенціалом для виробництва сонячної енергії, які є найбільш придатними для встановлення сонячних панелей. Надалі такий аналіз допоможе відслідковувати рівень щоденної електроенергії, що виробляється і споживається, і на основі отриманих даних розробляти рішення для економії енергії та витрат.

Відстеження змін у забудові за рахунок регулярного проведення лідарної зйомки та відповідного оновлення даних. Зміни у 3D моделі цифрового міста протікатимуть у динамічній площині синхронно із змінами у

реальному місті. Однак на модельному аналозі такі зміни набагато простіше відстежити та зафіксувати їх об'єм за допомогою автоматизованих процесів. Крім того, у цифровому місті може бути підтримана архівна база даних, в якій зберігатимуться попередні версії моделей міста, отримані з попередніх ітерацій лідарної зйомки. Архівні моделі можна буде візуалізувати для дослідження міського розвитку в його ретроспективі [37].

Використання моделі у якості інтелектуальної карти *для навігації* у міському просторі. Насамперед такий сценарій актуальний для апаратів зі штучним інтелектом. Наприклад, у безпілотних автомобілях або літаючих апаратах можуть бути запрограмовані маршрути саме у цифровому місті, яке може надати простір для побудови оптимального маршруту з точки А в точку Б, який буде огинати статичні міські об'єкти. Але така навігація також актуальна і для мешканців міста та туристів, які будь-якої миті можуть звернутися до цифрової моделі для кращого орієнтування на місцевості.

Використання моделі для планування урбаністських проєктів з точки зору *міського дизайну* та оцінки поєднання потенційних проєктів з існуючою міською обстановкою. Таким чином, модель може використовуватися у вигляді чистого полотна для різних дизайнерів і архітекторів, які можуть втілювати на ньому свої творчі ідеї та презентувати їх публіці, а згодом реалізовувати їх на місцевості.

Використання цифрової моделі міста для демонстрації міського простору для *туристичних цілей*. Крім того, що тривимірна міська модель може суттєво полегшити орієнтування у незнайомому місті, така модель може також послужити для оцінки міста потенційними туристами та привернення їхньої уваги.

Впровадження на основі цифрового міста *автоматичного 3D-кадастру* для реєстрації нерухомості, включаючи вертикальне володіння в будинках, що належать різним власникам, та підземну інфраструктуру [118]. Для таких цілей у цифровому місті може бути розроблений спеціальний модуль для систематизації даних про зареєстровані об'єкти.

Таким чином, коректно спроектований додаток із цифровим містом може знайти попит у багатьох прикладних застосуваннях. На ранньому етапі розробки цифрове місто може бути реалізовано у вигляді веб-ГІС, що надає інструменти обробки лідарних даних та їх візуалізації у вигляді тривимірної імітаційної моделі із супутніми ключовими елементами стандартного ГІС-інтерфейсу та базовими інструментами аналізу. Подальше наповнення такої програми різномірними функціональними можливостями, описаними в цьому розділі, наблизатиме його до кінцевої реалізації проекту. У наступних підрозділах йтиметься про авторські напрацювання базових функціональних процедур для побудови цифрового міста.

2.3. Методика та функціональні процедури побудови 3D-сутності «Цифрове Місто» на підставі обробки лідарних даних.

Для базової реалізації проекту «Цифрове місто» нами пропонується оригінальний багатофункціональний підхід, що базується на обробці лідарних даних та візуалізації результатів такої обробки у 3D-сцені у вигляді тривимірних моделей будівель різного ступеня деталізації та ЦМР. Для реалізації цього підходу, нами розроблявся спеціалізований веб-ГІС додаток *EOS LiDAR Tool (ELiT)*, в якому були впроваджені різні інструменти аналізу та моделювання лідарних даних, засновані на численних алгоритмах, пов'язаних із класифікацією, фільтрацією, кластеризацією та сегментацією хмари точок. Така сукупність алгоритмів необхідна для коректного виокремлення з хмари точок цільових об'єктів для моделювання та надійної автоматизації цього процесу.

Ключові можливості нашого підходу ґрунтуються на трьох функціональних блоках [34, 125]:

- виокремлення будівель з хмари лідарних точок, яке в свою чергу ґрунтується на двох різних підходах до моделювання будівель:

високополігональне (ВП) моделювання та низькополігональне (НП) моделювання будівель;

- відстеження часових змін в архітектурній морфології міста на основі порівняння двох наборів лідарних даних, що покривають одну й ту саму територію в різний час;
- генерація урбанізованого рельєфу у межах географічного екстену міста за рахунок цифрового моделювання хмари точок.

У середовищі *ELiT* описані функціональності реалізовані у вигляді відповідних інструментів, які на вхід приймають файли лідарних даних формату *LAS/LAZ* – ці дані мають бути зібрані саме шляхом повітряної лідарної зйомки, а не наземної, також для окремих інструментів може знадобитися введення додаткових допоміжних даних формату *SHP*. Обов'язковою вимогою до лідарних даних є наявність коректної географічної проекції, записаної в метаданих *LAS*-файлів. Візуалізація результатів обробки даних виконується у 3D-сцені, розробленій на основі *JavaScript* бібліотеки *Cesium*.

Виокремлення будівель є центральною функціональністю нашого підходу при побудові цифрового міста, оскільки модель міської забудови, що формується окремими дискретними моделями будівель, є обов'язковим елементом при будь-яких міських дослідженнях і використовується у всіх сценаріях користувача, які будуть розглянуті в наступних розділах. Крім того, описані в цьому підрозділі функціональні аспекти також частково застосовні для двох інших функціональних блоків: відстеження змін та генерації урбанізованого рельєфу. Таким чином, надійна розробка функціональності вилучення будівель є визначальною для розвитку всього проекту.

Виокремлення будівель зав'язане на трьох ключових процедурах: аналіз хмари точок з метою пошуку тих точок, що належать до будівель, відокремлення цих точок від інших точок хмари та моделювання будівель за відповідними виокремленими точками. Визначальними факторами, що впливають на успішність виконання зазначених процедур є якість зібраних

лідарних даних та їх репрезентативність. Під якістю розуміється насамперед оптимальна щільність точок і відсутність у точках будь-яких перешкод, зумовлених несприятливими погодними умовами під час виконання зйомки, наприклад, відсутність калюж на дахах будівель, які не пропускають лазерні промені сканера та утворюють прогалини у хмарі точок [34]. Під репрезентативністю розуміється відкритість та доступність точок будівель для їх коректного виокремлення з хмари – іноді таке виокремлення може бути суттєво ускладнене через наявність дерев, що нависають над низькими будинками. Древа не просто перешкоджають виокремленню точок будівель, вони перешкоджають самому одержанню цих точок при виконанні лідарної зйомки. Тому навіть за наявності високоякісних даних, зібраних в ідеальних погодних умовах, виокремлення будівель може бути неповноцінним.

З урахуванням вищесказаного, функціональність виокремлення та моделювання будівель має бути оптимізована залежно від особливостей наявних даних. Існує безліч підходів до обробки лідарних даних, які можуть призвести до різних результатів моделювання залежно від пріоритету швидкості моделювання або якості одержуваних моделей. Зі зниженням щільності точок знижується деталізація моделей, але підвищується швидкість обробки даних, що може бути важливим при великій кількості будівель [140]. На вибір оптимального підходу до моделювання будівель також впливає неоднорідність міської забудови, що складається з безлічі конфігурацій будівель, що відрізняються своїми розмірами та складністю архітектури. Для моделювання великих будівель зі складною архітектурою пріоритет зазвичай приділяється високій деталізації моделей, але для численних шаблонних малоповерхових будівель з примітивною архітектурою такий вибір є недоцільним.

Двома ключовими типами зазначених міських конфігурацій є висотна забудова центральних міських районів з одного боку, і малоповерхова забудова міських передмість/окраїн та прилеглих сільських територій, з іншого [121]. Для двох цих конфігурацій нами передбачено дві різні методики

для виокремлення та моделювання будівель: ВП-моделювання, що переважно застосовується до висотних забудов зі складною архітектурою, та НП-моделювання, що застосовується до простих малоповерхових будівель (рис.2.5). Перша методика зосереджена на високій деталізації моделей та вимоглива до якості лідарних даних. Її процедури обробки даних засновані насамперед на класифікації лідарних точок. Друга методика зосереджена на узагальненні архітектурних властивостей будівель зі збереженням ключових геометричних параметрів, а також є менш вимогливою до якості даних, але більш вимоглива до згадуваної раніше репрезентативності даних [116]. Процедури цієї методики засновані на сегментації хмари точок за допомогою кластеризації площин.



Рис. 2.5. Порівняння результатів ВП- та НП-моделювання будівель на підставі обробки лідарних даних.

2.3.1. Виокремлення та високополігональне моделювання будівель.

Високополігональне моделювання нами реалізовано через функціональність *Building Extraction*. Даний підхід до моделювання передбачає генерацію моделей будівель, що складається з багатьох багатогранників. Що вища щільність лідарних точок, то більше полігонів матиме вихідна модель, зі збереженням найдрібніших архітектурних деталей будівлі. Набори з низькою щільністю точок подібну інформацію не передають, тому для них краще виконати НП-моделювання.

Загальний процес створення ВП-моделей відбувається через 7 ключових алгоритмічних блоків: передобробка даних, фільтрація земних та неземних точок, розмічання футпринтів будівель, реконструкція футпринтів, моделювання зовнішніх стін, реконструкція даху будівлі, візуалізація.

Передобробка лідарних даних є обов'язковим блоком будь-якої функціональності, представленої в цьому розділі. На цьому етапі може проводитися оцінка місцевості, що моделюється, в результаті якої визначається доцільність того чи іншого методу моделювання, а також оцінка щільності точок. Оптимальні значення щільності точок становлять від 5 до 140 точок на м² [122]. До даних із надмірним рівнем щільності можуть бути застосовані процедури проріджування точок, що істотно заощаджує ресурси на їхню обробку. Якщо точки *LAS*-файлу мають власну класифікацію, то з них заздалегідь можуть бути відфільтровані точки що не відносяться до будівель за відповідними значенням класу. Додатково також перевіряється просторова прив'язка *LAS*-файлів, яка за потреби може перепроєктована. Усі ці операції передобробки лідарних даних можуть бути виконані за допомогою інструментів *LASTools* [130].

Для деяких інструментів обробки лідарних даних мають бути підготовлені допоміжні *SHP*-файли, які можна експортувати зі сторонніх геопросторових баз даних, наприклад *OpenStreetMap*. Футпринти описують 2D-контури будівель та при коректному накладенні на хмару точок відповідної місцевості, вони можуть сприяти коректному визначенню та виокремленню будівель, але для цього їм також має бути призначена коректна географічна проекція.

Безпосередня обробка лідарних даних з метою виокремлення будівель починається з відокремлення земних і неземних точок [177]. Для визначення точок землі *LAS*-файл може бути розбитий на безліч ділянок однакової площі, у кожному з яких у якості земних точок виділяються ті точки, які розташовані нижче заданого порогового значення висоти. Крім того, фільтрація неземних точок може бути виконана за допомогою побудови *TIN*-моделі, з якої

виокремлюються точки і ребра, що мають більші за порогове значення довжини та вертикального ухилу Зрештою, на цьому етапі, по земних точках генерується сітка з прогалинами у ділянках концентрації неземних точок. За окресленими прогалинами надалі визначати попередні контури будівель.

Після відокремлення земних точок, всі залишені точки утворюють безліч кластерів точок, що належать до різних об'єктів місцевості. Найчастіше такі кластери належать до будівель та дерев. Точки дерев можуть бути відфільтровані за низькими значенням щільності пологуг. Оцінюється компланарність точок через тріангуляцію Делоне – ті точки, які не утворюють топологічно коректні площини, також фільтруються як дерева [178]. Додатково точки дерев фільтруються на етапі виділення футпринтів будівель.

Висока концентрація дерев навколо будівель може мати неприємні наслідки при подальшому моделюванні та візуалізації будівель. Відфільтровані точки дерев з густими кронами, які перекривають будівлі, можуть утворити прогалини в точках дахів будівель, через що побудовані моделі будуть суттєво спотворені навіть при залученні сторонніх футпринтів з точними контурами будівель. ВП-моделювання, на поточному етапі його розробки, не передбачає відновлення втрачених точок будівель. Саме тому цей підхід до моделювання доцільно застосовувати для високоповерхової забудови, де ймовірність подібних спотворень мінімальна.

Розмічання футпринтів будівель проходить у два етапи: визначення попередніх футпринтів з існуючих прогалин сітки та подальше вилучення остаточних футпринтів.

Для отримання попередніх футпринтів у наявній сітці виконується розширення комірок, які відносяться до земної поверхні для коректного розмежування щільно розміщених будівель [34]. В результаті утворюється сукупність відмежованих прогалин у сітці, з яких додатково фільтруються ті, що мають площу нижче порогового значення. Залишені прогалини окреслюють межі попередніх футпринтів будівель.

Для отримання остаточних футпринтів додатково фільтруються точки з висотою нижче 2 м над землею. За рештою точок будується *TIN*-модель з якої всі сегменти, площа яких перевищує мінімальне значення контуру будівлі відносяться до футпринтів будівель. Футпринти додатково згладжуються шляхом видалення з триангуляційної мережі вертикальних ребер з горизонтальним нахилом більше заданого порогу, а також сегментів з меншою площею порогового значення мінімальної площі будівель. Потім знову будується триангуляційна мережа, з неї видаляються вертикальні ребра з довжиною, що перевищує граничне значення мінімального розміру стіни. В якості остаточних футпринтів додатково визначаються ті сегменти мережі, сукупна площа яких перевищує порогове значення мінімальної площі будівлі. В результаті виконаних на даному етапі процедур фільтрації для деяких футпринтів можуть бути помилково обрізані частини будівель, що нависають над землею, тому застосовується розширення футпринтів для прийняття тих точок, які прилягають до футпринту на відстані менше заданого порогового значення. На останньому етапі розмітки додатково фільтруються ті футпринти, які не перетинаються з екстентом відповідних попередніх футпринтів, що є необхідним для запобігання потенційним топологічним помилкам.

Усі футпринти, що залишилися після даної процедури, можуть бути додатково оброблені і реконструйовані у вигляді чотирикутників, прямокутників і правильних багатокутників.

За футпринтами будівель далі моделюються стіни до висоти сконцентрованих точок дахів будівель, які також реконструюються суто в межах окреслених футпринтів. Для моделювання стін можуть бути залучені дані лідарної наземної зйомки, які можуть детально окреслювати фасади будівель. Однак комбінування таких даних із основною хмарою точок виконується вже після реконструкції даху будівлі [125].

Реконструкція дахів виконується шляхом призматичного моделювання для будівель з плоскими дахами, або шляхом багатогранного моделювання для

будівель зі складними дахами. При цьому призматичне моделювання менш вимогливе до щільності точок, ніж багатогранне, оскільки плоским дахам зазвичай не властиві складні архітектурні споруди, що потребують деталізації. Багатогранне моделювання особливо чутливе до щільності точок: якщо щільність низька, то при реконструкції дахів можуть упускатися важливі споруди будівель, наприклад горищні вікна та витончені вежі, якщо ж щільність занадто висока – то разом з точками дахів може виділитися безліч шумових точок, які спотворюють архітектурну форми будівлі. Тому для додаткового уточнення та згладжування дахів будівель нами передбачено використання методу триангуляції Делоне [178]. За цим методом наявні моделі будівель вирівнюються та уточнюються шляхом додавання нових вершин у тих ділянках, які потребують додаткового згладжування. Таким чином утворюються кінцеві варіанти моделей будівель.

Візуалізація основних зазначених процедур обробки лідарної хмари точок наведена на рис.2.6.

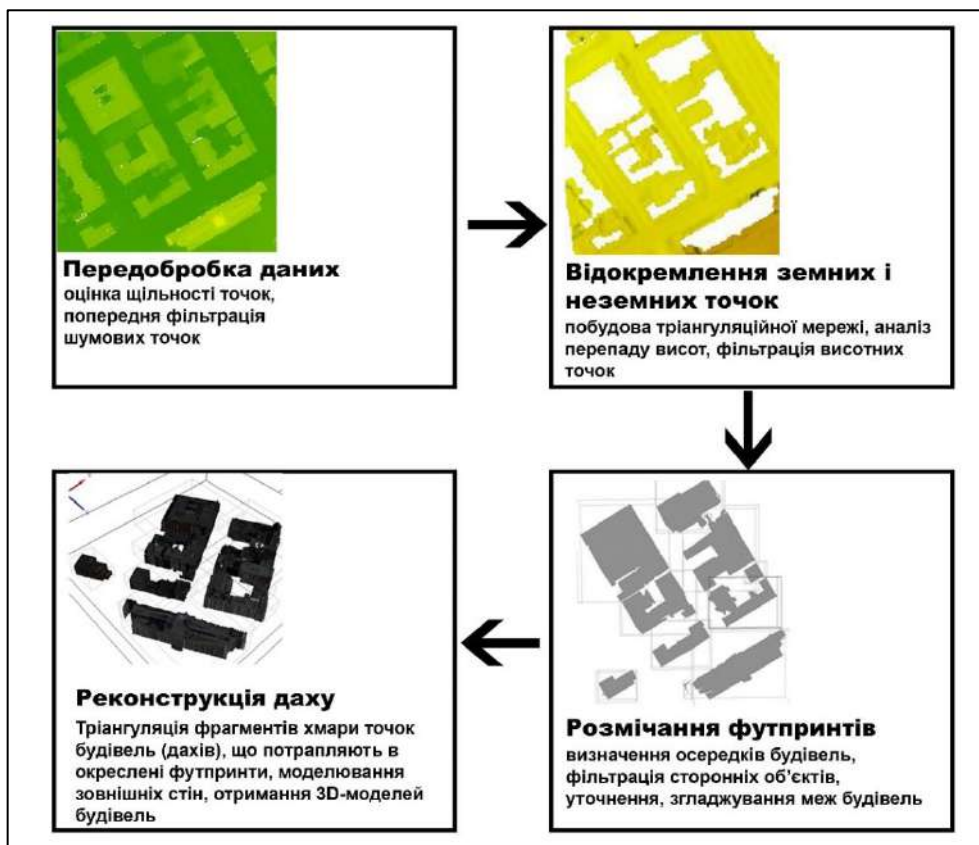


Рис.2.6. Послідовність процедур обробки лідарних даних в рамках ВП-моделювання будівель.

Підсумкові моделі будівель можуть бути перетворені на формат *B3DM* для їх передачі та візуалізації у веб-інтерфейсі, що є ключовими вимогами для реалізації цифрового міста. Ще одним форматом збереження моделей є *OBJ*, який є типовим форматом для зберігання *3D* геометрії і може бути імпортований до будь-яких програм для обробки *3D* графіки, а також подано на друк у *3D*-принтері [31].

Нами передбачено збереження та візуалізація моделей у трьох рівнях деталізації (*Level of Detail – LOD*). *LOD0* містить двовимірні контури будівель – їх проекції на площину; *LOD1* містить пірамідальну модель – сукупність накладених один на одного площин, що становлять узагальнені контури моделі; *LOD2* містить багатогранну, найбільш деталізовану модель, що пройшла всі описані процедури реконструкції та згладжування. Крім того, разом з моделями може бути додатково побудована та візуалізована ЦМР, яка дозволить відстежити перепади висот між будівлями у міській забудові, а також наводиться вихідна хмара точок, що надає можливість звірити результати моделювання.

За наявності додаткових даних може бути реалізований метарівень деталізації, що представляє модель, покриту відповідною їй текстурою. Текстурування моделей найбільш доцільно для моделей побудованих шляхом комбінування даних повітряної та наземної лідарної зйомки. За рахунок високої деталізації побудованих моделей текстуру можна легко синхронізувати з моделями відповідно до всіх архітектурних елементів будівель [121].

Таким чином, отримується набір деталізованих тривимірних моделей будівель, що мають просторову прив'язку до місцевості та можуть бути певним чином оцифровані у ГІС-середовищі. Висока якість таких моделей забезпечується шляхом задоволення двох основних факторів: наявності оптимальної щільності точок, що дозволяє виокремити модель у прийнятному ступені деталізації, та відсутності перешкод у хмарі точок, що заважають

коректній реконструкції моделей. Сукупна попередня візуалізація результатів у спеціальній 3D-сцені дозволяє візуально оцінити якість побудованих моделей, і за задовільної оцінки моделі можуть бути впроваджені як компоненти цифрового міста. Якщо ж якість моделей неприйнятна для такого впровадження, то для вихідних даних може бути застосовано НП-моделювання, засноване на інших принципах обробки хмари точок.

2.3.2. Виокремлення та низькополігональне моделювання будівель.

Низькополігональне моделювання, на відміну від описаного раніше високолігонального, зосереджено не на деталізації моделей будівель, а на їх спрощенні та узагальненні. Ціль такого підходу до моделювання – зберегти найважливіші архітектурні властивості будівлі з використанням мінімальної кількості граней. Для безлічі сценаріїв користувача від моделей будівель потрібні перш за все їх загальна форма, а також точні геометричні дані, при цьому різні архітектурні тонкощі інтересу не представляють. Найчастіше такі сценарії відносяться до малоповерхової житлової забудови [121]. Такий запит до моделювання задовольняється за допомогою тих підходів та алгоритмічних процедур, які нами були реалізовані у функціональності *Building Extraction Rural Area (BERA)*. Перевагою даної функціональності є те, що в рамках тих завдань, які перед нею ставляться, вона здатна обробляти та надавати прийнятні моделі будівель навіть із проблемних наборів лідарних даних з високою щільністю точок та з наявністю незначних перешкод у хмарі точок.

НП-моделювання засноване на аналізі хмари точок потенційної будівлі з метою визначення в ній оптимальних площин, які найточніше описують дах будівлі. У ході аналізу виконується безліч алгоритмічних процедур, які вираховують компланарність точок, визначають їхнє відношення до тієї чи іншої площини даху, відсівають шумові точки і визначають суміжність площин. Деякі з процедур можуть проходити через кілька ітерацій для отримання більш надійного результату.

Згадана функціональність *BERA* зосереджена виключно на моделюванні дахів, тому в ній використовуються тільки дані з лідарної повітряної зйомки. Крім того, пропускається процедура поділу земних та неземних точок, оскільки будівлі моделюються з використанням поданих на вхід футпринтів, які задають межі екстену моделювання [38]. Наявність футпринтів є важливими вимогами для даного методу моделювання та їх підготовка є обов'язковою на етапі передобробки даних. Інструмент *BERA* виокремлює стільки моделей, скільки футпринтів міститься в поданому *SHP*-файлі. Якщо для деяких, зафіксованих у хмарі точок, будинків відсутні футпринти – ці будівлі будуть пропущені під час моделювання, тому перед запуском розрахунків необхідно ретельно перевірити наявні футпринти та переконатися, що їхня кількість відповідає очікуваній кількості моделей. Потенційно, за відсутності будь-яких сторонніх футпринтів – до цієї функціональності можуть бути залучені ті футпринти, які виокремлюються при описаному раніше вискополігональному моделюванні.

Нами реалізовано кілька підходів до НП-моделювання, у кожному з яких задіяні свої власні алгоритми сегментації та кластеризації хмари точок, а саме: *SaS*-підхід (назва скорочена відповідно до імен його авторів: *Sampath and Shan*), *RANSAC* (*RANdom SAmples Consensus*) та *PolyFit*, що модифікує алгоритм *RANSAC* [174, 175, 156]. Дані підходи реалізовані у функціональності *BERA* у вигляді її окремих модифікацій. Кожен з них має свої переваги та недоліки, що стосуються насамперед швидкості обробки даних та якості побудованих моделей. Успішність моделювання за допомогою того чи іншого методу також залежить від місцевості та складності дахів будівель. Додаткові нюанси та складності обробки даних за кожним з підходів будуть розглянуті далі в цьому розділі.

Алгоритм *SaS* заснований на застосуванні аналізу власних значень для всіх точок, що відносяться до передбачуваного даху будівлі, з метою визначення їх приналежності до площин дахів, і подальшої кластеризації і сегментації по відповідних площинах [174].

Аналіз власних значень передбачає застосування Діаграми Вороного для розмежування точок відповідними полігонами Вороного. Кожен із полігонів Вороного обмежує область простору навколо вихідної точки хмари таким чином, що кожна умовна точка в цій області буде ближчою до вихідної точки, ніж до будь-якої іншої точки хмари [176]. Якщо точка з відповідним полігоном оточена такими ж полігонами інших точок – це означає, що вона відноситься до площини. Якщо точка не має подібних сусідніх полігонів – значить вона відноситься або до шумових точок, або до не плоских елементів даху, наприклад до ребер, які поділяють площини. Таким чином, всі точки поділяються на двовимірні, що належать до площин і тривимірні, що не належать до площин (рис.2.7). Для наступної процедури з хмари точок витягуються всі двовимірні точки.

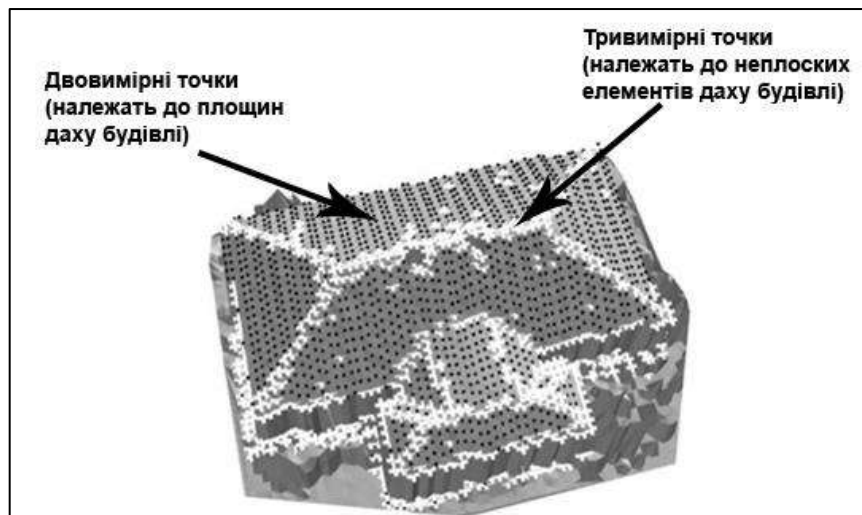


Рис.2.7. Поділ точок даху будівлі на двовимірні та тривимірні точки (побудовано автором за [174]).

До виокремлених двовимірних точок далі застосовується процедура кластеризації методом k -середніх з урахуванням геометричних відстаней точок до центру кластерів, а також з урахуванням їхньої топологічної ваги, тобто, розмірності, розрахованої на попередньому етапі [111]. Ця кластеризація полягає в розбитті всіх наявних точок на кластери таким чином, щоб кожна точка в кластері була ближчою до центру цього кластера, ніж до інших кластерів. У якості центральних точок кластерів, шляхом ітеративних

перерахунків, обираються точки з найбільшим потенціалом, тобто, з найбільшою ймовірністю стати центром кластера за заданою метрикою. За умови коректного покриття точок з достатньою щільністю, кожен утворений на даному етапі кластер точок відповідатиме окремому схилу даху – його окремій площини.

Наступним етапом моделювання даху є поділ отриманих раніше площин на окремі компланарні та паралельні сегменти за допомогою алгоритму щільності кластеризації та аналізу зв'язності. На цьому етапі створюються лінійні об'єкти, що розмежовують окремі площини даху, з використанням точок переривання – точок, які були позначені як тривимірні в результаті аналізу власних значень на одному з попередніх етапів. В окремих випадках може виникнути проблема з недостатньою кількістю точок переривання для поділу площин, так як потенційні тривимірні точки могли бути помилково класифіковані як двовимірні через дуже пологі схили даху і відповідно розмиті грані між ними, – у таких випадках площини можуть не розділитися, і в результаті підсумкова модель матиме плоский дах; і навпаки, через надлишок точок переривання, до яких можуть помилково класифіковані шумові точки, коректний поділ площин також може бути порушено і підсумкова модель буде некоректною [34]. У разі оптимальної кількості точок переривання, з хмари точок мають бути виділені паралельні та компланарні сегменти даху, що є конструктивними елементами для подальших етапів моделювання.

На основі отриманих на попередньому етапі паралельних та компланарних сегментів виконується процедура реконструкції даху будівлі, мета якої полягає у визначенні найбільш точної форми даху за наявними сегментами та об'єднання цих сегментів у топологічно коректну форму. Для правильного визначення зв'язності та перетину сегментів даху на даному етапі формується матриця суміжності, що містить інформацію про взаємне розташування та примикання вершин і площин.

Тут нами пропонуються власна модифікація даного *SaS*-підходу, яка полягає у застосуванні діаграм Вороного для оптимізації визначення

суміжності плоских сегментів даху. Спочатку в *SaS*-алгоритмі суміжність визначалася шляхом обчислення відстаней між усіма можливими комбінаціями точок двох сусідніх площин, в результаті чого для встановлення суміжності вибиралися пари точок з мінімальними відстанями одна від одної, якщо ця відстань не перевищувала певного граничного значення. Однак, у разі недостатньо щільного набору точок, згруповані на даному етапі точки можуть бути суттєво віддалені одна від одної і перевищувати граничне значення, що призводить до помилкового визначення суміжності та неправильної реконструкції даху [197]. Саме для вирішення подібної проблеми пропонується побудувати діаграму Вороного за наявними точками..

При побудові полігонів Вороного, навіть у двох віддалених точок між їхніми полігонами будуть спільні ребра, якщо між ними немає інших проміжних точок. Таким чином, у якості суміжні можна визначити лише ті точки, полігони яких мають спільні ребра. Якщо ж між такими точками є проміжні точки, то, відповідно, вони не матимуть сусідніх полігонів Вороного, а отже ці точки, і відповідні сегменти не примикаються. Використання такого підходу може суттєво підвищити ймовірність коректної реконструкції даху при обробці даних з низькою щільністю точок та нерівномірним їх розподілом. Більш того, описана заміна визначення суміжності по відстані між точками на її визначення по діаграмі Вороного дозволяє обробляти й інші проблемні випадки в хмарі точок, наприклад, коли через наявність різних перешкод на даху, в її точковій хмарі утворюється прогалина, яка розбиває точки одного кластера на два сегменти. Застосовуючи діаграму Вороного, ми можемо замикати такі прогалини та перетворювати два сегменти на єдину площину даху.

Нарешті, діаграми Вороного дозволяють визначити та змодельовати внутрішні стіни будівлі зі складним дахом. Під внутрішньою стіною мається на увазі стіна, яка утворюється між площинами основного даху та площинами навісу або прибудови будівлі, розташованими нижче за висотою – у хмарі точок через такий перепад висот утворюється розрив, який обов'язково має

бути закритий для досягнення топологічно коректної форми будівлі. Для заповнення цього розриву необхідно обчислити перепади висот між точковими кластерами основного даху та кластерами прибудови, а потім по межах цих кластерів відстежити всі ребра полігонів Вороного, що розділяють точки зі значним перепадом висоти [197]. По цих ребрах генерується набір безперервних ліній, які утворюють потім плоскі сегменти стін.

Таким чином, на етапі реконструкції даху за допомогою діаграм Вороного визначається суміжність усіх внутрішніх вершин та площин даху будівлі, які згодом з'єднуються у топологічно коректній формі. Зовнішні стіни визначаються футпринтами будівель, які витягуються до висоти хмари точок передбачуваного даху, а потім замикаються з площинами даху. Для забезпечення коректної топології вихідних моделей до них додатково застосовується регулювання границь, заснована на множинних паралельних і перпендикулярних парах ліній.

У разі невдалої реконструкції даху, спричиненою її складною, неоднорідною формою, низькою щільністю точок або великою кількістю перешкод, вона може бути виокремлена у вигляді єдиної площини, а сама модель будівлі матиме призматичну форму. Якщо ж всі процедури проходять успішно, то на виході має вийти адекватна, узагальнена модель, що зберігає всі ключові геометричні властивості відповідної реальної будівлі. Побудована таким чином модель повністю відповідає стандартам *CityGML*.

В цілому, описаний алгоритм *SaS*, з впровадженою модифікацією, забезпечує прийнятний показник коректно змодельованих малоповерхових будівель і може бути прийнятий як основна опція для НП-моделювання. Алгоритм демонструє порівняно високу швидкість обробки даних, проте може бути вимогливим до оптимізованих наборів даних, позбавлених різних перешкод і викидів, що перешкоджають коректній кластеризації та сегментації дахів. У разі невдалої обробки хмари точок описаним алгоритмом, у якості альтернативи може бути обраний алгоритм *RANSAC*, який може

показати кращий результат моделювання, але зайняти значно більше часу на обробку.

Алгоритм *RANSAC* у його класичному розумінні заснований на аналізі вихідної хмари точок та пошуку в ній такої сукупності точок, яка найкраще визначає площину передбачуваного даху. Обробка даних може проходити через кілька ітерацій, щоразу перерозподіляючи комбінації обраних точок для однозначного визначення їх оптимального набору [90]. Такий класичний варіант укладений у строгих математичних рамках, і здатний отримувати високий відсоток якісних моделей на ідеальних наборах даних з високою щільністю точок та мінімальними перешкодами. Однак, при обробці даних з розрідженими точками, з неоднорідними поверхнями і складними дахами такий підхід не здатний забезпечити належну гнучкість моделювання, що призводить до великої кількості грубих і неточних моделей на виході.

Згодом було розроблено оптимізований алгоритм *RANSAC*, який суттєво розширював спектр можливих комбінацій вилучених моделей. Зокрема, змінювалося уявлення про площину даху, яка в класичному *RANSAC* представлялася єдиною поверхнею, на якій у всіх напрямках може лежати пряма лінія, тоді як оптимізованому варіанті площина являла собою певний шар зосереджених точок між двома паралельними площинами [190]. Отже, у першому випадку для визначення площини вибиралася одна строга поверхня, тоді як у другому – сукупність можливих поверхонь у межах заданого діапазону, що значно підвищувало варіативність моделювання.

У якості другої опції НП-моделювання нами обрано саме оптимізований варіант *RANSAC* з додатковими нашими удосконаленнями параметрів вибору площин даху.

Як уже зазначалося, *RANSAC* зосереджений на пошуку найкращої площини-кандидата за наявними точками. Спочатку такий пошук здійснюється шляхом вибору в межах заданої околиці трьох випадкових точок та подальшої оцінки площини-кандидата по цих точках. Для більш надійного

визначення площини може додатково встановлено нижнє порогове значення площі трикутника, утвореного обраними точками.

Для оцінки обраних площин-кандидатів та їх коригування вводиться індекс найкращої поточної площини-кандидата (ІНППК). Значення даного індексу визначається як кількість сконцентрованих точок в околиці потенційної площини за вирахуванням точок, що знаходяться за заданим порогом дисперсії [175]. Таким чином, що менше розсіювання точок від виявленої площини, то вище її якісне значення площини-кандидата. Завдяки цьому при вилученні площин пріоритет віддається найбільш наближеним кандидатам, які найімовірніше відносяться саме до плоских елементів даху, навіть якщо вони відповідають порівняно невеликому кластеру точок.

Описана процедура може складатися з безлічі ітерацій, кількість яких залежить від заданого порогу величини ІНППК, загальної кількості лідарних точок, що задіяні, і кількості завершених спроб. Якщо після проходження певного числа ітерацій прийнятна площина не знаходиться, для подальшого пошуку може бути застосовано зниження порогового значення ІНППК, в результаті чого по точках, що залишилися, можуть бути знайдені певні площини, що відповідають мінімальним вимогам. Така оптимізація допомагає коректно витягувати дахи будівлі навіть із порівняно великою кількістю шумових точок [191]. Однак надмірне зниження вимог збільшує ймовірність різних геометричних невідповідностей між виокремленими моделями та відповідними ним реальними будинками, тому для значення ІНППК має бути встановлений певний нижній поріг, після якого точки вже не повинні прийматися та ітеративний розрахунок має перерватися.

Після отримання попередніх площин даху та їхнього додаткового корегування будується матриця суміжності сегментованих площин даху, суть якої вже була описана для алгоритму *SaS*. Це заключний етап реконструкції даху будівлі за допомогою *RANSAC*, в результаті якого за футпринтом будівлі витягується його НП-модель. Якщо ж у ході низки ітерацій були визначені

відповідні площини для моделювання даху, будинок буде змодельовано у призматичної формі.

Таким чином, оптимізований алгоритм *RANSAC*, на відміну від його класичного варіанту, більш адаптований до моделювання реально існуючих дахів, які можуть мати широке різноманіття конфігурацій розподілу скатів, а також деякі невідповідності ідеальним математичним формам [191]. Крім того, такий підхід більш ефективний при обробці даних з різними перешкодами у хмарі точок, що перешкоджають коректному розпізнаванню геометрії дахів. Оптимізація алгоритму допомогла підвищити кількість прийнятних моделей зі складними дахами, які видобувають за допомогою інструменту *BERA*. В окремих випадках алгоритм *RANSAC* здатний коректно витягти модель будівлі з таких фрагментів хмари точок, з яких алгоритм *SaS* витягує лише призматичні моделі [121].

Процедури сегментації площин алгоритму *RANSAC* також використовуються у ще одній модифікації для НП-моделювання інструментом *BERA*, а саме при використанні підходу *PolyFit*. Цей підхід використовує набір площин, отриманий за допомогою *RANSAC* і з'єднує їх у різних комбінаціях, утворюючи різні варіанти даху з метою пошуку такої комбінації площин, яка буде топологічно коректною, і найкраще відповідати даху модельованого будинку. Головною особливістю даного підходу є використання техніки висування гіпотез і вибору щодо безлічі комбінацій площин, що перетинаються [155]. Всі інші етапи моделювання можуть включати процедури сегментації, які вже були докладно описані в цьому розділі.

За рахунок більш високої варіативності моделювання дахів результати розрахунків за допомогою *PolyFit* можуть бути більш задовільними, ніж зі звичайним *RANSAC*. Особливо *PolyFit* справляється з фрагментами точок будівель, які мають велику кількість викидів. Хоча *RANSAC* також здатний успішно обробляти подібні фрагменти, але у випадку з надмірною кількістю шумових точок, кут нахилу витягнутої з них площини може істотно відрізнятись від нахилу цієї площини реальної будівлі [215]. *PolyFit*, в свою

чергу, шляхом ітеративного перебирання різних комбінацій площин завжди буде прагнути до мінімізації топологічних помилок і до пошуку такої комбінації, яка найкраще відповідатиме певному усталеному шаблону даху будівлі. Втім, через такий перебір швидкість розрахунків може суттєво сповільнитися.

Всі наведені алгоритми нами реалізовані у вигляді окремих модифікацій інструменту *BERA*. Потенційно всі три алгоритми можуть бути певним чином скомбіновані в одному інструменті, що дозволить підбирати найкраще рішення для обробки того чи іншого файлу хмари точок, що покриває певний тип забудови або має свої похибки та недоліки, які найкраще оброблятимуться одним із трьох представлених алгоритмів. Таке комбінування представлених алгоритмів дозволить максимізувати кількість прийнятних НП-моделей зі складними дахами.

Моделі, отримані таким чином, відповідають стандартам *CityGML*, що дозволяє візуалізувати їх у 3D-сцені різних веб-ГІС-інтерфейсів, а також у різних рівнях деталізації (рис.2.8) [182]. Для візуалізації великих наборів моделей без втрати продуктивності моделі перетворюються на формат *B3DM*. Даний формат дозволяє запакувати певну групу моделей в один файл, який потім передається у формат *3DTiles* і миттєво візуалізується у середовищі *Cesium Viewer* у вигляді окремого набору моделей – "3D-тайлу". Групування моделей за тайлами суттєво знижує навантаження на сервер при зберіганні та візуалізації великих обсягів даних. Також значно прискорюється завантаження моделей при їх візуалізації у різних додатках та пристроях. Це дозволяє нам виконувати розрахунки щодо виокремлення будівель для територій цілих міст. Кількість моделей, що виокремлюються і візуалізуються, для однієї сцени може становити сотні тисяч.

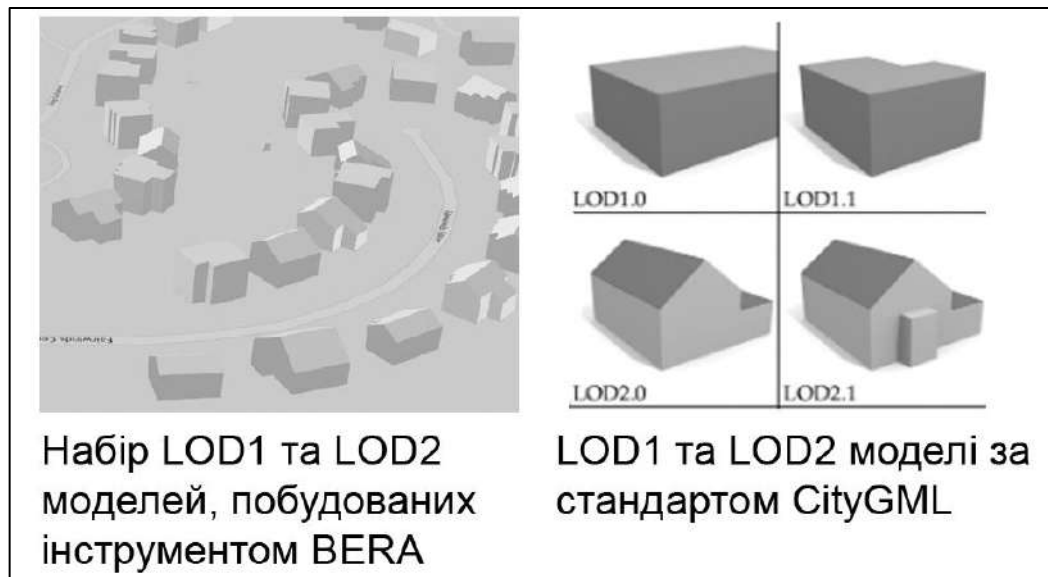


Рис. 2.8. Відповідність моделей, побудованих інструментом *BERA* стандарту *CityGML* [побудовано автором за [64]).

Таким чином, НП-моделювання за допомогою інструмента *BERA* не просто є запасним варіантом для обробки лідарних даних, які не підходять для ВП-моделювання, але і є найбільш ефективним підходом для масової обробки та візуалізації лідарних даних у вигляді узагальнених 3D-моделей з коректними геометричними характеристиками та топологією. Моделі, отримані за допомогою *BERA*, є універсальними 3D-об'єктами, які можуть використовуватися в багатьох інтернет-додатках різного призначення. У нашому ж проекті такі моделі служать картографічною основою для побудови тематичних карт і реалізації різних сценаріїв користувача.

2.3.3. Визначення часових змін у архітектурній морфології міста.

Функціональність відстеження змін призначена для порівняння двох файлів лідарних даних, отриманих з однієї і тієї ж місцевості, але в результаті проведення двох різних зйомок цієї місцевості, між якими пройшов певний період часу. Метою такого порівняння лідарних даних є виявлення та виокремлення змін у забудові даної місцевості, що відбулися в період між двома зйомками. Зміни зазвичай описують або нові будівлі і прибудови, що з'явилися на місцевості в даний період, або ж знесені або зруйновані будівлі,

що існували тут раніше. Інструмент *CD* також визначає точні розташування змін та створює високополігональні моделі цих змін з додатковою геометричною та просторовою інформацією [34].

Цей інструмент, на відміну інших інструментів *ELiT*, немає власних алгоритмів моделювання об'єктів. Фактично, при моделюванні змін у ньому задіяні ті ж самі процедури ВП-моделювання, які були докладно описані у попередньому підрозділі. Приблизна послідовність процедур виконання відстеження змін виглядає наступним чином: на вхід приймається два *LAS*-файли – первинний і вторинний (отримані у відповідному хронологічному порядку), потім інструмент за допомогою вбудованої функціональності ВП-моделювання виконує обробку обох файлів з метою отримання з них двох наборів моделей будівель; нарешті він виконує зіставлення цих двох наборів і виділяє з кожного набору ті моделі та їх частини, які відсутні в іншому наборі [34]. Виділені таким чином модельні сутності виносяться до окремої категорії об'єктів, які при подальшій візуалізації результатів будуть позначені як зміни в архітектурній морфології міста. Ці об'єкти можуть бути також розбиті на дві підкатегорії: додані та видалені об'єкти, які будуть характеризувати, відповідно, будівлі, що з'явилися або навпаки – знесені будівлі.

При візуалізації результатів у 3D сцені користувач може переглянути набори моделі будівель як з первинного, так і з вторинного *LAS*-файлу, а також вивчити моделі всіх виокремлених змін, які будуть підсвічені окремим кольором (рис. 2.9). Така візуалізація добре ілюструє загальні тренди міського будівництва, у разі активної забудови міста, або ж найбільш постраждалі ділянки міської території, у разі стихійного лиха або воєнних дій. Високополігональні моделі змін, при їх детальному розгляді, дозволяють також з досить високою точністю оцінити ступінь пошкодження будівлі, що може бути прийнято до уваги при плануванні її подальшого відновлення та реставрації.

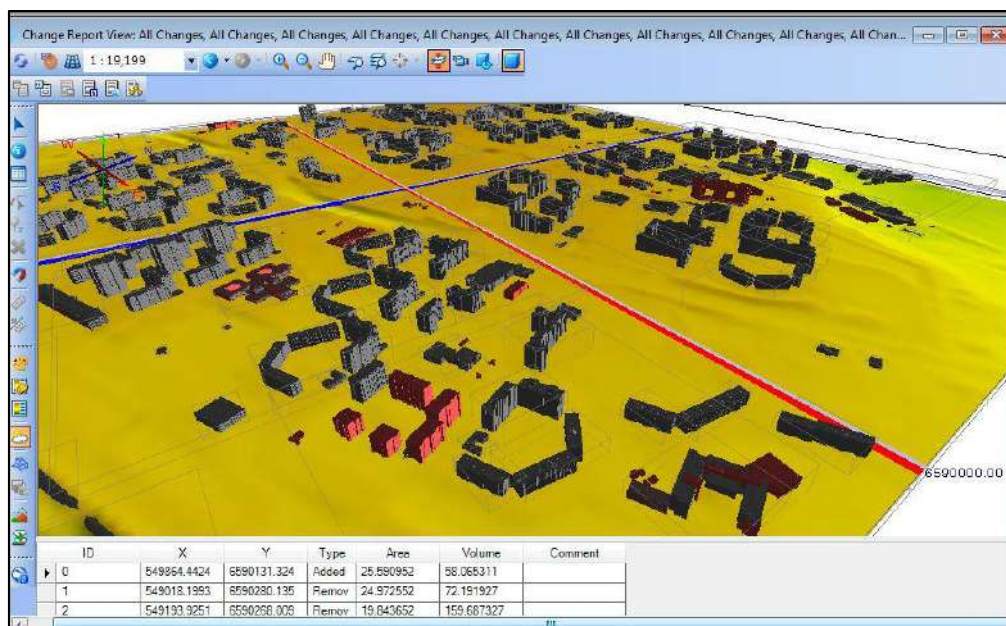


Рис. 2.9. Результат роботи інструменту *Change Detection* (червоним кольором позначені зміни у забудові) на прикладі м. Талін, Естонія (побудовано автором за даними [84])

До моделей змін, як і до моделей будівель, надається додаткова атрибутивна інформація, що характеризує площу, об'єм, координати змін, а також їх тип (додано/видалено). Інформація про всі зміни також може бути експортована у вигляді атрибутивної таблиці, яка, згодом, може бути інтегрована та оцифрована в різних міських ГІС-проектах або використана у звітах про лідарні зйомки.

Таким чином, функціональність відстеження змін є вкрай корисним інструментом для багатьох міських досліджень. Регулярний збір лідарних даних з їх подальшим пропуском через цей інструмент дозволить підтримувати регулярний моніторинг урбанізованої місцевості у цифровому просторі, що суттєво оптимізує міські дослідження та дозволить своєчасно реагувати на різноманітні надзвичайні ситуації. Але варто зазначити, що для отримання надійних результатів цей інструмент дуже вимогливий до якості лідарних даних. Адже, як і у випадку з функціональністю вилучення будівель, від якості лідарних даних залежатиме точність побудованих моделей, а отже, і точність змін, що фіксуються. Особливою проблемою може стати наявність

різних перешкод у хмарі точок, які можуть бути помилково вилучені разом з будівлями та згодом виділені як зміни, тому перед використанням інструменту рекомендується додатково вивчити місцевість за аерофотознімками та, при необхідності, відфільтрувати зайві класи точок у *LAS*-файлах залишивши тільки клас будівель.

2.3.4. Генерація урбанізованого рельєфу в межах географічного екстену міста.

Третьою функціональністю нашого проекту є генерація ЦМР (*DEM-generation*), що в контексті міських досліджень та моделювання цифрового міста можна назвати генерацією урбанізованого рельєфу. Інструмент *DEM-generation* приймає на вхід хмару точок і на її основі розраховує растрову модель поверхні у вигляді *grid*-матриці високої роздільної здатності [14]. Під час обробки хмари точок інструмент робить фільтрацію наземних об'єктів і в результаті залишає таким чином виключно гладку модель рельєфу досліджуваної місцевості.

Функціональні аспекти даного інструменту є невід'ємною частиною функціональності вилучення будівель, що можна було зрозуміти з опису алгоритмічної послідовності ВП-моделювання в одному з попередніх підрозділів. В цілому ж, ЦМР, що є результатом реалізації даного інструменту, чудово поєднується з іншими результатами обробки лідарних даних, а саме моделями будівель та змін. У такому поєднанні ЦМР забезпечує більш точне та наочне уявлення міського простору та окремих патернів геоситуацій [18]. Тому генерація ЦМР може бути включена в кожен із описуваних у цьому розділі інструментів як додаткова опція до розрахунків.

Алгоритмічна послідовність генерації ЦМР, так само, як і послідовність виокремлення та моделювання будівель, складається з низки процедурних етапів, що включають операції фільтрації точок, триангуляції, згладжування тощо. Далі по тексту будуть докладно описані кожен з таких етапів.

Інструмент на вхід приймає *LAS*-файл, у якому мають бути точки земної поверхні. До прийнятої хмари точок спершу застосовується попередня фільтрація точок, в ході якої відсіваються точки, що дублюються, які можуть відноситися до неземних точок і утворювати викид. Далі у якості земних точок приймаються всі найнижчі точки на кожній невеликій ділянці землі, площа якої визначається в залежності від щільності точок у вихідному *LAS*-файлі. Точки, що залишилися, матимуть відносно рівномірний розподіл щільності по всьому екстену *LAS*-файлу, що дозволяє по всіх цих точках побудувати *TIN*-модель

До побудованої *TIN*-моделі тепер застосовується фільтрація ребер за пороговим значенням довжини та вертикального ухилу за нормаллю до топографічної поверхні. Ця процедура дозволяє виключити з розрахунків деякі аномальні топографічні ділянки (впадини, провали, шахти, колодязі, гострі вершини). Точки, що залишилися після цієї фільтрації, можуть послужити опорними точками для побудови нової, більш згладженої поверхні. При побудові такої поверхні загальний обсяг даних повинен бути розділений на досить великі ділянки, щоб включати точки землі, але також кожна піднята область земної поверхні повинна повністю включати таку ділянку [165]. Оптимальний розмір такої ділянки по кожному краю становить 30-50 м – зазвичай таких значень достатньо для ефективною класифікації земної поверхні з різкими перепадами висот. Проблема в класифікації може виникнути у випадку, якщо на місцевості присутні досить великі будівлі, які можуть бути помилково віднесені до земної поверхні – у таких випадках необхідно збільшити розмір ділянки мережі, що задається, до розмірів найбільшої будівлі в даній місцевості [134]. В результаті розбиття даних на зазначені ділянки сумарна довжина кожного ребра цілого екстену даних для будь-якої сторони ділянки повинна як мінімум в три рази перевищувати довжину сторони цієї ділянки, на якій розташовані опорні наземні точки. Інакше ж вибрані точки можуть бути обрані тільки в межах невеликої області, яка не може бути

основою для подальшої побудови локальної топографії, а точки не зможуть бути опорними.

Нова *TIN*-модель будується за виявленими опорними точками, а її грані характеризують ухил на різних локальних ділянках. Для обраних раніше найнижчих точок хмари розраховується найближча грань побудованої мережі – тут вимірюється відстань і різниця висот між хмарию і найвищою точкою грані. З кожної такої грані вибирається найнижча її точка. Знову вибрані точки повинні бути на відстані не вище і не далі заданого порогового значення від поверхні грані для того, щоб різкі ухили опорної поверхні, отриманої від опорних точок, були більш згладженими. Всі точки, що вибираються, ітеративно додаються до існуючої *TIN*-моделі, тим самим апроксимуючи і ущільнюючи її. Таким чином, розрахована раніше земна поверхня за найнижчими точками хмари, розраховується знову за доданими точками. Поточна *TIN*-модель, що представляє топографічний каркас земної поверхні, може бути додатково ущільнена із застосуванням методу ковзного вікна (розміром 2 м^2), який дозволить отримати більш детальні параметри рельєфу. Так як *TIN*-модель, все ще може мати деякі аномальні топографічні відхилення, вона може бути знову згладжена, як це робилося раніше.

Кінцевим етапом генерації ЦМР є фільтрація шумових точок, що залишилися, які можуть належати або різним впадинам і провалам, або ж деревам, чагарникам та іншим невеликим стороннім об'єктам на земній поверхні [18]. Цей етап остаточно уточнює змодельовану топографічну поверхню. В результаті створюється ЦМР, яка покриває всю область поданого на вхід *LAS*-файлу (рис. 2.10). Цифрову модель тепер можна візуалізувати у 3D-сцені, а також експортувати у форматі *TIFF*. Якщо разом з ЦМР були розраховані і моделі будівель – вони можуть бути поєднані в одній сцені, відобразивши наочну і докладну модель міського простору, з усіма його перепадами висот.

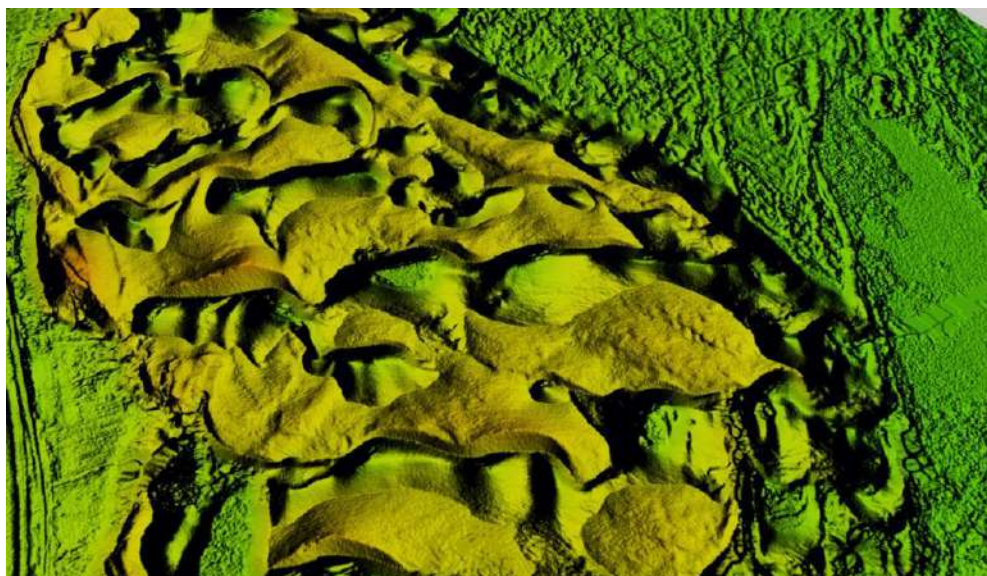


Рисунок 2.10. Результат роботи інструменту *DEM-generation* (побудовано автором за даними [162])

Функціональність генерації урбанізованого рельєфу є заключним функціональним блоком до запропонованої нами методики побудови 3D-сутності «Цифрове місто». Хоча є ще безліч інших можливостей обробки лідарних даних з отриманням з них корисної для міських досліджень інформації, описані нами можливості все ж таки є найбільш цінними для моделювання урбанізованого середовища, де саме будівлі є його ключовим компонентом. Моделювання міського рельєфу при цьому вдало доповнює цей компонент та розширює спектр прикладних застосувань змодельованого таким чином цифрового міста.

Представлені функціональні блоки можуть бути інтегровані та ефективно реалізовані в єдиному веб-ГІС додатку для побудови урбанізованого середовища [120]. Цей додаток може стати дуже адаптивним і доступним на будь-яких платформах, що мають доступ до інтернету і браузеру, завдяки чому обробка лідарних даних може стати набагато простішим і доступнішим завданням для масового користувача. Далі нами буде докладніше описано особливості реалізації структури та архітектури цього програмного забезпечення.

2.4. Структура та архітектура веб-ГІС-застосування для відтворення урбаністичного середовища

Веб-додаток для обробки лідарних даних та подальшого відтворення урбаністичного середовища може бути утворений на базі трьох ключових архітектурних елементів: алгоритмічне ядро, на якому реалізовані всі алгоритмічні процедури функціональних блоків, розглянутих у попередньому розділі; веб-клієнт, що надає інтерфейс користувача і візуалізацію результатів моделювання в 3D-сцені; і сервер, який пов'язує користувальницький інтерфейс з ядром, забезпечуючи передачу запитів користувача до відповідних алгоритмів ядра і передачу результатів моделювання для візуалізації. Виходячи з такої архітектури, робота з додатком з боку користувача буде виглядати наступним чином:

- користувач за допомогою спеціальних елементів інтерфейсу завантажує на сервер *LAS*-файл, за яким необхідно виконати моделювання, обирає конкретну функціональність для моделювання, задає для неї деякі вхідні параметри (наприклад, мінімальний розмір будівель) і запускає розрахунок;
- потім всі задані користувачем дані передаються в ядро, де запускаються обчислювальні алгоритми, що виконують обробку поданого *LAS*-файлу згідно з заданим запитом, користувач може відстежувати прогрес цієї обробки у відповідному вікні інтерфейсу;
- після успішної обробки поданого *LAS*-файлу результат цієї обробки передаються назад на сервер для подальшої візуалізації;
- нарешті користувач може візуалізувати отриманий результат у спеціальному вікні перегляду, в якому вбудовані різні інструменти керування візуалізацією. Окрім згенерованих або виокремлених з хмари точок моделей, користувачеві також надається для візуалізації і той *LAS*-файл, який був ним завантажений – таким чином користувач може зіставити вихідні дані з результатом їх обробки та оцінити якість виконаної роботи. Результат

моделювання також можна експортувати на диск у відповідному форматі зберігання даних.

Раніше нами розроблявся веб-ГІС додаток із подібною архітектурою. У цьому додатку користувачеві надавалося 4 основних інструменти обробки лідарних даних, кожен з яких мав свої особливості параметрів:

Building Extraction (BE) – інструмент, що виконує ВП-моделювання будівель із поданого на вхід *LAS*-файлу. До цього інструменту також додавались параметри, що налаштовуються (*max building size, min building area*), за допомогою яких можна відрегулювати алгоритм виокремлення будівель. Також був розроблений додатковий модифікований інструмент *Building Extraction with Footprints (BEwF)*, який на вхід, окрім *LAS*-файлу, приймав, *SHP*-файли футпринтів будівель з відповідної *LAS*-файлу місцевості - цей інструмент виконував ті ж процедури, що і звичайний *Building Extraction*, але суто у межах футпринтів будинків, які накладалися на хмару точок.

Building Extraction Rural Area (BERA) – інструмент, що виконує НП-моделювання будівель з поданих на вхід *LAS*-файлу та *SHP*-файлу з футпринтами. З вхідних параметрів можна було вибрати конкретний алгоритм моделювання будівель (*RANSAC, SaS, Polyfit*), а також можна було встановити рівень деталізації моделей будинків (*LOD1, LOD2*).

Change Detection (CD) – інструмент, що виконує виявлення та виокремлення моделей змін при зіставленні двох поданих на вхід *LAS*-файлів. Додатково пропонувалась опція моделювання та візуалізації будівель з обох *LAS*-файлів.

DEM-generator – інструмент, що виконує побудову ЦМР за поданим на вхід *LAS*-файлом. Додатково пропонується параметр розміру осередку сітки, який впливає на ступінь деталізації ЦМР. Цей інструмент також включений у якості додаткової опції для вищезгаданих інструментів *BE, BERA* та *CD*.

Візуалізація результатів у даному веб-додатку виконується у середовищі *Cesium Viewer* – програмі, розробленій на базі *JavaScript* бібліотеки *Cesium*, яка забезпечує тривимірне моделювання просторових об'єктів у різних

електронних картах [70]. Крім можливості візуалізувати результат обробки лідарних даних, у вікні *Cesium Viewer* реалізовано підкладку у вигляді глобальної карти *OSM*. Завдяки цьому результати відображаються у просторовій прив'язці в тій ділянці карти *OSM*, де було виконано дану лідарну зйомку.

Інтерфейс середовища *Cesium Viewer* складається із двох ключових елементів: вікно карти, на якій безпосередньо відображається результат моделювання та бокова панель інструментів. Карта являє собою покритий картою *OpenStreetMap* цифровий глобус, на якому і відображаються результати моделювання. Бокова панель, у свою чергу, містить різні елементи управління відображенням карти. Ця панель має елементарний інтерфейс, в якому користувач може перемикає шари карти, змінювати колір і прозорість об'єктів, переглядати їх атрибутивну інформацію, а також завантажувати на диск об'єкти, що представляють інтерес. Залежно від інструменту обробки лідарних даних, на боковій панелі також містяться додаткові елементи управління побудованими моделями: для *BE* і *BERA* вони дозволяють змінювати рівень деталізації моделей, для *CD* – перемикатися між первинними та вторинними даними, а для *DEM* – вмикати та вимикати тривимірне відображення рельєфу.

Окремо нами розроблявся веб-геопортал, призначений для пошуку, візуалізації та обробки лідарних даних. Цей геопортал є геопросторовим веб-ресурсом, побудованим на базі *Cesium JS* [50]. Його інтерфейс, подібний до описаного раніше *Cesium Viewer*, складається з двох ключових елементів: вікно карти і бокова панель шарів. Вікно карти містить 3д-глобус, покритий вбудованою підкладкою *OpenStreetMap*, де візуалізуються тривимірні моделі міст, активованих на боковій панелі. Сама бокова панель містить список доступних для тривимірної візуалізації локацій, які можна перемикає на цій панелі, список доступних шарів для цих локацій, легенду карти, а також поле для надсилання користувацького запиту до обробки даних (рис.2.11). Також,

при натисканні на певну модель будівлі у вікні карти, поряд з нею відкривається спливаюче вікно зі списком атрибутів, що описують цю модель.



Рис. 2.11. Інтерфейс середовища візуалізації результатів обробки лідарних даних *ELiT Geoportal*.

На геопортал завантажуються різні розраховані набори оброблених лідарних даних, у вигляді тривимірних моделей будівель і цифрових моделей рельєфу. Ці набори даних можуть покривати як окремі, невеликі фрагменти міського середовища, так і території цілих міст і мегаполісів. Кожен завантажений таким чином набір даних, по суті, і є окремою локацією, яка може бути візуалізована користувачем у вікні карти. Важливою перевагою нашого геопорталу є досить висока швидкість завантаження моделей будівель при перемиканні між локаціями – все завдяки тому, що візуалізація моделей здійснюється за стандартом *3DTiles*, про який раніше йшлося у розділі 2.3. Цей стандарт передбачає упаковування певного набору моделей в один файл через формат *B3DM* – таким чином кількість розрахованих файлів моделей формату *GLTF* скорочується до числа файлів згрупованих моделей формату *B3DM* («3D-тайлів») [73]. Таке перетворення даних суттєво знижує навантаження на сервер і відповідно прискорює завантаження моделей за їх безпосередньої візуалізації у вікні карти. Формат *B3DM* також приймає з *GLTF* корисну

атрибутивну інформацію про будівлі, що моделюються, яка в свою чергу задалегідь заноситься в моделі через *JSON*-файл.

Для злагодженої візуалізації локацій різних об'ємів та в різних масштабах має бути правильно налаштована структура 3D-тайлів. У оптимізації цього завдання важливу роль відіграє встановлення обмежувачих рамок, які, власне, і поєднують у собі певну кількість об'єктів. Спочатку така рамка генерується для кожної окремої моделі будівлі. На основі розмірів рамок визначається рівень поділу даних та позиція у загальній ієрархії тайлів, що встановлюється далі в наборі тайлів. Нарешті, розраховується і сам набір тайлів (файл *tileset.JSON*), який містить інформацію про те, як організовані та пов'язані тайли в наборі, і, відповідно, як вони мають бути візуалізовані [108]. В результаті, незалежно від об'єму даних та кількості завантажених моделей – вони однаково будуть завантажуватися саме в залежності від встановлених рамок, які здатні вмістити в себе лише обмежений обсяг даних. Крім того, дані візуалізуватимуться лише за певного рівня масштабування, який задається для того, щоб запобігти перевантаженню сервера при спробі одночасно візуалізувати великий масив даних у дрібному масштабі, де зайва деталізація є недоцільною. Таким чином, імплементація стандарту *3DTiles* на геопорталі дозволяє суттєво підвищити його швидкодію та оптимізувати візуалізацію великих масивів даних.

Кожна завантажена на геопортал локація також може мати певну кількість шарів даних. Зазвичай якості таких шарів виступають різні рівні деталізації моделей (*LOD1/LOD2*), але в окремих випадках для локації могла бути розрахована ЦМР, що покриває цілий екстент локації. Ще в якості окремих шарів даних нами були реалізовані користувацькі сценарії, що моделюють результати оцінки чисельності населення та оцінки рівня енергоспоживання в будинках [16]. Параметри для цих сценаріїв попередньо розраховуються для окремих локацій, з використанням геометричних характеристик будівель, що виокремлюються з їх моделей, а також додаткових семантичних характеристик, що завантажуються із зовнішніх джерел.

Результатом розрахунків зазначених користувацьких сценаріїв є певний атрибутивний показник (кількість мешканців у будівлі або рівень його енергоспоживання), який присвоюється кожній моделі будівлі у відповідному *JSON*-файлі і потім передається у спливаюче вікно атрибутів моделей на геопорталі і використовується при візуалізації користувацького сценарію через певну палітру кольорів.

Ще на геопорталі користувачеві надається можливість надіслати запит до даних на конкретну локацію, що задається за допомогою *WKT*-координат. І якщо на сервері є розраховані дані, що потрапляють в екстент заданих координат – вони передаються користувачеві для перегляду та завантаження. У розробці також була схожа функціональність, яка передбачала відправку користувачем *LAS*-файлів для обробки нашими інструментами та повернення результатів обробки у вигляді набору вилучених моделей будівель.

Таким чином, представлені напрацювання реалізації веб-ГІС для зберігання, обробки та візуалізації лідарних даних можуть стати ефективною основою для побудови та управління 3D-сутністю «Цифрове місто» в єдиному цифровому просторі. За допомогою описаної гнучкої структури та архітектури такого веб-додатку, в нього надалі може бути інтегровано безліч різних типів геоданих, отриманих з різних джерел, що додатково деталізуватиме цифрове місто, підвищуватиме його цінність і варіативність застосування для багатьох досліджень. Важливим є також те, що доступ до такої програми можна буде отримати з будь-якого, підключеного до Інтернету пристрою із вбудованим браузером.

Висновки до розділу 2

1. У другому розділі дослідження розкрито ключові методологічні аспекти до впровадження урбогеосистемного аналізу міського середовища з використанням ГІС-функціональності та геообробки лідарних даних. Зокрема, розкрито сутність УГС-аналізу різнорангових міст, який полягає у виокремленні УГС-властивостей міст, які можуть бути виявлені лише через

ГІС-аналіз та моделювання. Такі властивості можуть вказувати на стан та рівень розвитку окремих міських районів та окремих компонентів УГС. Для позначення УГС-властивостей, що виявляються в обмеженому екстенті географічного простору міста, виділено категорію *урбаністичної геоситуації (УГСит)*. У роботі докладно охарактеризовано ключові властивості УГСит: структурна успадкованість, що проявляється в історичному розвитку плану міста, повторюваність, що проявляється в структурності упорядкованості міст, і мінливість, що проявляється в регулярних міських процесах. Обґрунтовано також перевагу геоситуаційного підходу саме при використанні лідарних даних.

2. В якості однієї з ключових передумов до впровадження УГС-аналізу конкретних міст у роботі висувається розробка проекту «Цифрове місто». Окремо обумовлено роль та значущість реалізації такого проекту в рамках впровадження концепції «Розумне місто» у його геопросторовій перспективі. У якості теоретичного підґрунтя для реалізації цифрового міста визначено урбогеосистемний підхід. Згідно з останнім, УГС постає дискретною квазівекторною моделлю, що описує сукупність складових елементів і просторових зв'язків реального міста, а урбаністичне середовище, у свою чергу, постає квазірастровою моделлю, що відображає фізичне середовище цього міста. Цифрове місто у цьому відношенні здатне об'єднати в єдиній ГІС-моделі обидві зазначені моделі. Центральним компонентом цифрового міста визначено тривимірну імітаційну модель конкретного міста, побудовану на підставі лідарних даних.

3. Викладено методики до побудови вказаної 3D-моделі цифрового міста на основі обробки лідарних даних. Ці методики описують окремі функціональні блоки, реалізовані на базі спеціального веб-ГІС застосунку: виокремлення будівель (високополігональне та низькополігональне моделювання), відстеження змін у забудові та генерація урбанізованого рельєфу.

4. Викладено особливості структури та архітектури веб-ГІС застосунку, який надає інструменти обробки лідарних даних, що базуються на зазначених раніше функціональних блоках, а також середовище тривимірної візуалізації результатів на карті глобального перегляду. Ключовими архітектурними елементами такого додатка є алгоритмічне ядро, веб-клієнт та сервер. Okремо описано середовище веб-геопорталу. Всі зазначені напрацювання розглядаються як основа для впровадження вищезгаданого проекту «Цифрове місто».

РОЗДІЛ 3.

ВПРОВАДЖЕННЯ УРБОГЕОСИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ГЛОБАЛЬНОГО УРБАНІЗОВАНОГО ПРОСТОРУ НА ПІДСТАВІ ЗМІСТУ ГІС-ПОРТАЛІВ ІЗ 3D-ПОДАнням МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

3.1. Визначення різнорангових патернів урбаністичних геоситуацій як виокремлення урбогеосистемних властивостей міського середовища.

3.1.1. Виокремлення патернів урбаністичних геоситуацій за тривимірними моделями забудов у середовищі *MapBox Studio*

Як вже зазначалося у наших попередніх публікаціях, дослідження та аналіз урбаністичного середовища з використанням тривимірного моделювання є вкрай ефективним підходом для отримання унікальних УГС-властивостей міста [32]. Особливу значимість тривимірне моделювання становить у дослідженні міста у великому масштабі – на рівні окремих УГСит. При близькому розгляді, за тривимірними моделями забудови можна відслідковувати різні локалізовані закономірності міського середовища, які, хоч і упускаються в дрібнішому масштабі, але є важливими для розуміння того, як функціонує цілісна УГС. До того ж, УГСит найчастіше є повторюваними та формують різнорангові патерни геоситуацій [36]. Так, якщо поглянути на тривимірну модель забудови певного міста, то можна помітити, що вона складається з безлічі УГСит, що повторюються, що мають загальні архітектурно-морфологічні властивості, особливості планування і конфігурації будівель. Проаналізувавши тривимірну модель однієї такої геоситуації, можна екстраполювати її УГС-властивості на всю територію досліджуваного міста з таким же патерном УГСит за умови, якщо останній – попередньо встановлений. Таким чином, можна вважати, що визначення та

аналіз таких патернів у великому масштабі дозволяє робити висновок про стан міського середовища в набагато дрібнішому масштабі.

Якщо розглядати властивості міського середовища, що можуть бути виявлені по тривимірній моделі окремої УГСит, то насамперед це щільність забудови, особливості горизонтального та вертикального планування районів та архітектурна морфологія міської забудови [35]. За цими властивостями, у свою чергу, можна, по-перше, визначити характерні особливості різних типів землекористування (ЗК) міста та виявити їх підтипи, а по-друге, зробити певні припущення про якість життя у міському середовищі тієї чи іншої УГСит.

Різні типи ЗК в місті по суті також є окремими патернами УГСит, адже в залежності від тієї функції, на яку вони орієнтуються, змінюється уявлення про оптимальне планування та забудову міського простору. Наприклад, житловий тип спрямований на забезпечення комфортного проживання людей, комерційний тип спрямований на забезпечення доступності, а також щільної комунікації між окремими стартапами та бізнесами, індустріальний – на забезпечення тісного розміщення великих виробничих обладнань, великих складів та транспортної інфраструктури, тощо. Всі ці типи мають свої власні вимоги до розмірів та розміщення будівель, які визначають їх унікальні УГС-властивості, за якими їх можна ідентифікувати [71]. Тому, визначивши характерні властивості забудови різних типів ЗК за окремими УГСит цих типів, ми можемо надалі доповнювати та уточнювати їх існуючу класифікацію, а також своєчасно призначати тип користування новим будинкам та районам у міській базі даних. Подібна універсальна класифікація типів будівель, у свою чергу, може бути корисна при вирішенні користувальницьких сценаріїв з оцінки чисельності населення або оцінки енергоспоживання будівель [200].

Для тривимірної візуалізації та виділення патернів УГСит нами використовуються різні ГІС-платформи, залежно від конкретного запиту. Так, базова тривимірна візуалізація міської забудови в режимі *LOD1* може бути виконана у середовищі *MapBox Studio*. Це програма веб-платформи *MapBox*,

яка надає інтерактивний веб-інтерфейс на базі бібліотеки *OpenGL* із прив'язаною векторною картою глобального покриття [30]. В інтерфейсі *MapBox Studio* користувачеві надається можливість створювати 2D- та 3D- карту на основі відкритих геопросторових даних та вільно керувати їх оформленням та відображенням. Будівлі на цій карті спочатку представлені у вигляді двовимірного векторного шару футпринтів, проте до футпринтів прив'язана інформація про висоту будівель, яка дозволяє їх витягнути за екстентом футпринтів і перетворити на тривимірні моделі *LOD1* [141]. Отримана таким чином модель міської забудови чудово підійде для вказаного визначення патернів УГСит.

Спершу буде розглянуто УГСит різних типів ЗК в межах міської агломерації Нью-Йорка. Це одне з найбільших міст світу за багатьма показниками, включаючи кількість будівель, ступінь урбанізації та диференціацію типів забудови, тому виокремлені властивості урбаністичного середовища цього міста можна вважати цілком характерними і для інших міст, що належать до рангу мегаполісу.

Першим розглянутим патерном УГСит є *комерційний* тип ЗК (рис.3.1.). Цей тип, як правило, знаходиться в центральній частині міста (*downtown* – англ.) та має свої особливості забудови, за якими він легко виділяється від інших типів ЗК. Йому характерна надвисока щільність забудови масивними будинками, як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямі, а також досить висока диференціація форм цих будинків. Тут зосереджено багато високоповерхових будівель, відведених під різні офісні, торгові та розважальні приміщення, тому тут з'єднуються численні міські транспортні шляхи та часто спостерігається перевантажений дорожній трафік та високий рівень шумового забруднення. Найчастіше такі зони збігаються з історичним центром міста, але трапляються й окремі ділові райони з характерною забудовою, розподілені у різних частинах міста.

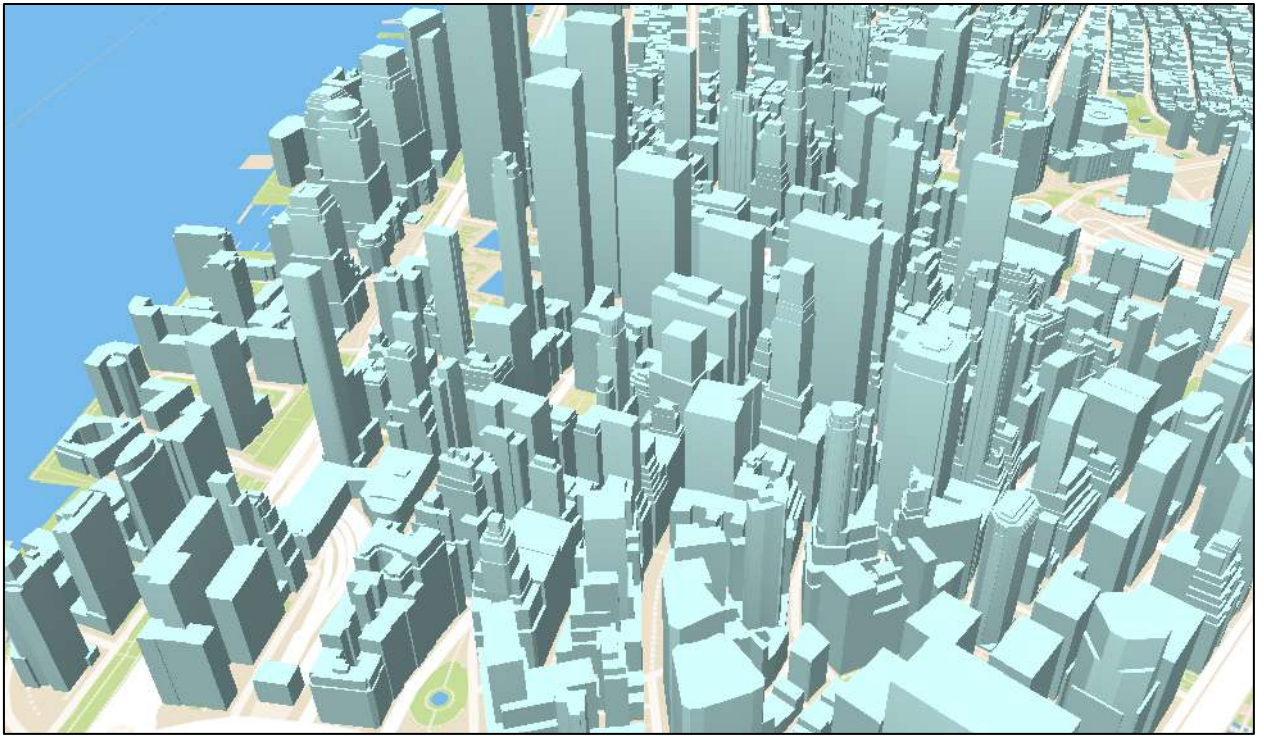


Рис.3.1. Патерн УГСит комерційного типу ЗК у м. Нью-Йорк. Візуалізація у середовищі *Mapbox Studio*.

Ще одним поширеним патерном УГСит є *індустріальний* тип ЗК (рис.3.2). Він, на відміну від комерційного типу, займає віддалені від центру території і складається з порівняно не високих будівель, але з великою площею, тому висока щільність забудови тут досягається саме за рахунок великих розмірів будівель, а не їх кількості [36]. Такі розміри будинків обумовлені вмістом у них потужних виробничих устаткувань, а також великих складських приміщень. Залежно від специфіки виробництва, індустріальні зони можуть завдавати негативно впливу різного роду на навколишнє міське середовище, тому вони і розміщуються дещо віддалено від зон з високою концентрацією населення.

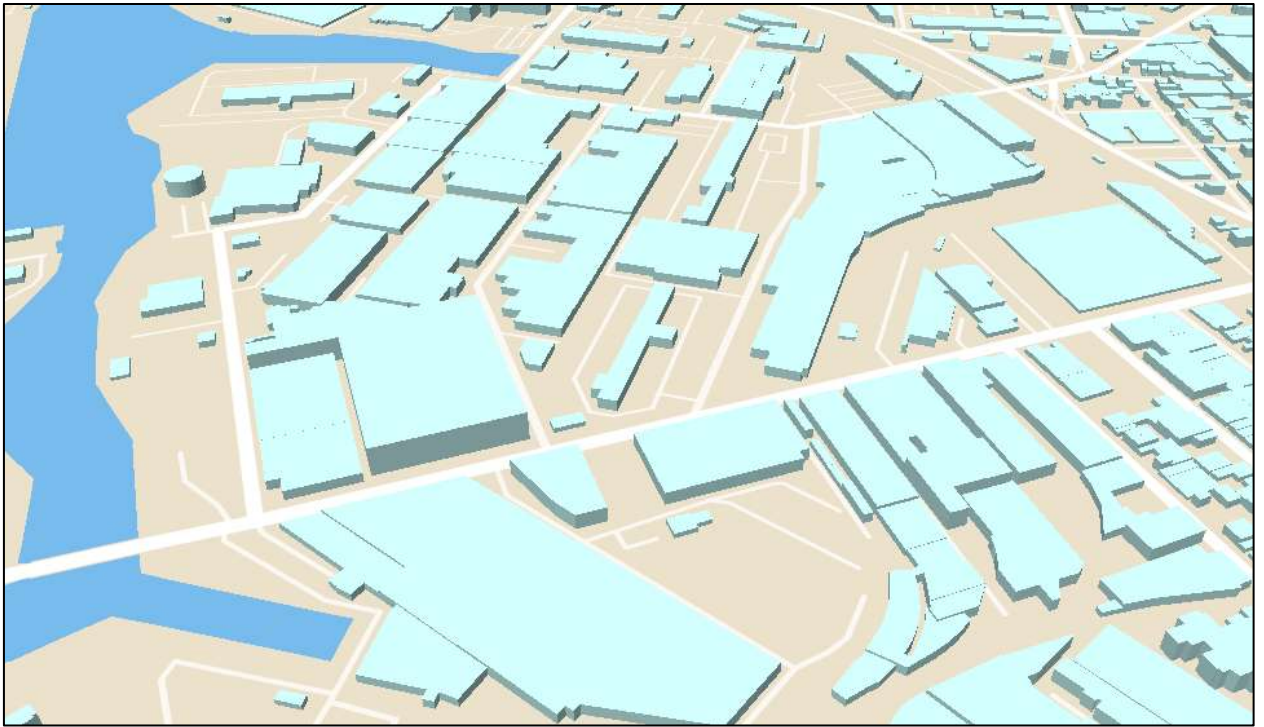


Рис.3.2. Патерн УГСит індустріального типу ЗК у м. Нью-Йорк. Візуалізація у середовищі *Marbox Studio*.

Окремо можна виділити патерн *інституційного* типу ЗК (рис.3.3.). Геоситуаціям даного типу характерна зосередженість на обмеженій ділянці сукупності будівель, що належать до однієї установи – це можуть бути різні корпуси шкіл, університетів, лікарень, спортивних комплексів тощо. За щільністю, формою та розмірами будівель, забудова цього типу об'єднує у собі окремі властивості комерційного та індустріального типів ЗК, розглянутих раніше. У таких зонах можуть бути як порівняно високі, так і великі за площею будівлі, проте щільність забудови таких територій зазвичай невисока через наявність відведених місць для паркування та зелених зон. Інституційним зонам, як правило, не властивий негативний вплив на навколишню територію, тому вони часто розташовані поблизу житлових районів, а іноді й самі можуть включати житлові будівлі, наприклад, гуртожитки університетів.



Рис.3.3.. Патерн УГСит інституційного типу ЗК у м. Нью-Йорк. Візуалізація у середовищі *Mapbox Studio*.

Найбільш поширеним патерном УГСит у контексті типів ЗК є *житловий* тип, причому він може розбиватися на безліч низькорангових патернів геоситуацій, що відповідають окремим підтипам житлової забудови, окремим житловим кварталам та окремим періодам міської забудови. Характерною властивістю житлового типу ЗК, за рахунок якої його можна відрізнити від інших типів та виділити в окремий високоранговий патерн, є чітка впорядкованість та уніфікація будівель (рис. 3.4). При цьому форма, розмір будівель, їх щільність і характер упорядкованості є тими властивостями, на основі яких виділяються окремі низькорангові патерни житлового типу. Диференціація цих властивостей між різними патернами житлової забудови є однією з причин диференціації якості життя в тому чи іншому житловому районі міста, адже всі ці властивості так чи інакше впливають на кількість населення, яке може проживати у певному житловому районі та кількість вільного простору в ньому [36]. Так, багатоповерхові житлові райони із щільною забудовою через високу щільність населення можуть мати суттєвий недолік у кількості паркувальних місць та громадських просторів, на відміну від районів із помірно малоповерховою забудовою.

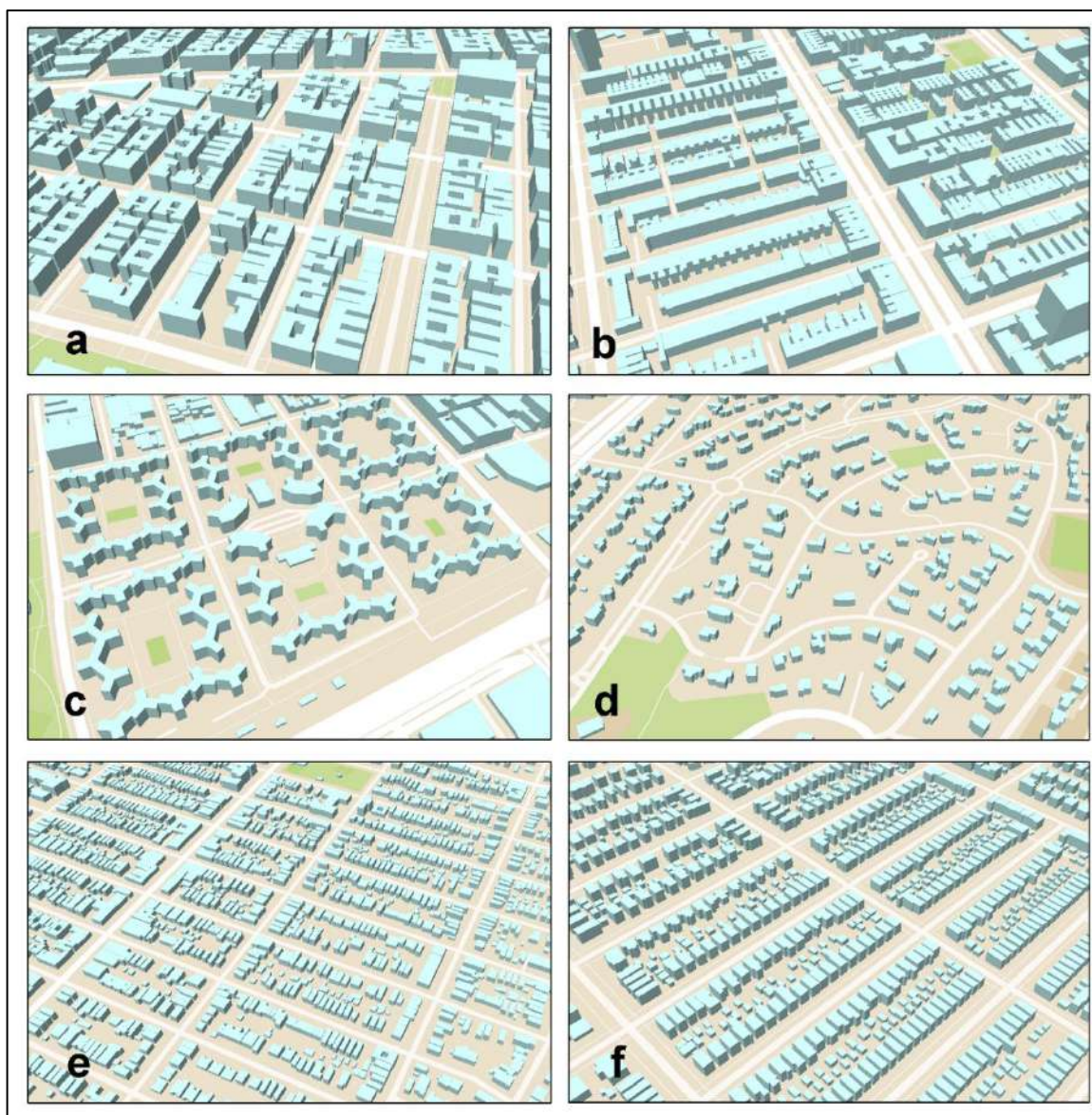


Рис.3.4. Патерни УГСит житлового типу ЗК у м. Нью-Йорк. Візуалізація у середовищі *Mapbox Studio*.

Якщо порівняти різні типи житлової забудови на рис. 3.4, то не складно помітити певні відмінності між ними, за рахунок яких вони поділяються на окремі низькорангові патерни УГСит. На основі лише візуальної оцінки цих урбогеоситуацій за їх моделями можна зробити певні припущення про якість життя в даних житлових районах, про складність їхнього міського обслуговування, про потенціал для побудови нових будівель та розширення міської інфраструктури, а також доцільність встановлення нових об'єктів обслуговування, громадських просторів, станцій мобільної мережі тощо. Зрозуміло, що подібна оцінка не дає вичерпних передумов для перерахованих

припущень, проте на певній стадії ГІС-аналізу міської території вона може застосовуватися для виділення первинних областей інтересу, за якими надалі буде проводитися більш глибокий аналіз із залученням більшої кількості атрибутивної інформації.

При оцінці того чи іншого патерну УГСит житлового типу насамперед береться до уваги щільність забудови (горизонтальна та вертикальна). Ця властивість свідчить про те, наскільки ефективно та раціонально використовується міський простір в умовах високої урбанізації. При цьому під ефективністю в даному випадку мається на увазі ступінь, до якої міський простір використовується з максимальною користю й оптимальним способом для можливості розміщення максимальної кількості населення, але з комфортним рівнем життя та злагодженим функціонуванням цієї міської території [35]. Під останнім мається на увазі наявність розвиненої транспортної мережі, а також доступність громадського транспорту, паркувальних місць, громадських просторів та об'єктів обслуговування. У зв'язку з вищесказаним можна припустити, що існує умовний поріг щільності забудови, перевищивши який ефективність використання території буде суттєво знижуватися. Зазвичай у розвинених містах оптимальне розміщення населення досягається або за рахунок високої горизонтальної щільності та низької вертикальної (компактна малоповерхова забудова), або навпаки, за рахунок низької горизонтальної та високої вертикальної щільності (розмірена високоповерхова забудова). Однак, часто в ході недостатньо регульованого розростання міст, з'являються райони, щільність забудови яких перевищує допустимі пороги і з цього надалі витікає безліч урбаністичних проблем.

Повертаючись до рис.3.4, можна дати попередню оцінку шести найбільш характерним патернам УГСит виходячи з зазначених критеріїв ефективності використання території. Так, найбільш оптимальна забудова характерна зразкам (патернам) на рис.3.4с та рис.3.4f. У першому випадку спостерігається розмірена високоповерхова забудова, де відведено достатньо вільного місця між будинками з урахуванням тієї кількості населення, яка

може проживати у таких багатоквартирних будинках. Другий випадок, хоча і має набагато більшу горизонтальну щільність забудови, проте в ньому мешканці кожного окремого будинку мають більше індивідуального простору, який може бути відведений під особисті двори та паркувальні місця. Загалом, в обох випадках дотримується певний баланс між кількістю та обсягом будівель з одного боку та кількістю вільного простору – з іншого.

Патерн забудови на рис.3.4а носить вже більш негативний характер – тут явно спостерігається надмірна щільність забудови, при якій на малих ділянках зосереджено безліч багатоквартирних будівель. На відміну від попередніх двох патернів тут відсутні вільні простори між будівлями, які були б сумірні з кількістю та об'ємом цих будівель, тому подібним житловим районам будуть характерні такі проблеми, як перевантажений трафік на дорогах, відсутність паркувальних місць, шумове забруднення, затінення вулиць тощо. Однак, такі райони часто знаходяться у відносній близькості до центру міста, тому зазначені негативні властивості можуть бути частково нівельовані близькою доступністю всіх необхідних послуг та загальноміських рекреаційних зон [47]. Подібна ситуація спостерігається і на рис.3.4b – хоча тут і менша поверховість будівель, проте тут все ще спостерігається надмірна щільність забудови, при якій будівлі розташовані практично впритул одна до одної.

Патерн на рис.3.4d, навпаки, має досить низьку щільність забудови для сучасних темпів урбанізації. Ймовірно, рівень життя в таких районах буде досить високим через відсутність тих урбаністичних проблем, пов'язаних із щільністю забудови, зазначеними раніше. Однак, для заселення великої кількості населення, яке стрімко зростає у великих містах, забудова міста за таким патерном займатиме непомірно великі території. Прокладання інфраструктури та обслуговування таких територій вимагатиме великих витрат ресурсів, які можна заощадити за рахунок більш компактної забудови. Такий патерн може підійти для забудови малих міст і передмість, де порівняно невисока вартість землі та помірні темпи зростання населення, проте великим містам та мегаполісам такий варіант не прийнятний через зазначені проблеми.

Стосовно патерну на рис.3.4е слід відзначити досить високу безладність його забудови. У межах одного кварталу тут упереміш розташовуються будівлі різних розмірів і форм, через що щільність забудови також розподіляється нерівномірно по всьому району. У подібних житлових районах очікується висока диференціація якості життя серед місцевих жителів [2]. Крім того, через неоднорідність та хаотичність забудови, оптимізація міського обслуговування цієї території може стати досить складним завданням. Хоча цей патерн достатньо схожий на той, що на рис.3.4f, територія останнього використовується набагато ефективніше.

Дотепер, у цьому розділі нами розглядався аналіз міської забудови лише на основі геометричних характеристик будівель, що визначаються за їх тривимірними моделями. Зазвичай одних лише тривимірних моделей достатньо для отримання уявлення про структуру міської забудови, напрям урбанізаційних процесів, взаєморозташування будівель та забудованих районів, диференціацію якості життя тощо. Однак, у ряді випадків важливу роль у міському функціонуванні та розвитку грає сам рельєф міської місцевості. Міста, збудовані в гірській чи скелястій місцевості можуть мати значні перепади висот між масивами будівель, які суттєво змінюють уявлення про УГС-властивості цих міст. Виходячи з цього, моделювання рельєфу для таких міст є доцільним рішенням, і в цьому також ефективним є геоситуаційний підхід. Можна змоделювати окремий патерн урбаністичної УГСит в гірській місцевості на основі декількох фрагментів лідарних даних, і визначити в ньому ключові УГС-властивості, характерні для подібної місцевості [18].

На основі відкритих лідарних даних для міста Берген, Норвегія нами були вилучені *LOD1* моделі будівель за допомогою інструменту *ELiT – BERA*, з включеною опцією генерації ЦМР місцевості. Для порівняння отриманих результатів також наводиться модель цієї місцевості, але без рельєфу, побудована у середовищі *Mapbox* (рис.3.5.).

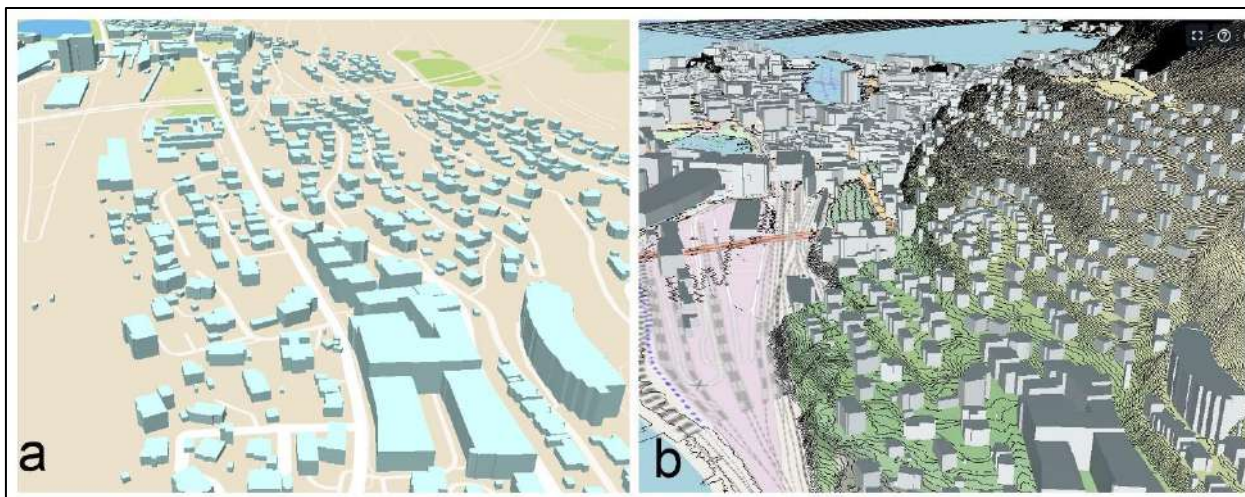


Рис.3.5. Порівняння тривимірних моделей фрагменту забудови м. Берген, Норвегія (а – модель забудови у середовищі *Marbox*, б – модель забудови, зіставлена із ЦМР у середовищі *ELiT*) (побудовано автором за даними [104]).

На рис. 3.5 добре простежуються переваги моделювання міської забудови разом із рельєфом міського середовища. ЦМР дозволяє отримати на порядок більше інформації про вертикальне планування міста. З цієї інформації, у свою чергу, можна виокремити такі УГС-властивості, які б упускалися під час аналізу звичайної тривимірної карти місцевості, як на рис.3.8а. Якщо раніше, при оцінці тієї чи іншої УГСит, помічалися такі властивості забудови, як її щільність, розміри будинків, наявність вільних просторів, транспортна доступність, то тепер до них додається, наприклад, фактор ризику потенційних затоплень чи зсувів. Крім того, із побудовою ЦМР змінюється і уявлення про стандартні властивості забудови [123]. Наприклад, при оцінці транспортної доступності будівель береться до уваги висота їх розташування – будівля може бути близько розташована до транспортного вузла або об'єкта обслуговування, якщо дивитися на плоску карту місцевості, але з урахуванням рельєфу місцевості, доступність такої будівлі істотно ускладнюється через звивистий гірський шлях, що веде до неї. Також змінюється й сприйняття вільних просторів між будинками – без урахування рельєфу вони вказують на комфортне проживання в районі або неефективне

використання території, але з рельєфом може з'ясуватися, що в таких просторах просто знаходяться занадто круті схили, непридатні для забудови.

Таким чином, побудова ЦМР може суттєво розширити можливості УГС-аналізу міста. Причому для міст з не рівнинною місцевістю така модель є вкрай необхідною, адже, як було показано, вона повністю змінює сприйняття УГСит. ЦМР також сприяє переосмисленню існуючих патернів геоситуацій. Так, на основі розширених параметрів міської місцевості, які відкриваються при суміщенні моделі забудови з моделлю рельєфу, можна серед високорангових патернів виокремити нові низькорангові патерни за ознакою крутизни забудованої місцевості. Забудови рівнинної або горбистої місцевості будуть двома принципово різними патернами геоситуацій, зі своїми властивостями та умовами, навіть якщо об'єм будівель та їх кількість в обох патернах будуть однаковими. Все вищесказане ще більше зміцнює важливість застосування лідарних даних у муніципальних дослідженнях.

3.1.2. Аналіз у середовищі QGIS просторового розподілу патернів урбаністичних геоситуацій по території міста.

Оскільки при оцінці та аналізі патернів УГСит передусім розглядаються кількісні та геометричні характеристики будівель, доцільним буде виокремити ці характеристики та занести їх до таблиці атрибутів векторного шару цих патернів у ГІС та у подальшому використовувати функціональність геоінформаційної системи для їх перегляду. Це дозволить візуалізувати розподіл щільності забудови в масштабі цілого міста в більш наочному формалізованому вигляді двовимірної карти та виявити загальний тренд розподілу УГС-властивостей у місті. Для виконання цього завдання доцільно використовувати настільний ГІС-застосунок *QGIS 3.16*.

Оскільки урбаністичні геоситуації в контексті міської забудови часто мають досить складні та розмиті межі, для їх моделювання пропонується за екстентом міської території згенерувати сітку, що складається з безлічі однакових полігональних осередків. Кожен такий осередок і буде

представлена окремою УГСит. Сітку можна створити за допомогою спеціального інструменту *QGIS Create Grid* – у налаштуваннях потрібно лише задати форму осередків (припустимо, шестикутний ромб), їх розмір (0.13 км²) та шар, який вони охоплюватимуть (у даному випадку, це футпринти будівель досліджуваного міста) [170]. В результаті до проекту додається новий полігональний шар сітки, що покриває екстент шару, вказаного раніше в налаштуваннях. Осередки цієї сітки є окремими сутностями, до яких можна занести атрибутивну інформацію.

Для розрахунку щільності забудови по осередках УГСит можна використовувати інструмент *QGIS Join attributes by location (summary)*. Цей інструмент дозволяє перенести атрибути з одного шару до іншого за просторовим перетином цих шарів. В даному випадку необхідно перенести інформацію про площу будівель із шару футпринтів у шар УГСит. Для цього в налаштуваннях інструменту потрібно вибрати базовий шар (сітка) і шар, що приєднується (футпринти). Потім вибирається геометричний предикат, з урахуванням якого визначатиметься просторове відношення між об'єктами обох шарів (у даному випадку обирається предикат *'Intersect'* – атрибути передаються лише з перетину об'єктів) [15]. Нарешті, обираються поля атрибутів, які необхідно приєднати, а також спосіб статистичного зведення (для розрахунку щільності береться поле з площею будівель, а у якості способу зведення – підсумовування цього показника). В результаті, для кожного осередку розраховується сумарна площа забудованої місцевості на основі атрибутивних даних про площу будівель, вилучених із шару футпринтів. За отриманим показником площі можна розрахувати частку забудови УГСит у відсотковому вираженні, що буде інформативно при побудові тематичної карти. Для розрахунків та візуалізації розподілу щільності міської забудови за допомогою описаного підходу нами обрано місто Вашингтон, що має компактне планування та різноманітну забудову, що чудово підходить для демонстративних цілей (рис.3.6).

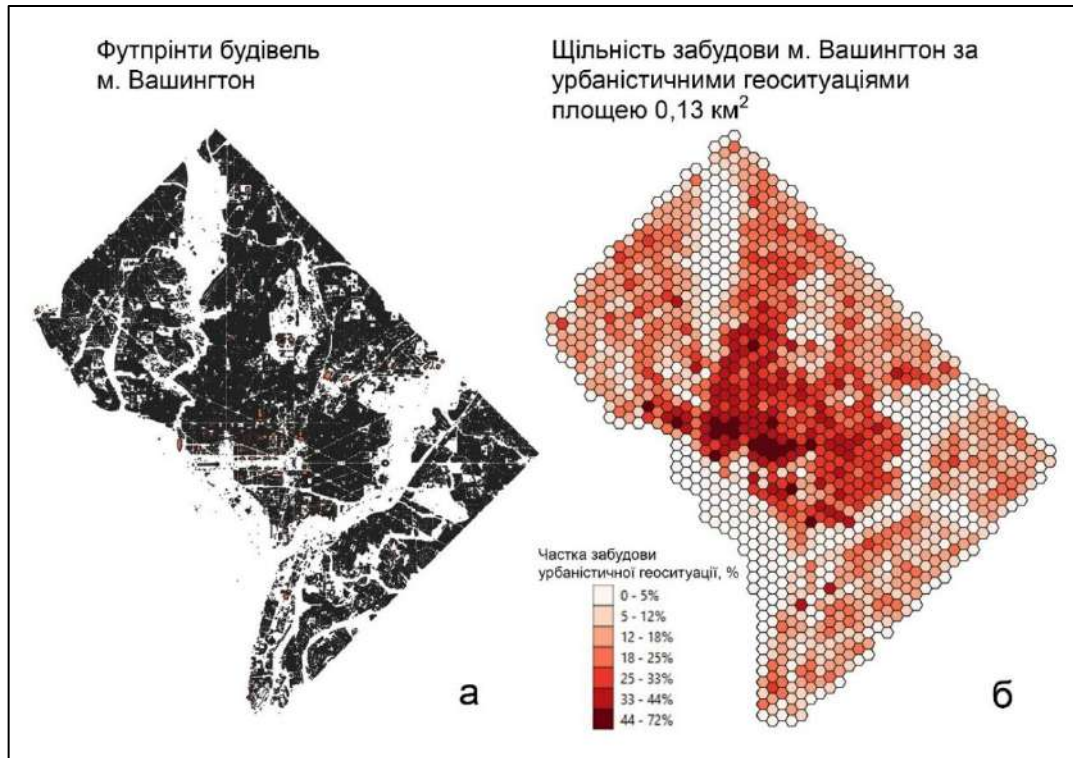


Рис.3.6. Візуалізація щільності забудови м. Вашингтон за допомогою *OSM*-футпринтів будівель та формалізованих УГСит (побудовано автором за даними [132])

Така візуалізація щільності забудови за допомогою сітки добре демонструє загальний тренд зміщення щільності забудови у міському середовищі та вектор урбаністичних процесів у цьому місті. Так, на рис.3.5б чітко виділяється певне ядро міста у вигляді скупчення УГСит, забудованих більш ніж 44%. Потім спостерігається поступове зниження цієї частки переважно у північному та східному напрямку, що характеризує основні вектори розширення та ущільнення міста. При цьому, на карті футпринтів будівель такий розподіл щільності у тому ж масштабі майже не відстежується.

Серед іншого, карта на рис.3.5б дозволяє відстежити патерни УГСит, в якості яких можна прийняти скупчення осередків, що належать до спільного класу на тематичній карті. Так, в околичних районах можна побачити їх різні кластери, забудовані на 5-12%, 12-18% і 18-25% – в межах кожного з них, ймовірно, забудова матиме схожі властивості, за рахунок яких і формуються патерни УГСит.

Аналогічним чином можна розрахувати та візуалізувати інші показники, що характеризують особливості міської забудови. Наприклад, для кращого розуміння специфіки розподілу щільності забудови, можна побудувати карти розподілу середньої площі будівель та середньої кількості (рис.3.7).

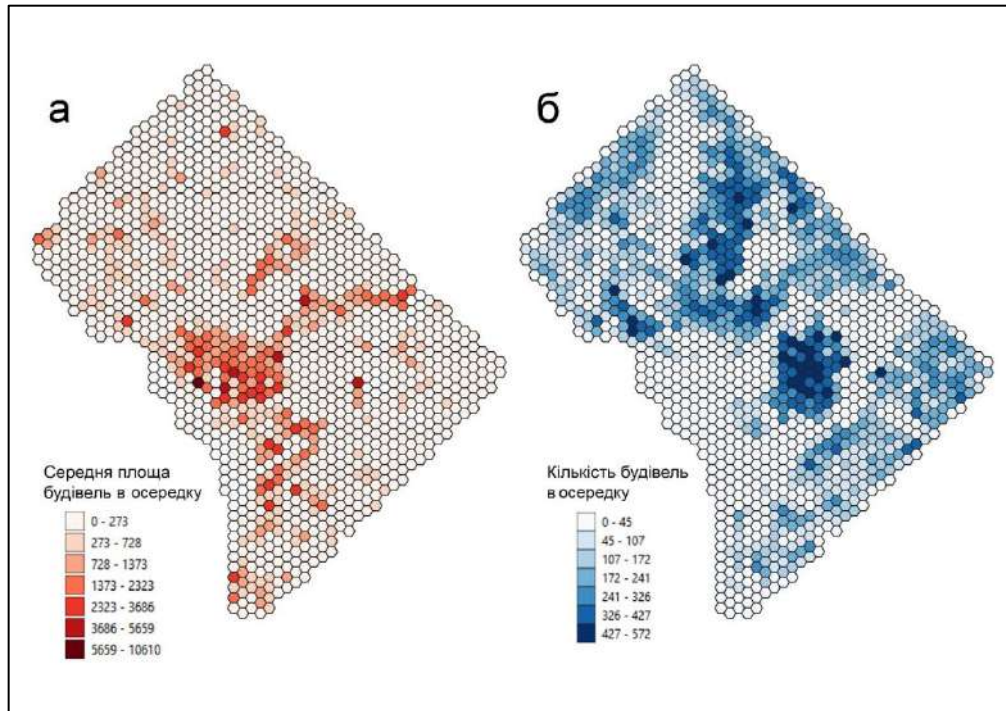


Рис. 3.7. Візуалізація розподілу середньої площі будівель (а) та кількості будівель (б) за осередками площею 0.13 км^2 у м. Вашингтон. (побудовано автором за даними [132])

Карта на рис. 3.7а показує, що більшість міста має малоповерхову забудову будинками площею менш ніж 273 м^2 – така забудова зазвичай властива житловому типу ЗК. На карті також явно виділяється центральна частина міста, забудована масивними, високоповерховими офісними та торговими будинками, а також окремі кластери УГСит з великими будинками, характерними для високоповерхових житлових масивів, індустріальних та інституційних зон.

Карта на рис.3.7б, у свою чергу, добре показує неоднорідність розподілу щільності забудови на ділянках з переважаючими будинками малої площі. Насамперед тут добре виділяються житлові райони з різним плануванням та різним ступенем щільності забудови. Найбільш помітним є наближений до

центру міста житловий район, що складається з геоситуацій, що включають до 572 будівель. Частка забудованої території тут може досягати до 44%, що є суттєвим показником у порівнянні з рештою житлових районів міста, проте він цілком зрозумілий з урахуванням наближеності району до центру міста. Такий тип житлової забудови, ймовірно, виявився проблемним або неефективним, внаслідок чого надалі місто забудовувалося житловими районами з більш вільним і розміреним плануванням.

Загалом обидві карти з рис.3.7. розбивають зміст поданої раніше карти щільності на дві частини та показують два різні аспекти щільності міської забудови: у першому випадку висока щільність досягається за рахунок великої площі будівель, у другому – за рахунок великої кількості. Ці карти також добре демонструють властивості забудови основних типів ЗК в цьому місті: велику кількість малих будівель для житлового типу, і малу кількість великих будівель інших типів. Можна вважати, що на карті щільності з рис.3.6. відображено високорангові патерни УГСит (утворені за більш узагальненою властивістю), а на наступних двох картах – низькорангові.

Як уже повідомлялося в попередньому розділі, геоситуативний підхід добре поєднується зі специфікою зберігання й обробки лідарних даних формату *LAS*, які після виконання лідарної зйомки розбиваються на безліч тайлів з однаковою площею. За допомогою інструментів обробки лідарних даних *ELiT* ми можемо змоделювати будівлі за такими тайлами, а потім виокремити висоти отриманих будівель у спеціальну *CSV*-таблицю та перетворити її у шар центроїдів у середовищі *QGIS*. Потім з використанням описаного раніше інструменту *Join attributes by location* за даними про висоти будівель можуть бути розраховані середні значення висот шар тайлів лідарних даних і виконана відповідна візуалізація (рис.3.8.).

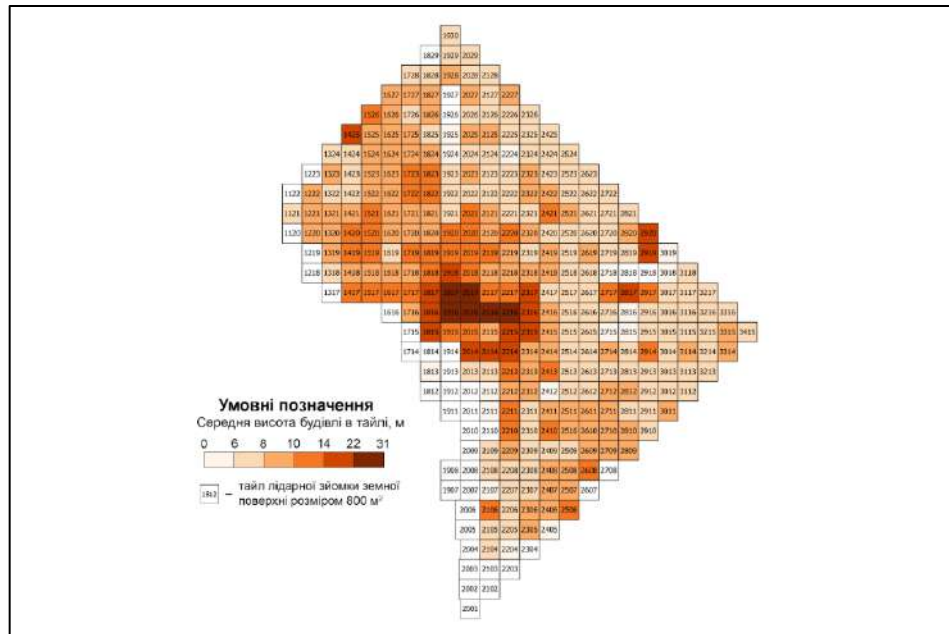


Рис.3.8. Візуалізація розподілу висоти будівель за тайлами лідарних даних м. Вашингтон площею 0.6 км² (побудовано автором за даними [132])

Загальний тренд розподілу висоти будівель у місті Вашингтон у першому наближенні має вагомому кореляцію з трендами розподілу щільності забудови, які були продемонстровані раніше (рис. 3.9). Найвищі будівлі властиві центральній частині міста, в якій переважає комерційний тип ЗК, після чого спостерігається поступове зниження середньої висоти будівель у напрямку до периферії міста, де переважає вже житловий тип. При цьому, в житловому секторі фіксується як мінімум 3 різні патерни геоситуацій, яким властива середня висота забудови 6-8 м, 8-10 м і 10-14 м. Зіставивши ці дані з попередніми картами можна отримати цілком ясне уявлення про загальні пропорції розселення міського населення. Так, районам, у яких зосереджена велика кількість високих будівель, зрозуміло, буде властива більша чисельність населення, на відміну від районів, забудованих низькими будинками. Якщо задіяти в розрахунках дані про населення з переписних ділянок, то можна отримати ще більш докладну інформацію про приблизну кількість жителів, які заселяють той чи інший район – подібній оцінці чисельності населення в нашій роботі буде присвячений окремий розділ.

За показниками сумарної кількості будівель, середньої площі та середньої висоти будівель у м. Вашингтон, порахованих для 350 тайлів лідарної зйомки, площею 0.6 км², побудовано графіки парних кореляцій (рис.3.9).

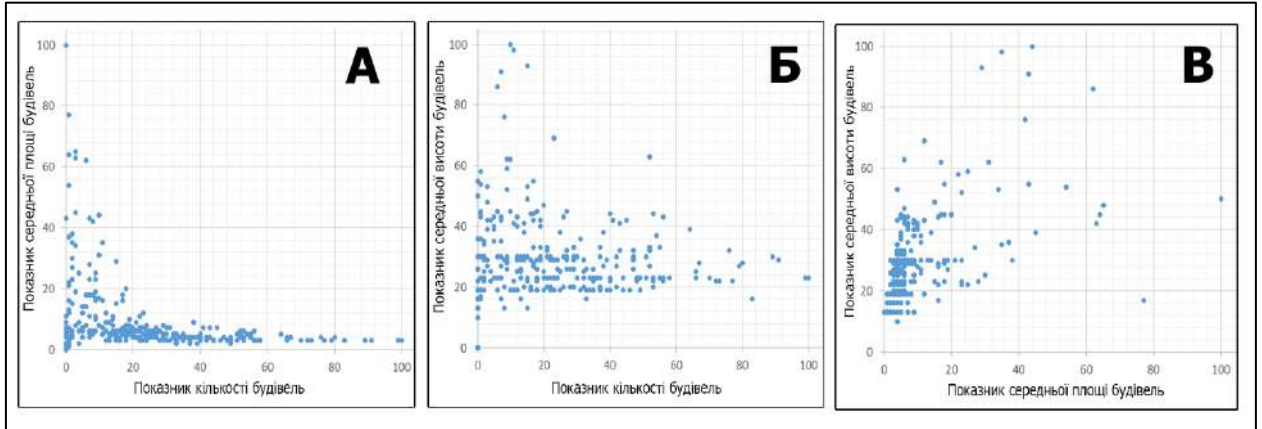


Рис.3.9. Кореляція показників щільності забудови у м. Вашингтон за тайлами лідарної зйомки площею 0.6 км².

За графіками добре простежується взаємозалежність окремих параметрів забудов у м. Вашингтон. Так, якщо розглядати кореляцію кількості та середньої площі будівель, то тут спостерігається цілком зрозуміла зворотня пропорційність, про яку вже зазначалося раніше – зі збільшенням кількості будівель, знижується їх середня площа, при цьому достатньо висока щільність забудови зберігається (рис 3.9А). Якщо розглядати кореляцію кількості та середньої висоти будівель, то тут простежується менш виражена пропорційність. Висота забудови у місті розподіляється досить нерівномірно і характерна для ділянок з різною кількістю будівель (рис. 3.9Б). У той же час, співставлення середньої площі та висоти будівель демонструє дещо більшу пропорційність, яка полягає у тому, що зі збільшенням середньої висоти забудови, збільшується й середня площа будівель, максимальні значення яких зосереджуються саме в центральній частині міста, що чітко відображалося на відповідних картах (рис. 3.9В).

3.1.3. Відстеження змін у забудові окремих геоситуацій у середовищі *City Change Management*.

Стосовно аналізу міського середовища на рівні УГСит варто розглянути ще один сценарій обробки лідарних даних, який полягає у відстеженні змін у міській забудові, що сталися у певний період. Для цього необхідно два фрагменти лідарних даних, які покриватимуть одну й ту саму місцевість, але між різними часовими реперами [34]. В результаті такого зіставлення можна виявити об'єм нових будівель, споруджених за зазначений період, а виходячи з цього обчислити динаміку забудови тієї чи іншої геоситуації. Або навпаки: можна виявити об'єм знесених будівель і обчислити, наприклад, інтенсивність руйнувань території, спричинених стихійними лихами чи військовими діями. Використання геоситуаційного підходу при цьому є найбільш доречним рішенням, адже зміни у міській забудові мають скоріше ситуативний характер, а не повсюдний. Зазвичай зміни відбуваються в окремих районах, що забудовуються, або тих, які особливо зазнають певних пошкоджень – ці райони і становлять інтерес в якості мінливих УГСит, за якими можна зіставити лідарні дані.

Пошук та виявлення УГСит, що характеризують зміни у міській забудові, є окремим попереднім етапом цього дослідження. Тут можна використовувати програму *Google Earth*, яка дозволяє перемикатися між знімками земної поверхні, отриманими в різний час, і таким чином візуально фіксувати різні зміни на поверхні [109]. Обстеживши певну міську територію таким чином, ми можемо виділити деякі ділянки, в яких візуально простежуються зміни в самій забудові. Ці ділянки і будуть тими УГСит, за якими необхідно обчислити об'єм і характер змін за допомогою лідарних даних.

Для зіставлення лідарних даних та отримання змін нами використовується інструмент настільного додатку *City Change Management (CCM) – Building Change Detector*. Він приймає на вхід два набори LAS-файлів (первинний та вторинний), виконує за ними ВП-моделювання будівель,

накладає їх один на одного і в результаті виокремлює моделі змін до окремого шару об'єктів [37]. При візуалізації результатів ці моделі відображаються разом з незмінними моделями забудови, але підсвічуються окремим кольором (рис.3.10). У якості прикладу для реалізації цього користувацького сценарію нами обрано фрагмент забудови в м. Талін, Естонія – він відноситься до порівняно нового району міста, яке частково забудовувалося з 2017 по 2021 роки.

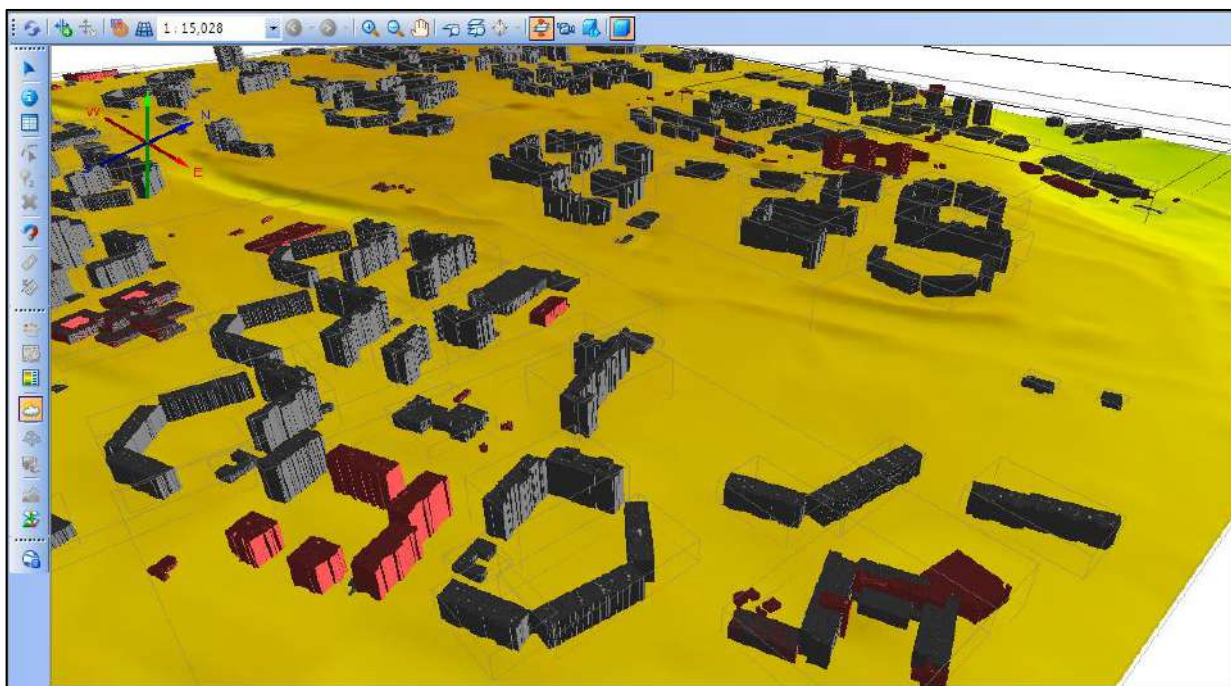


Рис.3.10. Візуалізація у середовищі *ССМ* змін у забудові м. Талін, Естонія, що відбулися в період між 2017 і 2021 роком (побудовано автором за даними [84]).

Виокремлені зміни у даній геоситуації переважно характеризують нові будівлі, прибудови та споруди, що з'явилися після 2017 року. На ділянці площею 4 км² всього вилучено 36 змін та 31 з них відносяться до типу 'додано'. За отриманими результатами можна відстежити різні тенденції у міському розвитку: вивчити типи нових будівель, їх розміри, планування, темпи побудови тощо. Якщо ж це знесені будівлі, то за такими результатами можна виявити основні осередки руйнувань, оцінити ступінь завданих збитків та

розробити оптимальні рішення щодо відбудови зруйнованих будівель на основі наявних архівних моделей цих будівель.

До шару змін додається таблиця атрибутів, у якій записані тип, координати, площа та об'єм кожної зміни. Цю таблицю можна експортувати в CSV-форматі і оцифрувати у вигляді центроїдів змін у *QGIS* по полях з координатами. Центроїди тепер можна співставити за просторовим розташуванням з *OSM*-футпрінтами будівель і отримати візуалізацію змін у поточній УГСит в більш гнучкій для просторового аналізу ГІС (рис.3.11).

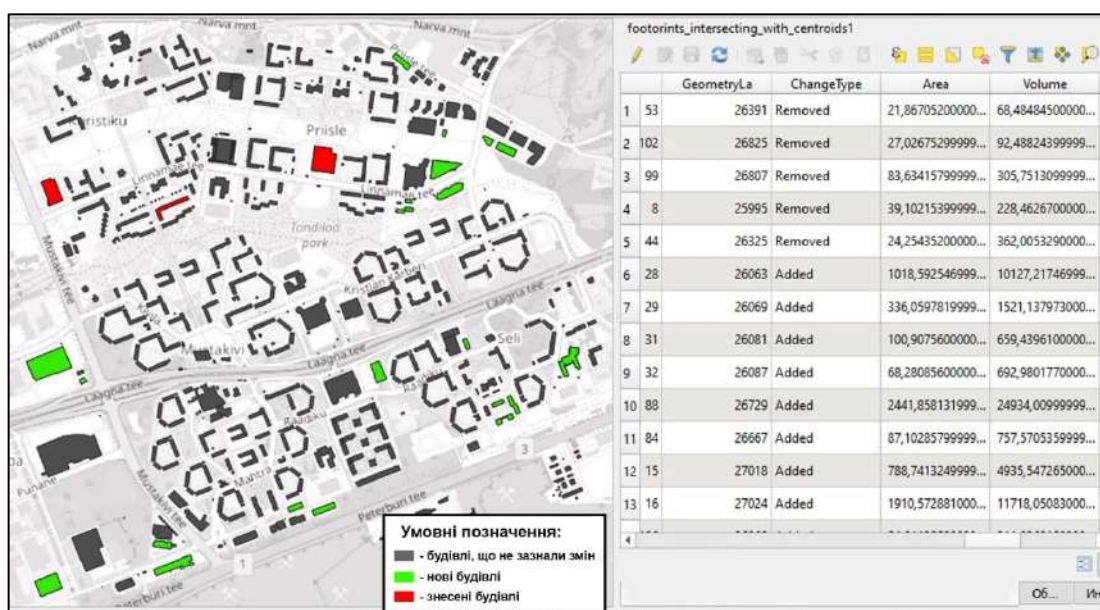


Рис.3.11. Візуалізація у середовищі *QGIS* змін у забудові м. Талін на прикладі окремої УГСит площею 4 км² (побудовано автором за даними [84]).

Систематизація результатів відстеження змін у ГІС-середовищі відкриває низку можливостей для УГС-аналізу міста у контексті дослідження змін у його забудові [37]. На основі геометричних характеристик змін можна будувати карти розподілу динаміки змін, аналогічні картам щільності забудови, продемонстрованим раніше. Так, маючи набір даних, що покриває достатньо велику міську територію, ми можемо візуалізувати, наприклад, середній об'єм, площу, частку змін на одиницю площі за умовними УГСит. З такої візуалізації можна отримати деякі УГС-властивості міста, що характеризують динаміку його забудови та загальні тренди міського

будівництва. Так, використання інформації про типи ЗК з відкритих баз даних дозволить відстежити, наприклад, які типи забудовуються найактивніше, якими саме будинками забудовуються житлові райони, наскільки вони відповідають темпам приросту міського населення, тощо. Крім того, інформацію про інтенсивність міського будівництва можна співставити з поточними соціальними, економічними та демографічними показниками досліджуваного міста та на основі цього дати комплексну оцінку міського розвитку.

Підсумовуючи цей підрозділ, відзначимо, що існує ще безліч різних завдань і користувацьких сценаріїв, які можуть бути реалізовані з використанням результатів тривимірного моделювання міст і ГІС на рівні УГСит. Частина цих сценаріїв ще будуть розглянуті в наступних підрозділах. Перевага описаного геоситуаційного підходу полягає у тому, що він дозволяє в умовах обмежених наборів даних або обмежених обчислювальних ресурсів проводити низку важливих досліджень міського середовища, які дають достатньо змістовні результати. З цих результатів, отриманих з обраних УГСит, можна виводити ряд УГС-властивостей міста, а також загальні відомості про функціонування цілої УГС, що було продемонстровано на численних прикладах у цьому розділі.

3.2. Перший прикладний аспект урбогеосистемного аналізу – реалізація користувацького сценарію оцінки чисельності міського населення по геометрії забудов.

В умовах стрімких темпів розвитку міст для надійного контролю внутрішніх міських процесів найважливішою вимогою є висока частота оновлення даних щодо всі системних компонентів міста. Незадоволення цієї вимоги призводить до того, що актуальність зібраних даних швидко знижується, і у разі, коли необхідно виконати терміновий аналіз міської ситуації, наявна в міській базі даних інформація може вже не відповідати

дійсності, що може призвести до помилкових результатів аналізу та подальших помилкових рішень та висновків. З цих причин застосування деяких традиційних методів збору даних може бути вже не настільки ефективним і доцільним, особливо з приходом діджиталізації суспільства. Зокрема, це стосується і традиційних методів проведення перепису населення, який у розвинених країнах проводиться зазвичай кожні 5-10 років. Дані, зібрані таким чином, хоч і є більш точними і несуть у собі велику повноту демографічних ознак, таких як стать, вік, національність та склад сім'ї, однак, збір та систематизація цих даних є досить складним та часвитратним процесом, що не дозволяє відтворювати його з частотою, яку часом вимагають сучасні темпи урбанізації. Саме тому, а також завдяки стрімкому розвитку інформаційних технологій, для забезпечення більшої регулярності отримання таких даних, в останні десятиліття різними національними агентствами та міжнародними організаціями все більше використовується низка методолого-технологічних інновацій, покликаних автоматизувати процес оцінки чисельності населення та інтегрувати його в загальні системи міського моніторингу та прийняття рішень [124].

Сучасні методи оцінки чисельності населення у містах часто ґрунтуються на аналізі сторонніх даних, які можуть опосередковано виступати індикатором чисельності населення на певній територіальній одиниці та у певний момент часу. Прикладами таких даних є дані з нотаріально-адміністративних записів та державних реєстрів, таких як реєстри платників податків, бази даних про охорону здоров'я та освіту, що містять точну інформацію про кількість зареєстрованого населення тієї чи іншої соціальної та вікової групи. Аналіз подібних даних ґрунтується на обчисленні кореляційного зв'язку між певним відносним показником такого роду та загальною чисельністю населення по переписних ділянках [82]. Такі методи можуть бути ефективними допоміжними методами, що дозволяють відстежити динаміку населення на коротких інтервалах у період між проведенням планових переписів населення, проте при дослідженнях великих

міст, сам збір та систематизація даних з різних реєстрів, може також бути надто складним процесом.

Більш ефективними в цьому плані є різні геопросторові методи оцінки населення, які також передбачають встановлення кореляційного зв'язку з чисельністю населення, але вже з використанням більш відгалужених, геопросторових даних, зокрема отриманих шляхом проведення ДЗЗ та формалізованих у ГІС-додатках. Регулярно оновлювані дані ДЗЗ дозволяють отримати актуальну інформацію про типи ЗК, щільність житлової забудови, кількісні та геометричні характеристики будівель, яка чітко вказує на щільність розподілу міського населення і з якої, за допомогою спеціальних геостатистичних методик, можна вирахувати очікувану кількість населення, що проживає в тому чи іншому районі міста [100, 101].

Будь-яка міська територія має чіткі індикатори концентрації населення, які можуть бути виявлені з використанням лідарних даних та супутникових знімків, а потім оцифровані та зіставлені з наявними переписними даними за допомогою регресійних моделей. Наприклад, за супутниковими даними можна дешифрувати чіткі ознаки житлових масивів будинків, а потім оцифрувати за ними житлові типи ЗК і дати їм певну оцінку населення, ґрунтуючись на зіставленні їх площі та переписних даних. Інформація про кількість, площу та об'єм будівель, витягнута з даних лідарної зйомки, додатково коригуватиме оцінку населення в тому чи іншому житловому масиві, віддаючи більшу вагу більш урбанізованим і високоповерховим ділянкам. Лідарні дані, до того ж, при детальному моделюванні можуть дати корисну інформацію про архітектурно-морфологічні властивості будівель, що в сукупності з геометричними характеристиками дозволить точніше виявити високодиференційовану житлову забудову, розбити її на підтипи та деталізувати оцінку населення [82].

Таким чином, використання лідарних даних дозволяє звести оцінку чисельності населення від рівня цілих міських районів, переписних ділянок та житлових масивів до рівня найменших територіальних міських одиниць –

окремих будівель. Ця процедура може бути реалізована в рамках одного з сценаріїв користувача на основі наборів тривимірних моделей будівель для цілих міст, отриманих в результаті НП-моделювання.

Пропонований нами підхід заснований на принципах локалізованого урбогеосистемного аналізу, який зосереджений на дослідженні окремих УГСит, виявленні відмінностей та залежностей між окремими міськими одиницями, виявленні унікальних властивостей міських забудов, які можуть бути втрачені при аналізі на більших просторових одиницях тощо [212]. У контексті оцінки чисельності населення такий аналіз полягає у виявленні деталізованого просторового градієнту даного показника в межах кожної окремої ділянки перепису населення.

При виконанні звичайного УГС-аналізу, оцінка чисельності населення була б виконана лише на рівні переписних ділянок, де кожній окремій ділянці було б присвоєне одне сумарне значення чисельності населення, рівномірно розподілене у межах таких ділянок [124]. Картографування цього показника показало б загальні тренди розподілу населення у міському середовищі, проте не здатне було б відобразити причини такого розподілу. У свою чергу, локалізований УГС-аналіз розбиває цей показник за окремими одиницями міської забудови пропорційно їх геометричним та семантичним характеристикам (рис.3.12). Це дозволяє окрім особливостей кількісного розподілу населення у кожній переписній ділянці, показати ще й конкретні причини такого розподілу, які можуть полягати, наприклад, у щільності забудови, переважанні житлової забудови, переважанні високоповерхової забудови, тощо.

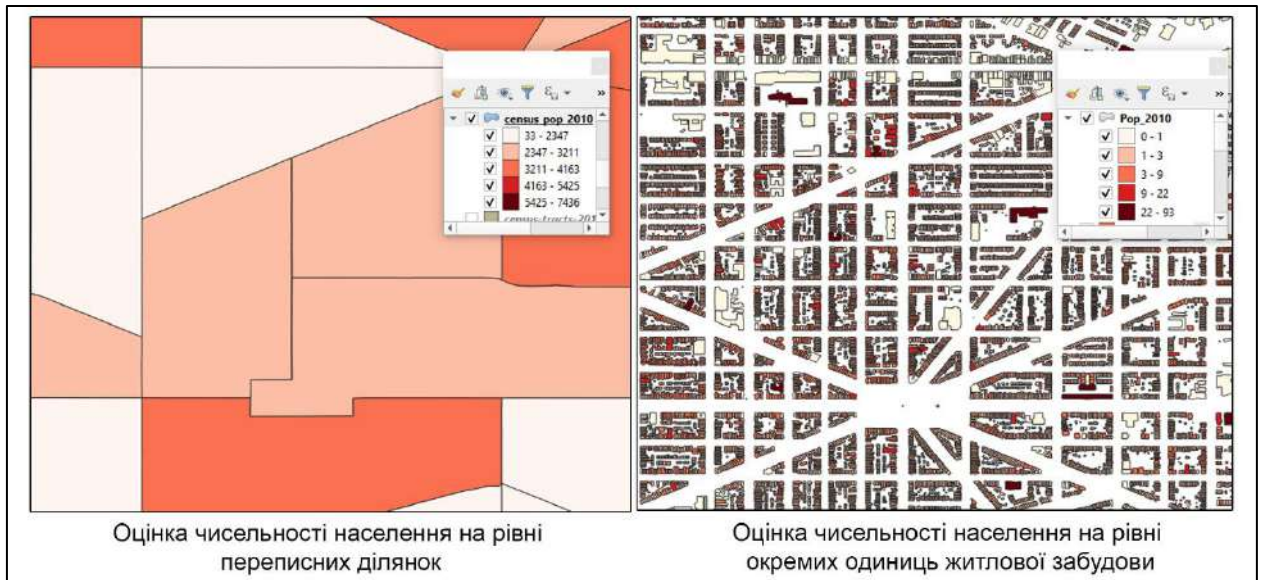


Рис.3.12. Порівняння результатів УГС-аналізу розподілу чисельності населення та локалізованого УГС-аналізу (побудовано автором за даними [132]).

Ключовий етап оцінки чисельності населення в рамках зазначеного користувачького сценарію полягає у зіставленні наявних переписних даних на певну міську територію з геометричною інформацією тривимірних моделей будівель цієї території, та подальшому розподілі цих даних між будинками у пропорційному відношенні. Для виконання цієї процедури нами пропонуються площе-метричний (ПМ) та об'ємо-метричний (ОМ) методи.

3.2.1. Площе-метричний та об'ємо-метричний методи оцінки чисельності міських жителів.

Суть обох запропонованих методик полягає в оцінці гіпотетичної кількості населення у житлових будинках, представлених їх футпринтами та *LODI* моделями. ПМ-метод не потребує атрибутивних даних про кількість поверхів у будівлі, яку представляє модель, у свою чергу, для ОМ-методу ця інформація є обов'язковою [212]. Обидва підходи дозволяють розрахувати очікуване населення на мікрорівні в межах переписних ділянок з огляду на специфічні характеристики кожної будівлі.

Оскільки йдеться про оцінку населення у житловій забудові, попередньо має бути виконана фільтрація моделей будівель за їх типом користування. Для розподілу чисельності населення приймаються лише будівлі житлового типу, проте при візуалізації результатів у 3D-сцені мають бути відображені й будівлі інших типів, щоб можна було відстежити просторові залежності між різними функціональними зонами міста.

Попередня фільтрація також має бути застосована за мінімальним розміром футпринту будівлі (наприклад, 30 м²). Це необхідно для того, щоб виключити з розрахунків різні нежитлові будівлі та конструкції, які можуть бути помилково позначені як житлові (йдеться про різні гаражі, курники, будки тощо).

Футпринти разом із даними за типами будівель або типами ЗК можуть бути завантажені з *OpenStreetMap* у середовище *QGIS*, де вже за допомогою різних інструментів вибірки та фільтрації можна виконати необхідну передобробку. Окрім того, у середовище *QGIS* мають бути завантажені полігони переписних ділянок обраного міста з атрибутивною інформацією щодо чисельності населення [36].

В рамках зазначених методик оцінка чисельності населення для *LODI* моделей нами виконується за формулами, що нами застосовувалися у дещо іншій редакції формул із близького за предметним контентом дослідження дослідження [139]. В даному дослідженні переписне населення пропорційно розподілялося за житловими ділянками, в залежності від обсягу території, яку який вони охоплювали. Нами же, з адаптацією до УГС-підходу, пропонується аналогічний пропорційний розподіл переписного населення, але вже за конкретними будівлями в залежності від їх площі та об'єму, що виокремлюються з лідарних даних, тому формули оцінки чисельності населення матимуть наступний вигляд:

ПМ-метод з використанням даних про футпринти, що приписані до геометричних атрибутів моделей:

$$BP_i = \left(\frac{CP}{\sum_{k=1}^n BA_k} \right) BA_i \quad (3.1)$$

де BP_i – кількість мешканців будівлі i ; CP (*census population*) – кількість мешканців у всіх будинках житлового фонду даної переписної ділянки; BA_i – площа футпринту будівлі i (m^2); BA_k – сумарна площа футпринтів будівель у межах переписної ділянки; n – кількість житлових будинків в межах цієї переписної ділянки.

ОМ-метод з використанням інформації про кількість поверхів, що приписана до семантичних атрибутів моделей:

$$BP_i = \left(\frac{CP}{\sum_{k=1}^n BA_k \times BF_k} \right) BA_i \times BF_i \quad (3.2)$$

де BF_i – кількість поверхів будівлі i (m^2); BF_k – сумарна кількість поверхів у будинках у межах переписної ділянки. За відсутності готової семантичної інформації про кількість поверхів будівлі, цей параметр може бути приблизно обчислений з висоти будівлі, отриманої з *LOD1* моделі, якщо за критерій взяти стандартну висоту одного поверху.

Якщо задіяти в розрахунках більш точні моделі *LOD2*, *LOD3*, то доцільніше буде використовувати наступні формули:

Метод, що використовує середню висоту будівель:

$$BP_i = \left(\frac{CP}{\sum_{k=1}^n BA_k \times BH_k} \right) BA_i \times BH_i \quad (3.3)$$

де BH_i – висота будівлі i (m^2); BH_k – сумарна висота будівель у межах переписної ділянки.

Метод, який використовує об'єм будівель:

$$BP_i = \left(\frac{CP}{\sum_{k=1}^n BV_k} \right) BV_i \quad (3.4)$$

де BV_i – повний об'єм будівлі i (m^3); BV_k – сумарний об'єм будівель у межах переписної ділянки. Об'єм будівлі визначається за його повноформатною моделлю – це може бути високополігональна або низькополігональна модель стандарту *CityGML* [64].

Таким чином, описані методи можуть бути застосовані при різному ступені наповненості наявних даних та різному ступені їх точності. Графічна ілюстрація змісту зазначених формул представлена на рис.3.13.

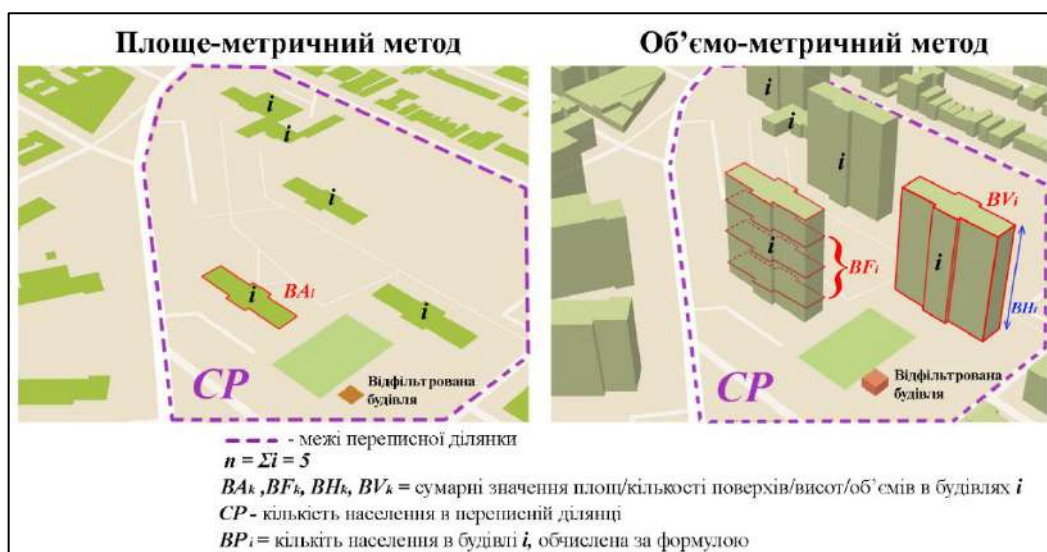


Рис.3.13. Графічна ілюстрація змісту рівнянь для оцінки чисельності населення ПМ- та ОМ-методами.

Після виконання розрахунків, кожному житловому будинку призначається власне значення чисельності населення, яке залежить від величини його геометричних та семантичних характеристик. Використовуючи отримані дані, можна зворотним чином розрахувати чисельність населення для будь-якої обраної області інтересу у місті, що не збігається з межами переписних ділянок, наприклад, для окремих житлових масивів, окремих кварталів та вулиць [124]. Для цього необхідно підсумувати кількість населення в будинках, які потрапляють до обраної сфери інтересу:

$$BP_{AOI} = \sum_{i=1}^m BP_i \quad (3.5)$$

де BP_{AOI} – змодельована кількість жителів у межах цієї області інтересу;
 m – кількість житлових будинків, яка потрапляє до межі даної області інтересу; BP_i – кількість мешканців в одній із будівель i даної області інтересу.

Порівнюючи описані методики оцінки чисельності населення, слід зазначити, що при аналізі багатоповерхової міської місцевості ОМ-метод буде кращим вибором, адже він дає набагато точніший результат, особливо з використанням моделей $LOD2/LOD3$ або високополігональних моделей [65].

Однак, для використання цього методу потрібно більше змінних, що дещо ускладнює розрахунки. ПМ-метод є оптимальним рішенням для аналізу одноповерхової сільської забудови, в якій площа будівель добре корелює з їх об'ємом, тому розраховане населення пропорційно буде однаковим, незалежно від обраної методики. Крім того, для ПМ-методу потрібні лише футпринти будівель, що дозволяє розрахувати чисельність населення в будинках ще до побудови їх моделей, а потім просто перенести в моделі отриману інформацію і одразу перейти до візуалізації.

3.2.2. Операційна послідовність реалізації даного користувачького сценарію.

Для виконання основної частини обчислювальних процедур в рамках даного сценарію користувача потрібна будь-яка повноформатна ГІС, в якій підтримані формати *SHP* і *CSV* і реалізована базова функціональність просторової та атрибутивної вибірки з калькулятором полів. Ці вимоги повністю задовольняються в системі *QGIS*, тому саме на її прикладі буде продемонстровано операційну послідовність оцінки чисельності населення у міській забудові.

1. *Збір та передобробка даних.* Для виконання розрахунків у *QGIS* попередньо мають бути зібрані дані на обрану територію з різних джерел та складено базу геоданих, яка має включати (рис. 3.14):

- *SHP*-полігони переписних ділянок з прив'язаними до них даними з перепису населення. Зазвичай такі дані можуть бути вилучені з державних та міських статистичних служб або у вигляді таблиць з ідентифікаторами по кожній переписній ділянці, які додатково потрібно буде геокодувати, або у вигляді готових *SHP*-файлів.
- *SHP*-полігони типів ЗК на вибрану територію, які можуть бути завантажені або з *OpenStreetMap*, або з відкритої бази даних геопорталу вибраного міста. В цих даних не буде необхідності, якщо інформація про типи будівель за замовчуванням міститься в *SHP*-футпринтах будівель.

- футпринти будівель, що містять інформацію про площу кожної будівлі, а також, за наявності, інформацію про кількість поверхів у будинках та тип користування кожної будівлі.

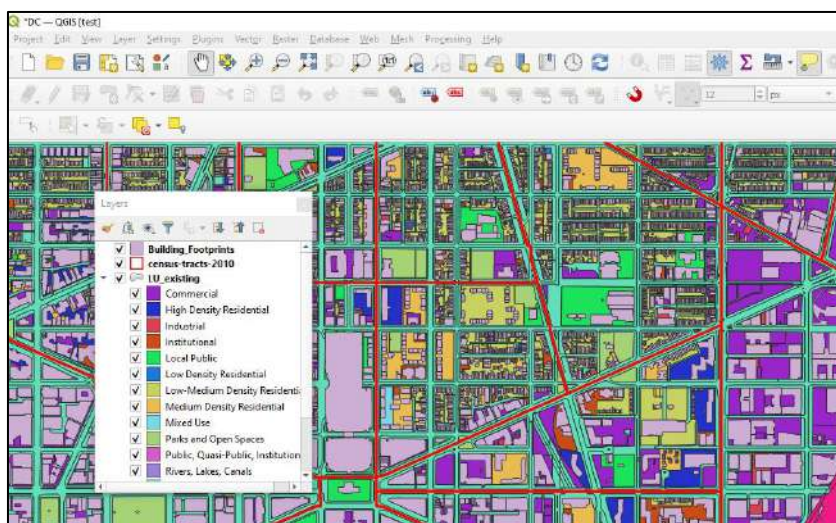


Рис. 3.14. Візуалізація початкового набору даних для оцінки чисельності населення серед *QGIS*.

Перелічених даних може бути достатньо для переходу до наступних процедур оцінки чисельності населення, якщо для цього буде використаний ПМ-метод або ОМ-метод, який використовує дані про кількість поверхів. В іншому випадку, в базу геоданих мають бути також завантажені геометричні дані (висота/об'єм) та просторові дані (*latitude/longitude*-координати) з побудованих для обраного міста тривимірних моделей будівель, що є окремим процедурним етапом, який потребує докладного пояснення.

1.1. Завантаження даних із тривимірних моделей будівель. Геометричні та просторові характеристики моделей побудованих за допомогою інструментів *BERA* або *BE* можна отримати з *JSON*-файлів, які генеруються для кожної *OBJ*-моделі будівлі та містять їх метадані. У *JSON*-файлах дані зберігаються у текстовому форматі у формі пар "ключ-значення". Дані всіх *JSON*-файлів для кожної моделі можуть бути зведені в одному файлі *CSV* за допомогою простого *python*-скрипту (бібліотеки *CSV*, *JSON*). Перш за все в такий файл мають бути внесені дані за ключами *latitude* (широта), *longitude* (довгота), *volume* (об'єм), з відповідними назвами полів, а також поле *name*,

значення якого беруться з назв файлів, що обробляються [124]. Таким чином, на вхід для обробки *python*-скриптом має бути подано директорію, в якій містяться *JSON*-файли всіх моделей, що покривають обрану територію. Після свого запуску, скрипт обробляє всі наявні *JSON*-файли і витягує з них значення заданих ключів у спеціальний *CSV*-файл, в якості вихідних даних. Отриманий *CSV*-файл вже може бути завантажений у *QGIS* і інтегрований у базу геоданих. Послідовність завантаження даних із моделей будівель в базу геоданих *QGIS* представлена на рис.3.15.

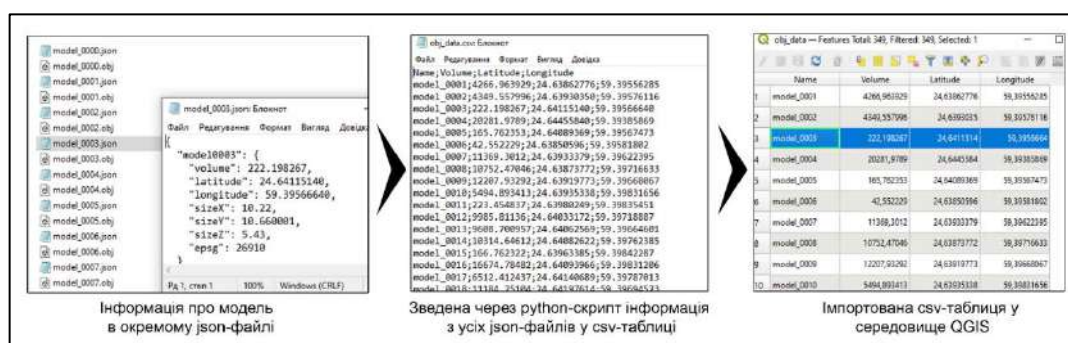


Рис. 3.15. Перетворення даних *JSON* на атрибутивну таблицю *QGIS*.

Для просторового зіставлення виокремлених даних моделей будівель з полігонами переписних ділянок, *CSV*-файл необхідно перетворити на точковий *SHP*-файл центроїдів будівель. Зробити це можна під час імпортування *CSV*-файлу в *QGIS*, використовуючи координати з полів *latitude*, *longitude* для локалізації кожної будівлі (меню *Layer->Add Layer->Add delimited text layer*). Таким чином, в базу геоданих завантажується шар центроїдів всіх змодельованих будівель з полем *volume* в таблиці атрибутів. При необхідності шар може бути перепроєктований відповідно до проекції інших шарів, завантажених у проект. Тепер у базі геоданих зібрані всі необхідні дані для виконання оцінки чисельності населення об'ємно-метричним методом (рис.3.16).

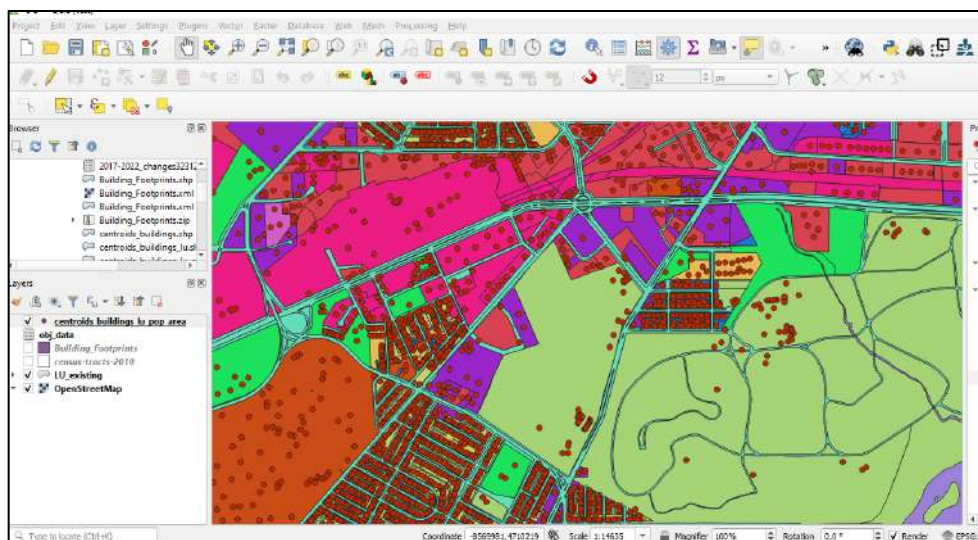


Рис.3.16. Візуалізація типів ЗК (полігони) з центроїдами будівель (точки) в інтерфейсі *QGIS*.

У разі, якщо для оцінки чисельності населення використовується ПМ-метод, пункт 1.1. можна пропустити, але тоді необхідно шар футпринтів будівель перетворити на точковий шар центроїдів цих футпринтів. Це можна зробити за допомогою інструмента *Centroids* (*Vector>Geometry Tools>Centroids*), в налаштуваннях якого потрібно просто вказати шар футпринтів та запустити розрахунок – в результаті до проекту буде додано шар центроїдів усіх футпринтів із збереженою атрибутивною інформацією [170]. На наступних етапах розрахунків до цього шару можуть застосовуватися ті ж процедури, що і до шару центроїдів моделей будівель.

2. *Об'єднання атрибутів.* Для виконання фільтрації нежитлових будівель і подальшого обчислення чисельності населення в будинках, що залишилися, в таблицю атрибутів шару центроїдів має бути внесена вся необхідна інформація з інших шарів. Цю процедуру можна зробити за допомогою інструмента *SAGA>Add polygon attributes to points* (додавання атрибутів полігонів до точок). Даний інструмент з панелі *Processing Toolbox* виконує зіставлення об'єктів вибраного точкового шару з об'єктами вибраного полігонального шару і на виході створює оновлений шар центроїдів із занесеною до його атрибутивної таблиці інформацією з полігонів, що вміщують їх [15]. Процедура додавання атрибутів виконується двічі –

спочатку у точковий шар переноситься інформація із шару ЗК, а потім із шару переписних ділянок. Таким чином, усі центроїди будівель, що потрапляють в одну переписну ділянку, матимуть однакові записи із сумарною чисельністю населення у переписній ділянці, те саме стосується типів ЗК.

3. *Фільтрація житлових будинків.* Для спрощення розрахунків об'єкти шару центроїдів будівель можуть бути на даному етапі відфільтровані за критерієм житлового типу ЗК. Для цього можна скористатися інструментом *Select features by Expression* і ввести у ньому вираз *'landuse is residential'* – у результаті буде виділено лише ті центроїди будівель, які, згідно з атрибутивною інформацією, належать до житлового типу забудови. Виділені об'єкти можна експортувати до нового шару (*Save selected features As*) і далі працювати тільки з ними (рис. 3.17). Аналогічним чином можна відфільтрувати будівлі за їх об'ємом за допомогою виразу *'volume > 100'*. Якщо в розрахунках задіяні центроїди футпринтів, то фільтрацію можна виконати за значенням їхньої площі (*'area > 30'*).



Рис.3.17. Фільтрація центроїдів житлових будівель.

4. *Розрахунок чисельності населення в будівлях.* Тепер, коли робота ведеться виключно з житловими будинками, спочатку потрібно розрахувати сумарний об'єм цих будівель для кожного з полігонів переписних ділянок. Зробити це можна за допомогою інструменту *SAGA->Add polygon attributes to points*, розташованого на тій же панелі *Processing Toolbox*. У налаштуваннях

інструмента необхідно в якості джерела даних вказати шар центроїдів та його поле *volume*, а в якості шару запису – шар переписних ділянок, а також вибрати функцію *sum*. У результаті, шар переписних ділянок буде доповнено новим полем – *sum_volume* (сумарний об’єм житлових будинків у кожній ділянці). Далі, отримані дані потрібно знову перенести в шар центроїдів, як це робилося раніше за допомогою інструмента *Add polygon attributes to points*. Для ПМ-методу замість значення об’єму у всіх описаних операціях приймається значення площі (*area, sum_area*).

Розрахунок чисельності населення виконується для шару центроїдів за допомогою інструменту Калькулятор полів. У налаштуваннях інструменту потрібно вказати назву поля, в яке вноситимуться значення розрахованого населення за будинками – *building_pop* та його тип – *integer*. У полі для виразу необхідно ввести формулу ОМ-/ПМ-методу, формалізувавши її наступним чином: *'(census_pop /sum_volume) * volume'* (ОМ-метод), або *'(census_pop /sum_area) * area'* (ПМ-метод), де *census_pop, sum_volume, volume, sum_area, area* – це назви існуючих полів шару центроїдів з відповідними значеннями. Якщо формула введена коректно, то у вікні калькулятора полів буде активна кнопка «ОК», при натисканні на яку до таблиці атрибутів шару центроїдів буде додано нове поле *building_pop* з розрахованим населенням по будинках, виходячи з їхньої приналежності до житлового типу ЗК і розподілу населення у місті за переписними округами.

За допомогою стандартної функціональності *QGIS (Layer Properties>3D View)* або спеціальних додаткових плагінів (*Qgis2threejs*), тривимірну візуалізацію результатів на окремих фрагментах забудови можна виконати прямо в середовищі цієї програми [35]. Однак, для цього потрібні дані про висоту будівель у таблиці атрибутів, які є лише у імпортованих даних із CSV-таблиць.

5. *Експорт результатів розрахунків.* У таблиці атрибутів кінцевого шару центроїдів мають бути такі заповнені поля:

- *name/ID* – ім'я моделі/ідентифікатор футпринту;

- *volume/area* – об’єм/площа моделі;
- *landuse* - тип ЗК;
- *census_pop* – загальна кількість населення у переписній ділянці;
- *sum_volume/sum_area* – загальний об’єм/площа житлових будівель у переписній ділянці;
- *building_pop* – обчислене населення будівлі.

У разі застосування ПМ-методу, атрибути даного шару повинні бути передані назад у шар футпринтів будівель. Це можна зробити за допомогою аналогічного застосованого раніше інструменту, а саме *SAGA> Add point attributes to polygons*. Потім шар футпринтів можна експортувати у вигляді *SHP*-файлу (*Export>Save Features As*) і використовувати його в *BERA*-розрахунках у комбінації з відповідними лідарними даними. У *JSON*-файли отриманих моделей заноситиметься розрахована інформація про чисельність населення, яка потім буде відображатися при візуалізації результатів.

У разі застосування ОМ-методу, отриманий шар центроїдів необхідно назад експортувати у вигляді *CSV*-таблиці, а потім через *python*-скрипт записати отримані дані назад у *JSON*-файли моделей у вигляді пар «ключ-значення». Скрипт проходить кожний рядок у вихідній *CSV*-таблиці і при збігу запису поля *name* з назвою *JSON*-файлу в цей файл буде заноситись відповідна йому інформація про чисельність населення, тип ЗК і т.д. Таким чином, *JSON*-файли всіх порахованих моделей будуть перезаписані і будуть готові до візуалізації.

6. *Візуалізація* оцінки чисельності населення у *3D*-сцені виконується з використанням методу градуїованих символів, де кожній моделі житлової будівлі привласнюється колірна заливка відповідно до її градієнтного інтервалу, розрахованого за значеннями чисельності населення у ключі *building_pop* [124].

Таким чином, методика виконання даного користувачького сценарію може бути реалізована у шість процедурних етапів, причому більша частина з них є спільною для ПМ- та ОМ-підходів (рис.3.18.).



Рис. 3.18. Операційна послідовність виконання оцінки чисельності населення ОМ- і ПМ-методом.

Описана методика оцінки чисельності населення може стати універсальним інструментом локалізованого УГС-аналізу, який буде застосовний як для територій цілих міст, так окремих районів і міських конфігурацій. Базовою вимогою для цього є лише наявність даних щодо переписних ділянок, оцифрованих будівель та типів ЗК, які для більшості розвинених країн знаходяться у відкритому доступі. Точність отриманих результатів значною мірою залежить від точності вихідних даних, що, зокрема, стосується даних щодо типів ЗК. Так, в окремих випадках поширеною проблемою є помилкове віднесення житлових будинків до нежитлових типів ЗК, внаслідок чого вони фільтруються і далі не враховуються у розрахунках – це може призвести до суттєвої диспропорції у розподілі переписної чисельності населення по будівлях ділянки, коли мала кількість будівель матиме надмірну кількість населення через недобір площі/об'єму

відфільтрованих будівель. Ця проблема частково може бути вирішена введенням граничних значень максимально можливої кількості населення на одиницю площі. Тоді ділянки з помилками у класифікації будинків виділятимуться за кількістю невизначеного населення, що перебуває в надлишку, і для них можна буде провести додаткове дослідження з метою рекласифікації окремих будівель.

Далі будуть детально розглянуті конкретні приклади реалізації даного користувацького сценарію на територіях різнорангових міст, а також супутній аналіз отриманих результатів.

3.2.3. Регіональні імплементації сценарію по різнорангових містах.

Користувацький сценарій оцінки чисельності населення нами було виконано із застосуванням різних методик, за допомогою різних інструментів візуалізації та на територіях різних міст.

Перший приклад такої імплементації представлений оцінкою чисельності населення для міста Бостон, штат Массачусетс, на основі його тривимірної моделі забудови, що включає більш ніж 350 тис. моделей будівель. Моделі *LOD1* були пораховані за допомогою інструмента *BERA*, після чого до них була занесена інформація про чисельність населення, розрахована ОМ-методом. Візуалізація результатів виконана у середовищі *Cesium Viewer* у форматі *3DTiles*. У місті Бостон, площею 232 км², мешкає більш ніж 650 тис. осіб, яке рівномірно розселено переважно за малоповерховою житловою забудовою [145]. Такий характер розселення насамперед простежується у тривимірній візуалізації забудови (рис. 3.19).



Рис.3.19. Тривимірна візуалізація результатів оцінки чисельності населення за будівлями міста Бостон у вікні *Cesium Viewer* (побудовано автором за даними [145, 203]).

Як видно з рис.3.18, згідно з об'ємно-метричною оцінкою, найбільш поширеним типом будівель є будинки, що містять від 0 до 10 мешканців. Це можуть бути як одноповерхові, так і двоповерхові поодинокі будівлі, житлова площа яких якраз розрахована на таку кількість мешканців, тому оцінка чисельності населення в даному випадку цілком відповідає реальним показникам.

Житлові будівлі розташовані дещо хаотично, упереміш із будинками інших типів користування. Інформацію про тип будівлі можна переглянути, натиснувши на відповідну модель – після чого, у вікні *Cesium Viewer* буде виведено спливаюче вікно з різною атрибутивною інформацією обраної моделі. Тут також виводиться точна кількість розрахованого населення для кожного житлового будинку [122].

Перевагою візуалізації забудови в даному інтерфейсі є можливість швидкого перемикання між різними просторовими закладками даної тривимірної сцени, що характеризують різні житлові райони та переписні ділянки міста Бостон (рис.3.20). Перехід на потрібну закладку можна здійснити за допомогою кнопки *Move To*, яка відобразить список доступних для поточної сцени локацій. Незважаючи на велику кількість моделей, формат

3DTiles дозволяє перемикатися між локаціями та візуалізувати моделі досить швидко та без особливого навантаження на сервер.



Рис.3.20. Тривимірна візуалізація однієї з переписних ділянок міста Бостон у вікні *Cesium Viewer*.

Перейшовши на закладку певної переписної ділянки, можна детально переглянути локалізовані закономірності розподілу населення у ній, а також помітити суттєву диференціацію класів будівель за даним тематичним показником. Домінуючим класом є будинки з населенням від 0 до 10 мешканців, проте спостерігаються також цілі масиви будівель на 10-25 мешканців, а також окремі будівлі на 25-50 мешканців та на 100-200 мешканців.

Представлений на рис. 3.20 район є достатньо урбанізованим і сусіднім з діловим центром міста (*downtown*-забудовою), але навіть у таких умовах розрахована оцінка населення виявилася цілком закономірною та співставною з морфологічними особливостями відповідних будівель. Наприклад, для виділеного на рисунку будинку кількість оціненого населення становить 162 особи. Грунтуючись на формі цієї будівлі та порівнюючи її з навколишніми житловими будинками можна припустити, що вона складається з 4-5 поверхів та 3-4 під'їздів, які в сукупності можуть містити до 60 квартир (припускаючи, що кожен поверх у кожному під'їзді містить по 3 квартири). Якщо поділити

розраховану кількість населення на цю кількість квартир (162/40), то вийде 2.7 особи на 1 квартиру, що цілком може відповідати дійсності. Використовуючи XY-координати моделі цієї будівлі, її можна знайти на карті *Google Maps* і через функціональність *Street View* побачити його фотографію, за якою вже можна підтвердити висунуте припущення (рис. 3.21).

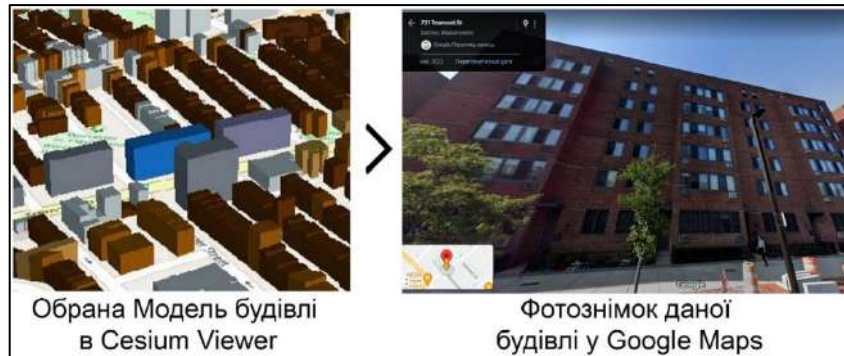


Рис. 3.21. Зіставлення *LOD1* моделі у *Cesium Viewer* з її реальним аналогом у вікні *Google Street View*.

Таким чином, розрахована оцінка чисельності населення може цілком відповідати дійсній чисельності населення у тому чи іншому будинку, якщо спиратися на його архітектурно-морфологічні характеристики. Карти *Google Maps* у такому випадку можуть стати корисним допоміжним інструментом, який може допомогти у перевірці точності оцінки та виявленні можливих помилок [109].

Ще однією міською локацією, для якої був реалізований даний сценарій користувача є округ Арлінгтон, штат Вірджинія. Це міський округ площею 67 км² та з населенням більш ніж 200 тис. осіб [56]. За рахунок своєї компактності урбанізована територія даного округу є більш зручною для комплексного локалізованого УГС-аналізу результатів, на відміну від розглянутого раніше Бостона. До того ж, для Арлінгтона пораховано лише 46 тис. моделей, з яких 41 тис. моделей віднесено до житлового типу ЗК, що є оптимальною вибіркою для статистичного аналізу результатів.

На цей раз моделювання та візуалізація результатів виконується прямо у середовищі *QGIS* за допомогою спеціального додаткового плагіну *Qgis2threejs* (рис.3.22). Цей плагін надає функціональність екструдування

футпринтів будівель на основі інформації про їхню висоту, записану в таблиці атрибутів, а також спеціальний інтерфейс для тривимірної візуалізації результатів [170]. Перевагою використання цього плагіну є те, що він інтегрований у повноформатну ГІС, завдяки чому, по-перше, модель забудови можна комбінувати з об'єктами інших шарів карти, і тим самим виділяти нові просторові відносини та залежності, а по-друге, можна швидко перемикатися між 2D та 3D режимами відображення та задіяти будь-які доступні інструменти просторового аналізу.

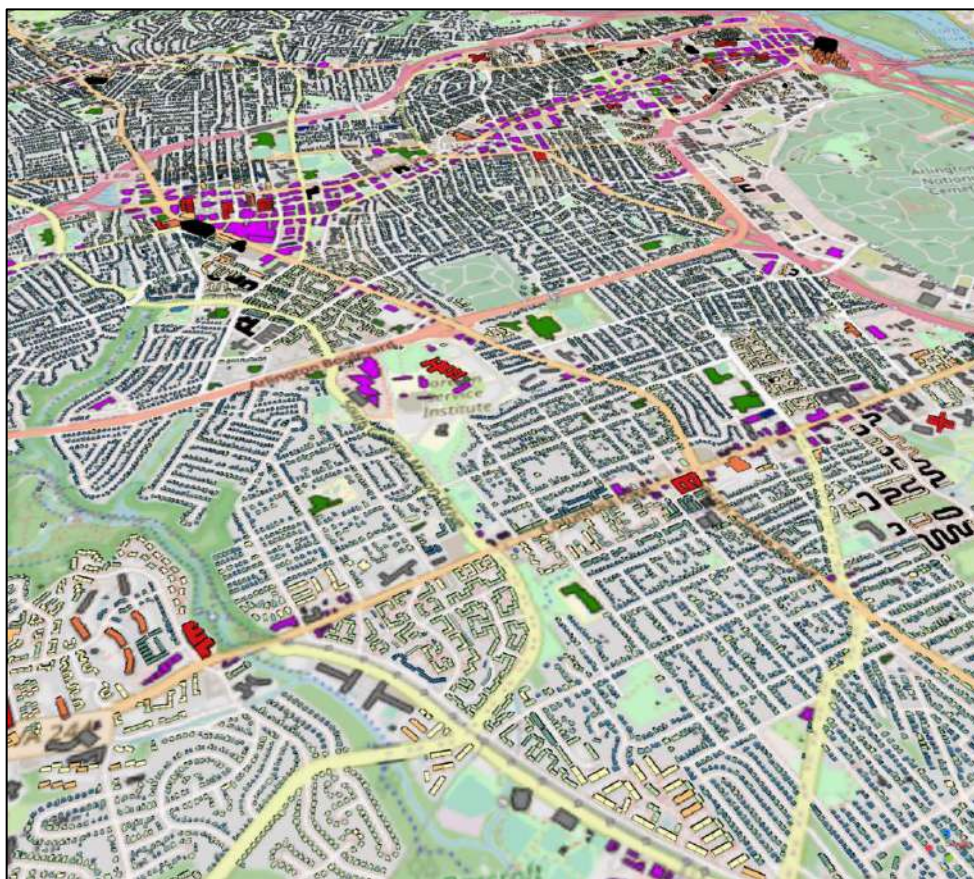


Рис. 3.22. Тривимірна візуалізація результатів оцінки чисельності населення за будинками округу Арлінгтон у середовищі *QGIS* за допомогою плагіну *Qgis2threejs* (побудовано автором за даними [55, 161]).

Для візуалізації результатів оцінки чисельності населення, нами було застосовано метод градуйованих знаків, за допомогою якого на основі алгоритму Дженкса виділено 7 класів за кількістю мешканців у будівлі. Згідно з виконаною оцінкою, найбільша кількість будівель (25.5 тис.) містить від 1 до 3 мешканців, що становить приблизно 61% від усього житлового фонду

округу. При цьому кількість будівель з кожного наступного класу зменшується більш ніж у 2 рази, порівняно з попереднім. Так, будівель на 300+ осіб налічується вже менш ніж 100 на весь округ. З урахуванням того, що оцінка виконана за допомогою ОМ-методу, цілком розумно припустити, що кількість житлових будівель таким чином зменшується від одноповерхової одиночної забудови до багатоповерхової забудови. Однак, якщо поглянути на сумарну кількість населення, яку вміщує кожен із розрахованих класів будівель, то тут уже відсутня лінійна закономірність у зміні класів (рис.3.23).



Рис.3.23. Розподіл чисельності населення за класами житлових будинків.

При тому, що будинки на 1-3 мешканців за кількістю одиниць займають більшу частину всього житлового фонду округу (61%), сумарна кількість населення, яка в них проживає, становить лише 23% від загальної чисельності населення округу. Це може вказувати на нерівномірний розподіл щільності міської житлової забудови, при якому більша частина житлового фонду має низьку щільність забудови, і, відповідно, більш комфортні умови для меншої кількості населення, водночас більша частина населення проживає в менш комфортних умовах більш щільної житлової забудови. Однак у сумі з класом будівель на 3-6 осіб, який також характерний для порівняно низької щільності забудови, частка населення в обох класах становить вже 43%. Загалом же, в окрузі спостерігається 3 явно домінуючі класи будівель: на 1-3 мешканців, на 3-6 мешканців та на 6-18 мешканців. У сумі вони налічують 40277 будівель

(97% від усієї житлової забудови округу) та проживає в них 145 тис. осіб (66% від загальної кількості населення), що говорить про те, що більшість міських жителів мають порівняно комфортні умови проживання у малоповерховій забудові.

Якщо розглядати будівлі решти 4 класів, то тут спостерігається різкий спад як за кількістю будівель цих класів, так і за кількістю мешканців, які в них проживають. У сумі вони налічують лише близько 1000 будівель і проживає в них 36% міського населення. Характерною особливістю таких багатоквартирних будівель в окрузі Арлінгтон є їх розміщення поблизу комерційних/ділових районів у центрі округу, де переважає нежитлова забудова (рис.3.24.). У свою чергу, малоповерхова житлова забудова (1 і 2 клас) переважно займає периферійні райони, що віддалені від високоповерхової комерційної забудови. Будівлі 3 класу, у цьому відношенні, розподілені по території міста рівномірно – таким будинкам може бути характерна як історична забудова, зосереджена в центрі, так і сучасна забудова, зосереджена в нових районах на околицях.

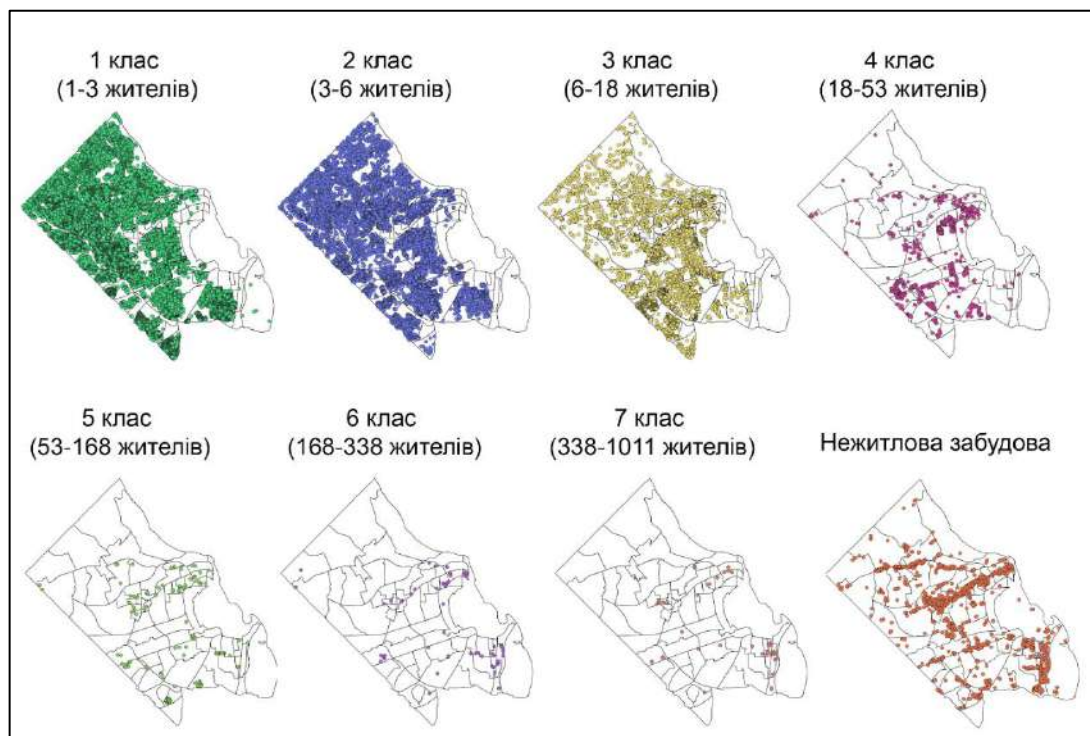


Рис.3.24. Розподіл будівель (їх центроїдів) різних класів в окрузі Арлінгтон.

Загалом, якщо поглянути на рис. 3.23, то можна помітити певну закономірність у тому, як знижується присутність будинків у околичних районах з підвищенням кількості жителів у них. Завдяки цьому тут мінімізуються різні негативні ефекти високоурбанізованих міст, такі як: затінення будівель, шумове забруднення, підвищення трафіку тощо. Ці райони, ймовірно, є більш новими і спочатку не були зайняті існуючою історичною забудовою та комерційними зонами ЗК, тому вартість землі тут була порівняно низькою. Забудова такої місцевості малоповерховими будинками з метою забезпечення високого комфорту проживання цілком доцільна. У той же час, центральній частині міста зазвичай характерна висока щільність забудови та концентрація безлічі державних та комерційних закладів – на цю землю високий попит, тому її вартість тут істотно вища. Тому малоповерхова житлова забудова тут є неперіоритетним та недоцільним використанням території. Багатоквартирні житлові будинки ж у цих районах дозволяють вмістити більше мешканців на обмеженій території та забезпечити більш ефективне використання простору. На противагу високому комфорту проживання в околичних районах, населення центральної частини міста має більш розвинену інфраструктуру, швидкий доступ до робочих місць та всіх необхідних послуг, зосереджених у центрі міста [47].

Таким чином, даний користувацький сценарій дозволяє не просто відстежити розподіл кількості населення по районах міста, але він також дозволяє виявити взаємозв'язок між типами житлових забудов і кількістю населення, яке в них проживає. Маючи інформацію про чисельність населення в тій чи іншій переписній ділянці, а також архітектурно-морфологічні дані житлових будівель, які переважають у цих ділянках, можна оптимізувати низку міських послуг, таких як транспортні послуги, послуги зв'язку, водопостачання, енергопостачання, вивезення сміття тощо. п. Наприклад, при однаковій кількості населення у двох переписних ділянках, на обслуговування ділянки з малоповерховою житловою забудовою, може знадобитися більше часу та ресурсів, через розкид населення за великою кількістю будівель, ніж

на обслуговування ділянки з високоповерховою забудовою, де ця кількість населення сконцентрована у кількох будинках. Отримані дані про чисельність населення по будинках та їх тривимірна візуалізація, якраз можуть допомогти певним чином перерозподілити ресурси на обслуговування тих районів, які цього більше потребують.

Тривимірна візуалізація розподілу чисельності населення при її детальному перегляді дозволяє виявити різні типи житлової забудови зі своїми унікальними властивостями у межах цієї міської території. З цих властивостей можна отримати інформацію про якість проживання для забудови певного типу, а також корисну інформацію для зазначеного раніше обслуговування житлових районів. Наприклад, співвідношення кількості населення до розмірів будівель та щільності житлової забудови покаже ступінь заселеності та завантаженості того чи іншого району. Висока щільність забудови та низька кількість населення може вказувати на неефективне використання житлового фонду та проблеми проживання в таких районах, які потребують детального дослідження та вирішення. В той же час, низька щільність і висока кількість населення може стати сигналом того, що в районі необхідно оптимізувати використання території, наприклад, спорудити нові будівлі, або навпаки заборонити спорудження будівель і зайнятися благоустроєм вільних ділянок з метою підвищення якості життя для місцевих жителів. Основні типи житлової забудови, що були виділені в окрузі Арлінгтон, представлені на рис. 3.25.

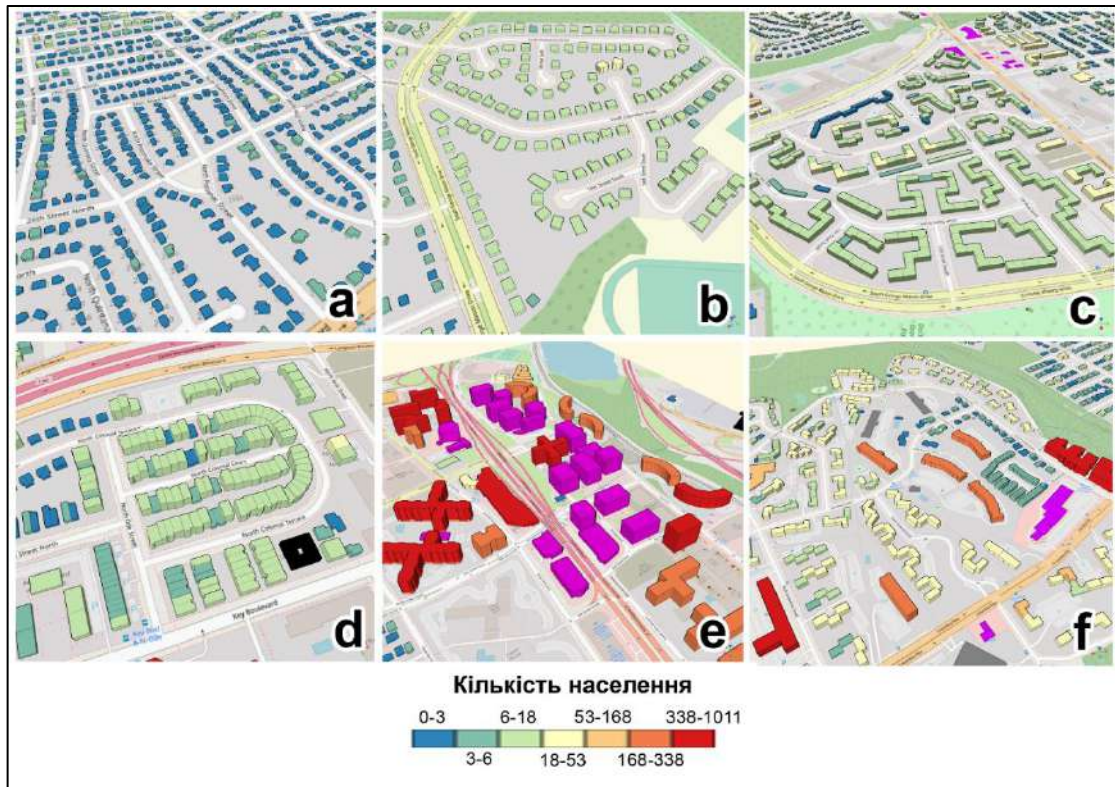


Рис. 3.25. Типи житлової забудови округу Арлінгтон за щільністю населення (побудовано автором за даними [55, 161])

Нами виділено 6 умовних типів житлової забудови за співвідношенням щільності населення та щільності забудови. Найпоширенішим типом є *розріджена низька забудова із низькою щільністю населення* (рис.3.25а). Такій забудові характерний рівномірний розподіл населення по безлічі окремих невеликих будівель. Райони з подібною забудовою займають великі за площею території, але при цьому будинки не розташовуються занадто тісно один до одного, що й обумовлює низьку щільність населення. Основною проблемою таких районів є обмеженість доступності послуг, у тому числі щоденних, через віддаленість від різних центрів обслуговування. Крім того, тут характерною є проблематичність обслуговування будинків, яка вже згадувалася раніше. Ці проблеми частково можуть бути вирішені шляхом оптимізації маршрутів обслуговуючого транспорту, а також встановлення оптимальних точок обслуговування для більшого охоплення населення близькою доступністю [49]. Для запобігання подібним сценаріям, майбутнім малоповерховим районам необхідна більша компактність та впорядкованість забудови

невеликими кварталами, з відведеними ділянками для пунктів обслуговування.

Другим типом є *розріджена низька забудова із середньою щільністю населення* (рис.3.25b). В окрузі Арлінгтон подібні райони зазвичай зустрічаються у вигляді окремих осередків, оточених іншими типами ЗК. Вони займають порівняно невеликі території, але в них зосереджена непомірно велика кількість населення (від 6 до 18 осіб) для такого розміщення та об'єму будівель, що більш характерне для першого типу. У таких районах і найближчих околицях має бути обмежена побудова нових житлових будинків, щоб уникнути ще більшого навантаження території, але можуть бути організовані додаткові місця для паркування, а також різні громадські простори, такі як парки, сквери і дитячі майданчики, для підвищення якості життя.

Третім типом є *розріджена середня забудова із середньою щільністю населення* (рис.3.25c). Основним типом будівель тут вже є багатоквартирні будівлі, розраховані на 18-53 мешканців та на 53-168 мешканців залежно від поверховості будівлі. Як і у випадку з попереднім типом, такі райони міста зустрічаються у вигляді окремих осередків і мають власні особливості планування. Проте, у даному випадку розміри будинків вже більше співставні із зосередженою у них кількістю населення. У таких районах, перш за все, має бути налагоджена транспортна мережа та забезпечені у достатній кількості паркувальні місця. А також потрібне грамотне облаштування внутрішніх дворів та під'їздів з урахуванням тієї кількості населення, яка тут проживає. В цілому, при планомірній забудові, такий тип є найбільш придатним для заселення швидкозростаючих міст.

Четвертим типом є *щільна середня забудова із середньою щільністю населення* (рис.3.25d). Цим районам характерна переважно стрічкова забудова з високою компактністю та впорядкованістю, за рахунок чого на порівняно малій території може бути зосереджена сумарно велика кількість населення. Така забудова найчастіше характерна для старих районів міста, наближених

до його центральної частини. Вони зазвичай не мають проблем з доступністю будь-яких послуг, але головною проблемою тут, на відміну від попередніх типів, є недолік вільного простору, пов'язаний із занадто тісним розміщенням будівель, через що тут значно ускладнюється встановлення певних громадських просторів та паркувальних місць. Залишається лише використовувати території у найближчих околицях цих районів, щоб якось оптимізувати ситуацію.

П'ятим типом є *розріджена висока забудова з високою щільністю населення* (рис.3.25e). В окрузі Арлінгтон будівлі такого типу розташовані переважно в центральній частині міста, і як правило, упереміш з комерційною забудовою. На відміну від попередніх типів, така забудова часто не має певної впорядкованості у розміщенні будівель. Райони цього типу можуть складатися всього з 2-3 різних будівель, кожна з яких вміщатиме до 1000 осіб. У випадку з Арлінгтоном, такій забудові характерні, як правило, нові будівлі, збудовані за сучасними технологіями, з урахуванням різних базових урбаністських принципів, наприклад, з наявністю підземних паркувань, забезпеченням вільних громадських просторів між будинками, налагодженою логістикою [36]. Проте розташування таких будівель у центральній частині міста може суттєво перевантажувати комерційно-діловий центр міста, який і так перевантажується щоденними маятниковими міграціями населення, тому не можна допускати їх зайвого ущільнення в цій частині міста.

Шостим типом житлової забудови в окрузі Арлінгтон можна назвати *змішаний тип* (рис.3.25f), якому характерна зосередженість на невеликій ділянці різних типів будівель, представлених раніше. Райони такого типу виникають у ході непланомірної та нерегульованої забудови місцевості, що тягне за собою низку проблем, пов'язаних із високою диференціацією якості життя місцевого населення. Насамперед така забудова негативно позначається на житті в малоповерхових будинках – високі будівлі можуть затінювати низькі будинки, обмежувати їм огляд, порушувати приватність мешканців цих будівель тощо. Ще однією проблемою є складність міського обслуговування

подібних районів через різну специфіку будівель, що мають, наприклад, різний рівень енергоспоживання або різні способи вивезення сміття. Актуальним тут також є вже зазначений брак місць для паркування та громадських просторів. У таких районах має бути обмежена будь-яка нова забудова для запобігання ще більшому хаосу, але, по можливості, можуть бути додані нові зелені насадження та паркувальні місця.

В цілому, за рахунок своїх порівняно невеликих розмірів та помірної чисельності населення, округ Арлінгтон має цілком збалансований розподіл об'єктів житлового фонду по міській території. Для кожного з виділених типів забудови, на основі їх специфіки та позначених для них проблем, можуть бути розроблені універсальні рішення для їх ефективного обслуговування та підвищення якості життя. Побудова нових районів має бути ретельно спланована з урахуванням досвіду попередніх забудов [35]. Найбільш придатними типами житлової забудови для даного округу нами вважається компактна низька забудова і розріджена середня забудова.

Таким чином, імплементація даного користувачького сценарію дозволяє нам проводити подібний аналіз для будь-якого міста за наявності відповідних даних. Причому, типи забудови, що виділяються в кожному окремому місті, можуть бути унікальними через їх внутрішні чинники, що впливають на особливості розподілу населення.

Обчисливши середнє значення об'єму будівлі для кожного класу, можна також визначити найбільш типовий будинок по кожному класу у межах досліджуваної території. Потім, за моделлю вибраного будинку можна виокремити його точні координати і відобразити його реальний аналог у середовищі *Google Street View*. По округу Арлінгтон, в якості таких типових будівель нами визначені наступні: (рис.3.26).



Рис.3.26. Типові житлові будинки в окрузі Арлінгтон за класами кількості жителів візуалізовані у *Google Street View*.

Варто відзначити, що якщо перші 3-4 будівлі можна вважати цілком репрезентативними представниками своїх класів завдяки великій вибірці будинків, що входять до них, то останні будівлі можуть бути досить своєрідними для свого класу через малу вибірку і високий діапазон вхідних значень. Хоча загальні характеристики типових будівель по кожному класу передані правильно. Як вже зазначалося на початку цього розділу, ресурс *Google Street View* може бути дуже корисним інструментом при перевірці та підтвердженні різних суджень і гіпотез, зроблених під час аналізу міської забудови за даним користувацьким сценарієм.

Дані про чисельність населення в будинках, отримані з переписних ділянок можна зворотним чином підсумовувати, але вже за іншими територіальними одиницями міста, наприклад, історичними районами, локальними кліматичними зонами, зонами підвищеної злочинності, різними буферними зонами або будь-якими іншими умовними зонами. Завдяки подібному перерозподілу даних про населення можна виділити ще більше властивостей щодо характеру розподілу населення у місті [124].

Для демонстрації результатів такої процедури у *QGIS* нами була згенерована сітка, що складається з безлічі шестикутних полігонів – осередків,

площею 0.13 км^2 . Дані про чисельність населення з центроїдів будівель були підсумовані в кожному з осередків за просторовим перетином і занесені до таблиці атрибутів полігонального шару. В результаті була отримана наступна картосхема (рис.3.27, праворуч):

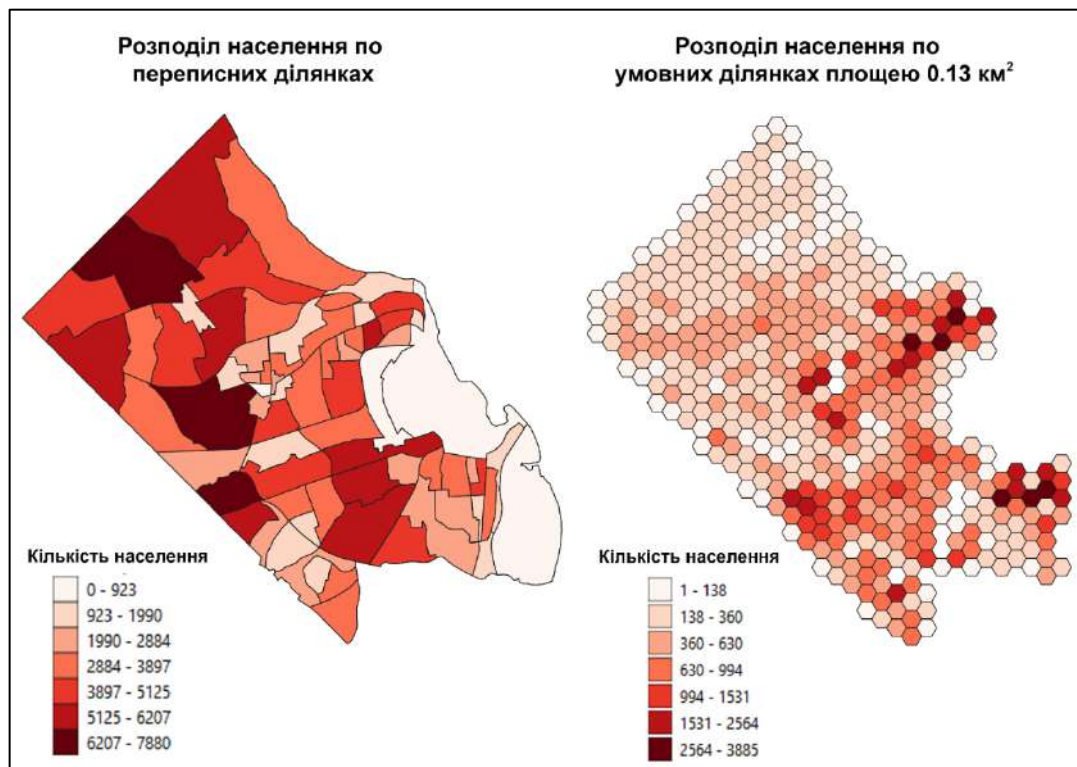


Рис.3.27. Результат перерозподілу населення між різними територіальними одиницями на основі оцінки ОМ-методом (побудовано автором за даними [55, 161]).

На підставі формалізованих таким чином даних можна наочно відстежити особливості розподілу населення за різними переписними ділянками. З цікавого можна зазначити, що у переписних ділянках із найбільшою кількістю населення спостерігається рівномірне розміщення населення ($138-360$ осіб на 0.13 км^2), що говорить про оптимальне використання території житлового фонду. У цих ділянках розташований малоповерховий тип забудови, який раніше був докладно охарактеризований. У центральних районах навпаки при невисокій кількості переписного населення спостерігається висока щільність цього населення в розрахунку на один осередок – це вказує на зосередженість у таких ділянках високоповерхових житлових будинків з великою кількістю жителів на малій

площі. На карті справа також виділяється пояс із середньою щільністю населення (360-630 осіб на 0.13 км²) – цій місцевості характерна або компактніша малоповерхова забудова, або зосередженість більш об'ємних будівель. Ще в різних частинах міста можна помітити поодинокі осередки з підвищеною щільністю – це може вказувати на проблемні міські ділянки зі змішаною забудовою.

Усі виділені особливості практично не відстежуються на карті переписних ділянок, але надмірно деталізовані на карті окремих будівель. Формалізація даних у такій полігональній сітці дозволяє візуалізувати розподіл населення в найбільш оптимальній і наочній формі [36].

Користувальницький сценарій по округу Арлінгтон був виконаний із застосуванням ОМ-методу, але з метою порівняння було також розраховано населення ПМ-методом з використанням тих самих даних і тієї ж класифікації. На прикладі різних типів забудови округу можна простежити різницю в результатах розрахунків зазначеними методами (рис.3.28).

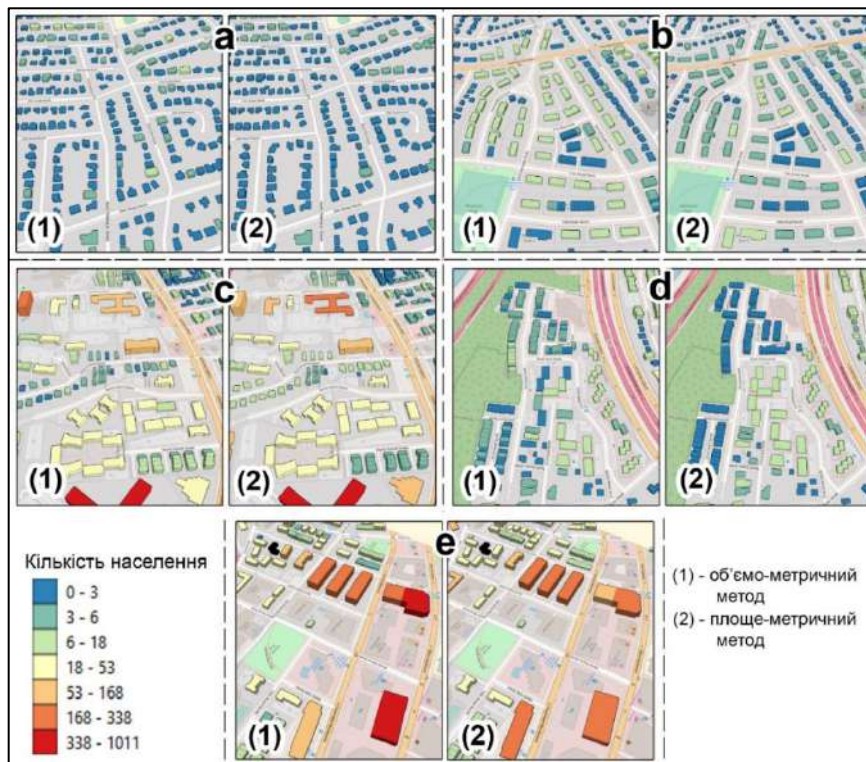


Рис.3.28. Порівняння результатів оцінки чисельності населення за допомогою ОМ- та ПМ-методів (побудовано автором за даними [55, 161]).

Як уже зазначалося у попередньому розділі, ПМ-метод може бути цілком взаємозамінним з ОМ-методом, якщо оцінка виконується для сільської/приміської одноповерхової території, що й спостерігається на рис.3.28а. Хоча місцями і можна помітити зміну класу в окремих будівлях, при розрахунку на великій кількості моделей різниця буде незначною, до того ж зміни переважно відбуваються між 1 і 2 класом, які мають найнижчий діапазон значень. Більш суттєві відмінності спостерігаються вже на середньому типі забудови – будинки, які за об’ємом оцінюються до 18 мешканців, за площею оцінюються лише до 6. Особливо це стосується стрічкової двоповерхової забудови – тут будинки можуть бути дуже вузькими, але витягнутими за висотою, що й дає їм велику місткість населення за об’ємом, яка при цьому не фіксується за площею (рис. 3.28d). Через таке недолічування населення в стрічковій забудові, набагато більше населення розподіляється за низькими, але широкими будинками (рис. 3.28с). Найбільш критична похибка в цьому плані буде отримана при оцінці високоповерхової забудови – тут може бути найменша кореляція між об’ємом та площею будівель, а діапазон внутрішньокласових значень населення при цьому може становити кілька сотень осіб. Детальна інформація про те, як розподіляється кількість будівель та населення за класами представлена на рис.3.29.



Рис.3.29. Порівняння результатів оцінки населення за допомогою ПМ- та ОМ-методів за класами тематичних карт.

На діаграмах видно, що хоча за кількістю будівель на 0-3 мешканців ПМ-метод і відстає від ОМ-методу, за загальною кількістю населення, що вміщують будівлі цього класу, ситуація зворотна. Це пов'язано з тим, що у межах цього класу більшість будівель оцінено на 2-3 жителя, на відміну більш рівномірного розподілу значень за об'ємом. З цієї ж причини видно суттєву перевагу населення в будинках другого класу. Справа у тому, що площа будівель є менш диференційованим атрибутом із набагато меншим діапазоном значень, ніж об'єм. Так, за об'ємом більш високі будівлі мають більшу пропорційну вагу і отримують максимальну кількість населення, за площею ж у них така вага відсутня і населенню доводиться в більш рівних пропорціях ділитися по будинках, але через те, що кількість будівель обмежена – малі будівлі заповнюються по максимуму. За різницею в кількості населення, в класі будівель на 338+ мешканців видно, що за ПМ-методом будівлі недоотримують понад 10 тис. населення, порівняно з ОМ-методом – все це населення в результаті розбивається по будівлях інших класів. Виходячи з цього зазначимо, що якщо з розрахунків виключити райони із середньою/високою житловою забудовою, то різниця у результатах оцінки між методами буде мінімальною.

Таким чином, розглянуті приклади реалізації даного користувачького сценарію показали, що він дійсно дозволяє отримати цінну інформацію щодо очікуваної кількості населення по житлових будинках, яка в свою чергу відкриває ряд якісно нових можливостей до аналізу УГС. Важливою перевагою тут є високий ступінь автоматизації обчислювальних процедур, а також висока гнучкість інформації про населення, яка далі може бути перерахована під будь-яку територіальну одиницю міста і швидко відкалібрована відповідно до оновлених переписних даних або даних про об'єм житлового фонду.

Звісно, варто зазначити про різні похибки, що виникають за такої оцінки населення. Так, в окремих будинках чи районах кореляція між геометричними характеристиками будівель та кількістю жителів може бути помилковою через

сторонні не враховані фактори, пов'язані, наприклад, з рівнем достатку мешканців, або їх релігійних поглядів, які тим чи іншим чином відхиляють кількість населення в будинку від середнього значення. Інша причина похибки пов'язана вже з некоректно визначеною геометрією будівлі, наприклад, його висотою з *LOD1* моделі, за яку була прийнята висота димової труби або невідфільтрованого дерева – у таких випадках буде помилково визначено об'єм моделі, за якою відповідно до будівлі буде присвоєно завищену кількість населення [32]. Нарешті, помилкове визначення типів ЗК, через яке до житлового фонду відносяться нежитлові будівлі, також істотно впливатиме на точність оцінки, особливо на середньоповерховій та високоповерховій забудові. Використання у розрахунках додаткових семантичних характеристик житлових районів, а також *LOD2* моделей будівель у цьому відношенні суттєво підвищить якість оцінки [64].

Незважаючи на описані можливі відхилення, навіть мінімального набору даних має бути достатньо для багатьох прикладних застосувань, адже при оцінці у будь-якому випадку використовуються реальні переписні дані. Найбільшу користь результати такої оцінки чисельності населення можуть надати при аналізі житлових районів з метою оптимізації міського обслуговування. Підсумкова тривимірна карта цього користувачього сценарію на мікро-просторовому рівні показує конкретні ділянки концентрації населення, які можуть бути використані, наприклад, для оптимізації покриття мобільних мереж з метою охоплення максимальної кількості населення. При цьому моделі будівель також допоможуть врахувати різні перешкоди при розповсюдженні сигналу в щільно забудованому міському середовищі.

Ще одним очевидним застосуванням даних оцінки населення є їхнє залучення при використанні практично будь-яких інструментів мережевого аналізу, наприклад, прокладання оптимальних транспортних маршрутів, розрахунок областей обслуговування, дистанційних матриць і т.п. Центроїди житлових будинків із занесеною до них інформацією про населення будуть надзвичайно корисним шаром, який встановлюватиме додаткову вагу тій чи

іншій ділянці міста при аналізі місцевості зазначеними інструментами. Мережевий аналіз, у свою чергу, може бути впроваджений як у муніципальних застосуваннях (наприклад, для маршрутизації громадського транспорту, розміщення громадських просторів), так і у комерційних (геомаркетинговий аналіз території з метою максимізації просторового охоплення потенційних клієнтів) [62]. Тут же варто окремо відзначити актуальність інструментів в умовах війни, наприклад, для ефективного розподілу гуманітарної допомоги, оптимального розміщення укриттів та детальнішої оцінки завданого мілітарного імпаку житловому фонду міст [37].

В цілому можна сказати, що чим більше буде знайдено різних можливих комбінацій даних про населення з даними інших міських об'єктів і явищ, які можуть бути оцифровані в ГІС-середовищі, тим більше буде розширюватися спектр прикладних застосувань даного сценарію. А ще більшої його ефективності та точності можна буде досягти при забезпеченні більшої наповненості міських баз даних, з яких можна буде отримати низку уточнюючих характеристик населення, які допоможуть належним чином відкалібрувати розрахунки. Саме недолік у даних, найчастіше, є тією перешкодою, яка не дозволяє провести якісний аналіз міського середовища за допомогою тих можливостей, які сьогодні надають ГІС. Тому, для низки міст, які розвиваються у напрямку впровадження концепції «Розумного міста», насамперед необхідні систематичні зміни в міських базах даних, спрямовані на підвищення якості, точності та достовірності даних про міське населення, міські об'єкти, процеси та явища, з їх зручною інтегрованістю в ГІС. Разом з прогресом у цьому напрямку зростатиме і якість, прикладна значущість та цінність тих результатів, які досягаються при ГІС-обробці та аналізі даних.

3.3. Другий прикладний аспект – реалізація користувачького сценарію просторової оцінки енергоспоживання забудов.

3.3.1. 3D-просторовий підхід до диференційованої оцінки енергоспоживання міськими забудовами.

Житлові забудови є одними з найбільш енергоємних об'єктів та найбільш масштабними споживачами енергії, що виробляється вуглеводнями. Будівлі даного типу забудови зазвичай займають велику площу урбанізованого середовища, і на їх обслуговування – освітлення, опалення, кондиціонування повітря, підтримка температури води, у сукупності, щорічно витрачаються великі енергетичні ресурси. Крім того, у високоурбанізованих містах, житлові забудови мають високу щільність населення, яка ще більше призводить до енергетичних витрат для підтримки комфортних умов мешкання у місті. Наприклад, лише для Німеччини, згідно з деякими джерелами, енергоспоживання (ЕнСп) житловими будинками сягає 20%, і з них до 75% загального обсягу ЕнСп витрачається на опалення житла [69]. У цьому простежується чітка закономірність зростання ЕнСп на опалення житлових будинків із підвищенням віку цих будинків [79, 185]. Старі будівлі часто не відповідають стандартам енергоефективності, і для підтримки комфортних умов проживання вони потребують більшої кількості енергії.

При всій зазначеній проблематиці, у багатьох сучасних містах відсутні систематизовані дані про загальноміський рейтинг ЕнСп будівель, які могли б допомогти у розробці більш ефективних стратегій для покращення енергоефективності будівель [172].

З урахуванням вищезазначеного, нами пропонується оригінальний підхід до оцінки ЕнСп будівель з використанням їх тривимірного моделювання на основі лідарної зйомки. Даний підхід заснований на припущенні щодо високої кореляції між геометричними характеристиками будівель та очікуваним рівнем їх ЕнСп [38]. Джерелом цих геометричних характеристик можуть послугувати саме лідарні дані. Крім того, для

досягнення більш коректної оцінки ЕнСп, наявні геометричні дані будівель можуть бути додатково відкалібровані їх семантичними характеристиками, від яких також залежить очікуваний рівень ЕнСп будівлі. Такими характеристиками є згаданий вище вік будівлі, а також тип будівлі (за призначенням) та кількість поверхів у будівлі. При цьому, оцінка спиратиметься на значення ЕнСп будівлями з реальних показників лічильників, які виступатимуть еталонними значеннями на одиницю площі.

Таким чином, наявні геометричні та семантичні дані можна інтегрувати у вигляді певного параметра, який відображатиме очікуваний рівень ЕнСп будівлі та корелюватиме з реальним значенням. Більше того, наповнюючи базу даних зазначеними інтегрованими параметрами, ми можемо вивести певне шаблонне значення для будь-якої території у місті, для якої немає реальних значень ЕнСп будівель.

Для розрахунку ЕнСп будівель потрібний єдиний усереднений показник і таким може бути величина ЕнСп на одиницю площі з метою опалення даного приміщення kWh/m^2a , де kWh означає кіловат на годину, а m^2a – корисна площа на рік. Під корисною площею у даному випадку мається на увазі призначена для опалення площа, яка фактично використовується для виконання житлових функцій будівлі [136]. Корисна площа може бути прямо отримана з об'єму будівлі, визначеного за моделлю *CityGML* з додатковими семантичними атрибутами: кількість та висота поверхів [110, 146].

Показник kWh/m^2a є універсальним показником для регулювання енергоефективності будівель і тому використовується з цією метою фактично у всіх країнах ЄС. Існує також стандартизована класифікація рівня ЕнСп будівель за даним показником, яка включає сім класів енергоефективності, позначених буквами від **A** до **G**, де клас **A** відповідає найбільш енергоефективним будинкам, які споживають дуже мало енергії для підтримки комфортних умов всередині, а клас **G** – найменш енергоефективним будинкам, які споживають значну кількість енергії [204]. Саме ця класифікація може бути

прийнята як основа для систематизації та візуалізації результатів оцінки ЕнСп у 3D-сцені (рис. 3.30).

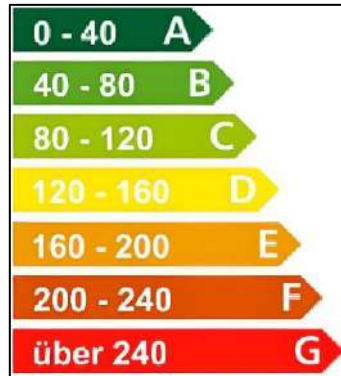


Рис. 3.30. Стандартизована класифікація енергоефективності будівель [204].

Загалом, даний користувацький сценарій може бути реалізований на основі такого ж структурування вихідних даних, яке пропонувалося в описі як теорії та методики оцінки чисельності населення, так і в описі практичних процедур геообробки при реалізації того користувацького сценарію [124]. Так само, як і у випадку з оцінкою чисельності населення, геометрична інформація будівель може бути виокремлена з низькополігональних моделей та завантажена до ГІС-середовища для проведення розрахунків показника kWh/m^2a . Причому, як показали деякі дослідження, для адекватного моделювання ЕнСп будівель достатньо навіть моделей *LOD1* [92]. Таким чином, первинними характеристиками для розрахунку kWh/m^2a є геометричні характеристики з побудованого набору низькополігональних моделей, які надалі також використовуватимуться для візуалізації розподілу ЕнСп в урбанізованому середовищі у вигляді тривимірної тематичної карти [124]. В якості додаткових характеристик обчислення ЕнСп нами приймаються семантичні характеристики, такі як тип будівлі, рік будівництва будівлі, висота поверхів та їх кількість.

Тип будівлі є семантичною характеристикою, якій властиві свої закономірності розподілу рівня ЕнСп будівлі залежно від її змінної. Наприклад, численні дослідження показують, що середньорічне ЕнСп за класом житлової забудови за інших рівних чинників може бути на 15-30 %

вище, ніж за класом комерційної забудови [136, 137, 204]. Усередині загального класу житлової забудови також спостерігається певна диференціація показників ЕнСп між різними типами житлових будівель. Будинки на одну сім'ю, в середньому, споживають більше енергії на опалення порівняно з багатоквартирними будинками [204]. Це може бути пов'язано з тим, що односімейні будинки являють собою окремі будівлі, з окремими системами опалення, охолодження та вентиляції. Їм характерні великі втрати тепла через зовнішні стіни, дах та вікна через їх більшу площу щодо об'єму всієї будівлі. У той же час багатоквартирні будинки можуть бути щільно розташовані, стикаючись з сусідніми будівлями і таким чином мають більшу теплоізоляцію. До того ж вони використовують централізовані системи опалення та вентиляції, які обслуговують декілька будинків чи квартир. За рахунок подібних закономірностей ми можемо вивести деякі усереднені значення ЕнСп для кожного типу будівлі, які будуть застосовуватися для коригування підсумкового значення ЕнСп будівлі.

Для надійної оцінки ЕнСп будівель необхідна чітка класифікація типів будівель, яка може бути застосована до багатьох міських локацій. В якості певної узагальненої класифікації яка буде відповідати багатьом європейським локаціям (зокрема, німецькомовним країнам), може бути прийнята німецька класифікація будівель, яка включає наступні класи: **EFH** – приватний одноквартирний будинок, **RDH** – стрічкова забудова одноквартирними будинками, **KMFN** – маленький багатоквартирний будинок (на 2-6 квартир); **GMFN** – великий багатоквартирний будинок (до кількох сотень квартир); **HN** – багатоповерховий багатоквартирний будинок (більше сотні квартир). Крім того, до цієї класифікації також може бути занесений окремий клас комерційних будівель **RDH** [137]. В окремих європейських країнах можуть спостерігатися певні відмінності в класифікації будівель, які виявляються, насамперед, у найменуванні класів, у їх кількості та конкретизації, проте загальний шаблон таких класифікацій є схожим. Інформація про типи будівель, або типи ЗК може бути завантажена з різних відкритих баз даних,

наприклад *OSM*, а потім занесена до атрибутивної таблиці набору будівель у вигляді вищезазначеної стандартизованої класифікації.

Аналогічні закономірності у зміні ЕнСп спостерігаються також для характеристики віку будівлі, що визначається роком її спорудження. Так, в одному з досліджень було виявлено, що різниця в ЕнСп в kWh/m^2a може змінюватись від 250-280 одиниць для будинків зведених у ХІХ столітті до 70-90 одиниць для будинків, збудованих у ХХІ столітті. Причому, за рідкісними винятками, спостерігається поступове зниження ЕнСп протягом усього ХХ століття [66]. Головним чином, така закономірність пов'язана з тим, що старі будівлі мають менш ефективну теплоізоляцію через застарілі системи опалення та вентиляції, застарілі вікна, наявність різних тріщин і щілин у стінах будівель, тощо. Прослідкувавши закономірність зниження ЕнСп з віком будівлі, ми можемо виділити окремі класи періодів спорудження будівель з відповідними їм усередненими значеннями ЕнСп. Інформація про вік будівель може бути завантажена з різних державних та муніципальних баз даних й геопорталів, що надають різні просторові та статистичні дані про конкретні міста.

Для визначення шаблонних значень ЕнСп для будівель різного типу та віку, які будуть враховуватися при обчисленні оцінки, необхідні дані ЕнСп, зібрані з реальних показників лічильників. Ці дані мають бути зібрані за достатньо великою та репрезентативною вибіркою будівель, яка рівномірно охоплюватиме будівлі різного типу та віку. Важливо також врахувати кліматичні особливості тієї території, з якої приймаються дані з показників лічильників. Так, погодні умови у тому чи іншому кліматичному поясі можуть істотно впливати на природній обігрів чи охолодження будівель, що позначатиметься на їх рівні ЕнСп. Врахування погодних умов для кожної окремої локації істотно ускладнюватиме процедуру автоматизованої оцінки ЕнСп, тому нами приймаються показники лічильників з міст, що мають типовий для більшості європейських країн клімат. В якості оптимальних даних, що відповідають вищезазначеним вимогам нами використовуються

дані з вимірювань лічильників м. Дортмунд, Німеччина [204]. За цими даними сформована семантична таблиця, яка показує залежність рівня ЕнСп будівель від його типу та віку (табл. 3.1). Ці дані є усередненими значеннями ЕнСп, за якими надалі корегуватимуться кінцеві показники ЕнСп будівель, обчислені з геометричних даних низькополігональних моделей.

Таблиця 3.1

Семантична таблиця ЕнСп будівель (kWh/m^2a) на основі узагальнених даних щодо різних урбанізованих територій у. Німеччині.

Вік побудови \ Тип будівлі	-1900	1901-1950	1951-1975	1976-2000	2001-2010	2011-2017	2018-2020
EFH	280	240	210	160	120	90	35
RDH	260	230	210	150	110	50	40
RDH (комерційна)	240	200	160	140	80	40	20
KMFN	250	240	170	150	120	80	20
GMFN	245	230	150	130	110	60	15
НН	-	210	130	120	90	50	10

Дана таблиця може використовуватися для оцінки ЕнСп забудовами міст, які в цілому мають схожі характеристики з забудовою м. Дортмунд. Насамперед це мають бути міста, що мають схожі кліматичні умови та мають схожі особливості міського планування. Якщо ж досліджувана місцевість має мало спільних властивостей із м. Дортмунд, то для неї мають бути отримані більш релевантні дані.

Нарешті, наступними двома семантичними характеристиками, які приймаються для оцінки ЕнСп, є висота поверхів у будівлі та їх кількість. Кількість поверхів є допоміжним показником, який виступає знаменником щодо загальної висоти будівель при розрахунку середньої висоти поверхів. Інформація про кількість поверхів будівель найчастіше може бути отримана з бази даних *OpenStreetMap* за тегом *building:levels*, а висота будівель, у свою чергу, отримується за результатів обробки лідарних даних [161]. Слід окремо відзначити, що висота поверхів зазвичай записується у базі даних з абсолютної позначці стелі кожного поверху (передбачається, що висота поверхів може

бути як однакова, так і різна), а всі інші розрахунки поверховості будівлі може бути вже похідними від цих характеристик.

Кореляція між зазначеними характеристиками поверховості будівель та рівнем їх ЕнСп є найбільш очевидною з усіх представлених раніше характеристик, адже з висотою будівель збільшується їхня корисна площа і відповідно підвищуються витрати енергії на її обслуговування.

Ключовим параметром при оцінці рівня ЕнСп будівель в рамках даного користувачького сценарію є корисна площа будівлі, яку можна також назвати призначеною для опалення площею [117]. Розрахунок цього показника може бути виконаний за формулою з німецьких стандартів енергетичної ефективності та вимог до енергозбереження (*EnergieEinspar Verordnung – EnEV*) [204]:

$$A_N = V_e \left(\frac{1}{h_G} - 0.04m^{-1} \right) \quad (3.6)$$

де A_n – корисна площа будівлі, V_e – загальний об'єм будівлі, визначений за лідарними даними, h_G – середня висота поверхів у будівлі, отримана шляхом поділу висоти будівлі на кількість поверхів, m – одиниця метри. Значення 0.04 є еталонним коефіцієнтом теплоопору огорожувальних конструкцій будівлі (*R-value*). Середня висота поверхів h_G розраховується наступним чином:

$$h_G = \frac{h_B}{n} \quad (3.7)$$

де h_B – висота будівлі, визначена за лідарними даними, n – кількість поверхів.

Далі необхідно взяти до уваги, що питоме значення ЕнСп будівлі в kWh/m^2a розраховується в Німеччині на підставі реальних показань теплотічильників будинків (загального обсягу ЕнСп у будинку на рік, який ділиться на значення корисної площі) [137]. Наш підхід заснований на зворотному завданні – маючи розраховані показники корисної площі, ми множимо їх на еталонні значення kWh/m^2a , відкориговані з урахуванням типу та віку будівлі, і отримуємо таким чином абсолютні величини загального обсягу ЕнСп у будинку на рік.

Кінцевим етапом оцінки $EnSp$ будівель є призначення класів енергоефективності будівель, в залежності від розрахованих для них показників $EnSp$. Кожний клас (від **A** до **G**) відповідає окремому діапазону значення kWh/m^2a (рис. 3.30). Що вище клас, то менший рівень $EnSp$ має будівля, і, відповідно, то більш енергоефективною вона є. Саме за цими класами та відповідною до них кольоровою гамою надалі можна виконувати візуалізацію просторового розподілу $EnSp$ забудов.

Так само, як і при оцінці чисельності населення, усі розрахунки $EnSp$ можуть бути виконані у середовищі *QGIS*, а результати надалі передаються до *JSON*-файлів відповідних моделей і візуалізуються у 3D-сцені у якості тематичного атрибутивного показника, що характеризує моделі будівель [38].

Таким чином, узагальнюючи викладений матеріал у даному підрозділі, можна виділити п'ять ключових процедур, що виконуються нами в рамках користувацького сценарію просторової оцінки $EnSp$ забудов (рис. 3.31):

1) завантаження геометричних параметрів будівель – у ГІС імпортується шар будівель, що містить атрибутивні дані про площу, висоту та об'єм будівель з *JSON*-файлів, прив'язаних до побудованих на підставі лідарних даних низькополігональних моделей будівель;

2) завантаження семантичних характеристик будівель – до наявного шару будівель додається інформація про тип, вік будівлі та кількість поверхів, що завантажуються з *OSM* та інших відкритих баз даних. Типи будівель встановлюються відповідно до стандартизованої класифікації (**EFH**, **RDH**, **KMFN**, **GMFN**, **HH**);

3) розрахунок корисної площі будівель – показник розраховується за наявними геометричними параметрами будівель та даними про кількість поверхів з використанням спеціальної формули з *EnEV*;

4) визначення еталонного значення $EnSp$ будівель – розрахований показник корисної площі будівлі множиться на еталонне значення kWh/m^2a , отримане з реальних показників лічильників та корегується за семантичною таблицею в залежності від віку й типу будівлі;

5) призначення класу енергоефективності будівель – розрахований показник kWh/m^2a для кожної будівлі зводиться до певного класу енергоефективності (A-G), в залежності від діапазону значення kWh/m^2a , в який він потрапляє.

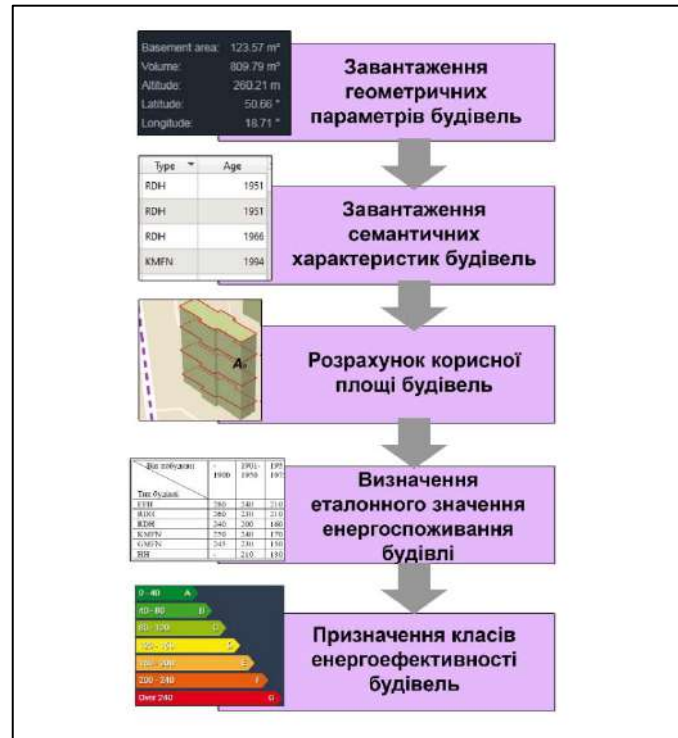


Рис. 3.31. Послідовність процедур для виконання оцінки ЕнСп будівель на підставі їх геометричної та семантичної інформації.

За умови наявності всіх необхідних вхідних даних, запропонована методика оцінки ЕнСп може бути застосована для будь яких, перш за все, європейських міст, що мають схожий з м. Дортмунд клімат. Якщо ж досліджувана територія не підпадає під зазначені критерії, то загальний алгоритм оцінки може залишитися тим же, проте семантична таблиця має бути відкоригована відповідно до інших вимірювань ЕнСп лічильниками, а також інших типів та вікових діапазонів будівель, які будуть більш релевантними для даної території. Загалом, наповнивши базу даних необхідною геометричною та семантичною інформацією про забудову міст та узгодивши послідовність обчислювальних процедур, оцінку фактично може буде автоматизувати й надалі лише точково корегувати її для окремих будівель, які зазнали певних змін.

3.3.2. Приклади реалізації даного користувацького сценарію.

На підставі розрахованих даних ЕнСп будівель за допомогою описаної методики були побудовані тематичні тривимірні карти у середовищі *Cesium Viewer* на базі додатку *ELiT Geoportal*. Моделі *LOD1/LOD2*, які використовувалися для отримання необхідних геометричних характеристик при розрахунках рівня ЕнСп, можуть використовуватися для більш наочної візуалізації [32].

У якості першої базової локації для реалізації даного користувацького сценарію нами обрано місто Ейндховен, Нідерланди. Цьому місту, площею 88,84 км² характерна висока щільність забудови із суттєвою диференціацією типів та вікових груп будівель (рис. 3.32) [52]. Загалом у місті переважає сучасна забудова, з численними висотними будинками та великими комерційними комплексами, але є й щільнозабудовані історичні райони із традиційною забудовою. При цьому в Ейндховені активно вживаються заходи щодо модернізації будівель та збільшення ефективності енергетичної системи в цілому [94].

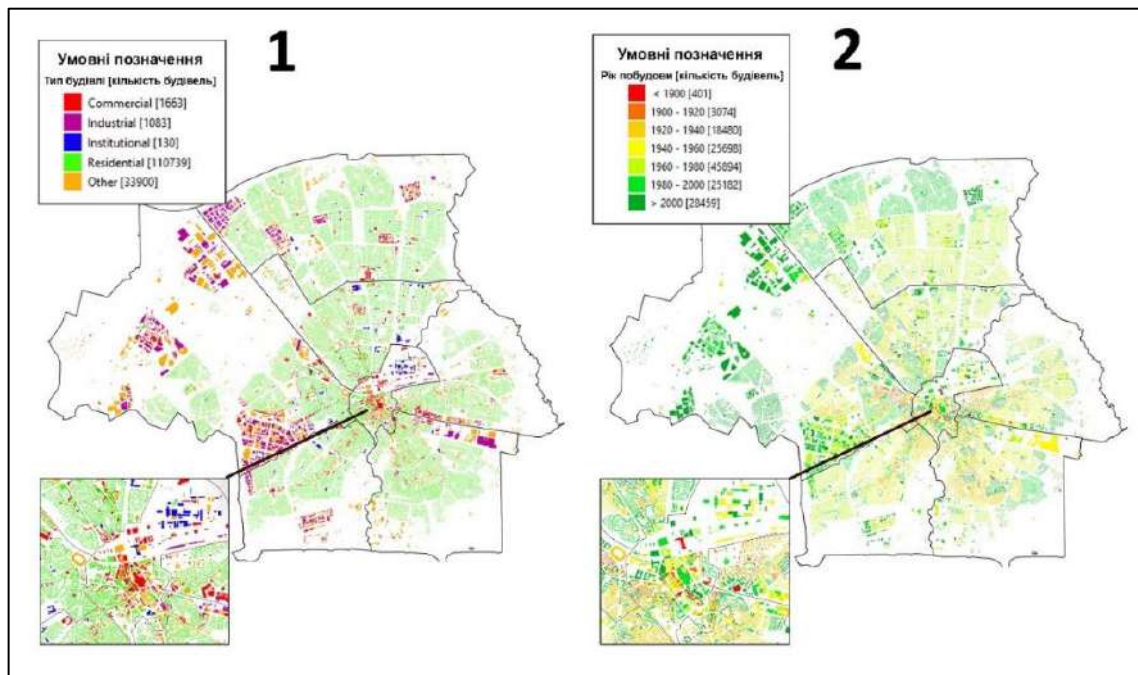


Рис. 3.32. Розподіл будівель у місті Ейндховен за їх типом (1) та роком побудови (2) за даними *OpenStreetMap*. (побудовано автором за даними [52, 161]).

Житлові будинки, побудовані в проміжку між 1960 і 1980 роками, є найбільш переважним типом забудови в Ейндховені і займають середню зону між центром і периферією. Околиці очікувано представлені молодими будинками, збудованими після 2000 року [52]. Центральна ж частина в цьому відношенні є змішаною, в ній старі будинки є сусідами з молодими, хоча вся історична забудова переважно сконцентрована саме в цій зоні. Ще одним важливим моментом є те, що комерційні та індустріальні зони переважно забудовані будинками після 2000 року, і розташовуються вони в окремих кластерах забудови, які явно виділяються на фоні житлової забудови. Ці зони ймовірно забудовані за одним планом та з використанням загальних енергетичних технологій, що має відбитися у загальній оцінці ЕнСп.

Класифікація типів будівель в Нідерландах загалом є подібною до німецької класифікації, розглянутої в попередньому підрозділі, до того ж ці країни знаходяться в одному кліматичному поясі, тому одержані шаблонні значення ЕнСп будівлями в німецьких містах можуть бути застосовані і до будівель м. Ейндховен.

За допомогою інструменту *BERA* для м. Ейндховен нами було пораховано близько 140 тис. моделей, що повністю покривають урбанізовану територію міста. Розрахунки проводилися за вихідними лідарними даними з відкритого нідерландського ресурсу висотних даних *Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)*. В якості допоміжних даних при розрахунках, використовувалися футпрінти будівель, завантажені з *OpenStreetMap* через ресурс *Overpass Turbo*. Портал *OpenStreetMap* також став джерелом семантичних характеристик, задіяних у розрахунках ЕнСп. Для класифікації тематичної карти була прийнята стандартизована в країнах ЄС класифікація *A-G*, що включає 7 класів енергоефективності будівель та характерну кольорову гаму (рис.3.33).



Рис.3.33. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель міста Ейндховен у вікні *Cesium Viewer*. (побудовано автором за даними [52, 54]).

Аналізуючи результати оцінки ЕнСп, що представлені на рис.3.33, передусім слід зазначити те, що по всій території міста спостерігаються певні кластери будівель, які відносяться до спільного класу енергоефективності. Будинки, що входять до цих кластерів, належать до окремих УГСит, яким характерні власні особливості енергоефективності будівель, а також власні причини, що впливають на рівень їхнього ЕнСп. Спільні властивості будівель у межах УГСит у даному випадку обумовлені спільним періодом забудови тієї чи іншої ділянки міста, спільними геометричними параметрами будинків, і спільним типом забудови [36]. Такий групований розподіл ЕнСп вказує на загальну планомірність та послідовність міської забудови, де кожен окремий район забудовувався за чіткими вимогами до будівельних конструкцій будівель та за єдиним стандартом системи опалення та вентиляції. При детальному перегляді можна побачити, що деякі УГСит формують спільні патерни та повторюються у різних ділянках міста.

Центральну частину міста переважно покривають будинки з високим рівнем ЕнСп (класи **E**, **F**, **G**). Ці будівлі, у свою чергу, переважно відносяться до малоповерхової житлової забудови (типи будівель **RDH** і **KMFN**), а рік побудови у них варіюється від 1900 до 1960. Житлові будинки зазвичай

споживають більше енергії, ніж комерційні, що докладно обговорювалося в попередньому підрозділі, а більш старим житловим будинкам, до того ж властива слабка теплоізоляція і застарілі системи опалення [69]. За сукупністю цих двох факторів ми можемо визначити найбільш проблемні ділянки забудови, які можуть потребувати вживання заходів щодо утеплення стін, оптимізації енергопостачання та модернізації систем опалення та вентиляції.

При цьому в окремих місцях центру міста спостерігається зосередженість будівель із низьким рівнем ЕнСп (класи **A, B, C**). Це переважно молоді будівлі (побудовані після 1980 року) комерційного типу, які збудовані за сучасними стандартами енергоефективності з використанням сучасних технологій обігріву та вентиляції. Характерною особливістю таких будівель є те, що вони мають більший об'єм і висоту в порівнянні з іншими будинками, що в умовах щільної забудови, призводить до негативного впливу на прилеглі малоповерхові будівлі, які змушені більшу частину дня перебувати в тіні від великих будівель і отримувати менше сонячного світла, а також слабо обдуватися природними потоками повітря [78]. Все це також призводить до більшого рівня ЕнСп малоповерхових будівель для їхнього обігріву або вентиляції, що простежується на тривимірній карті.

У центральній частині міста місцями виділяються осередки житлової забудови із низьким рівнем ЕнСп. Ймовірно, це ті ділянки, де вже було проведено певні реноваційні роботи з метою підвищення енергоефективності. Якщо для таких будівель вдалося досягти зниження щорічного ЕнСп, то аналогічна реновація може бути застосована і до інших будівель, що належать до такого ж патерну УГСит.

Ближче до околичних районів міста можна спостерігати поступове зниження середнього рівня ЕнСп групами будівель. Тут простежується цілком зрозуміла кореляція з віком будівель. У ході урбанізації місто розширювалося у напрямку від центральної частини і тому чим далі район розташовується від центру, тим він, очікувано, молодший, а відповідно забудований з використанням більш сучасних енергозберігаючих технологій. Приклад

такого переходу до периферійних районів, побудованих у пізніший період зображено на рис.3.34.



Рис. 3.34. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будинків околиць міста Ейндховен у вікні *Cesium Viewer*.

Район з більш енергоефективними будинками класу *E* забудовується вже явно пізніше за райони з класами *F* і *G* у лівій частині карти. При цьому на околицях цього району спостерігаються будинки з ще більшим рівнем енергоефективності (класи *D*, *C*, *B*), які, ймовірно, є наймолодшими будинками в цьому районі. З цікавого, на малюнку також можна відстежити, що багатоквартирні будинки зі стрічкової забудови все ж таки споживають більше енергії, ніж окремі будинки на одну родину, хоча в попередньому розділі відзначалося протилежне. З цього можна припустити, що вік будівлі є все ж таки більш впливовим на рівень ЕнСп фактором, ніж тип будівлі, принаймні у категорії житлової забудови.

Окремо варто розглянути ділянку із забудовою індустріального району *De Hurk*, яка виділяється на фоні навколишніх житлових районів своїми масивними будинками з низьким рівнем ЕнСп (рис.3.35). Він знаходиться в околиці Ейндховена, але при цьому в зоні високої щільності забудови.



Рис.3.35. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель індустріального району міста Ейндховен у вікні *Cesium Viewer*.

Цей район примітний тим, що він був забудований переважно після 1970 року в межах існуючої житлової забудови. З усіх боків він оточений більш старими житловими будинками, які мають більший середньорічний рівень ЕнСп. Тут зосереджено будинки великих розмірів, яким властиві дещо інші вимоги до ЕнСп, аніж більшості житлових будинків. Насамперед, такі будівлі можуть мати менш вимогливі стандарти теплоізоляції, оскільки вони не призначені для проживання. Проте, це залежить від специфіки конкретного підприємства у цій зоні та специфіки технологічних процесів, що у ньому відбуваються. Різні складські приміщення можуть споживати мінімальну кількість енергії при великих розмірах, але у виробничих приміщеннях, з великою кількістю складних, експлуатованих обладнання, попит на енергію буде значно вищим. У конкретній ситуації на рис.3.35 район або наповнений підприємствами, специфіка роботи яких не вимоглива до великих обсягів енергії, або ж ці підприємства засновані на екологічних, енергозберігаючих технологіях, які дозволяють нівелювати високі вимоги до енергії сучасними оптимізаційними рішеннями [107]. У будь-якому випадку, розташування індустріального району в межах житлової забудови може негативно вплинути на прилеглі житлові будинки, про що вже зазначалося вище.

Ще однією локацією, для якої було виконано оцінку ЕнСп будівель, є інше нідерландське місто – Амстердам. Тут також переважає забудова житлового типу, однак, у плані віку, тут вже суттєво переважають старіші будинки, збудовані не пізніше 1940 року (рис.3.36). У самому історичному центрі може зустрічатися безліч будівель XVIII і XIX століть [192]. Молоді будинки практично не займають центральну частину, а винесені в окремі околичні райони. Те саме стосується будівель індустріального типу.

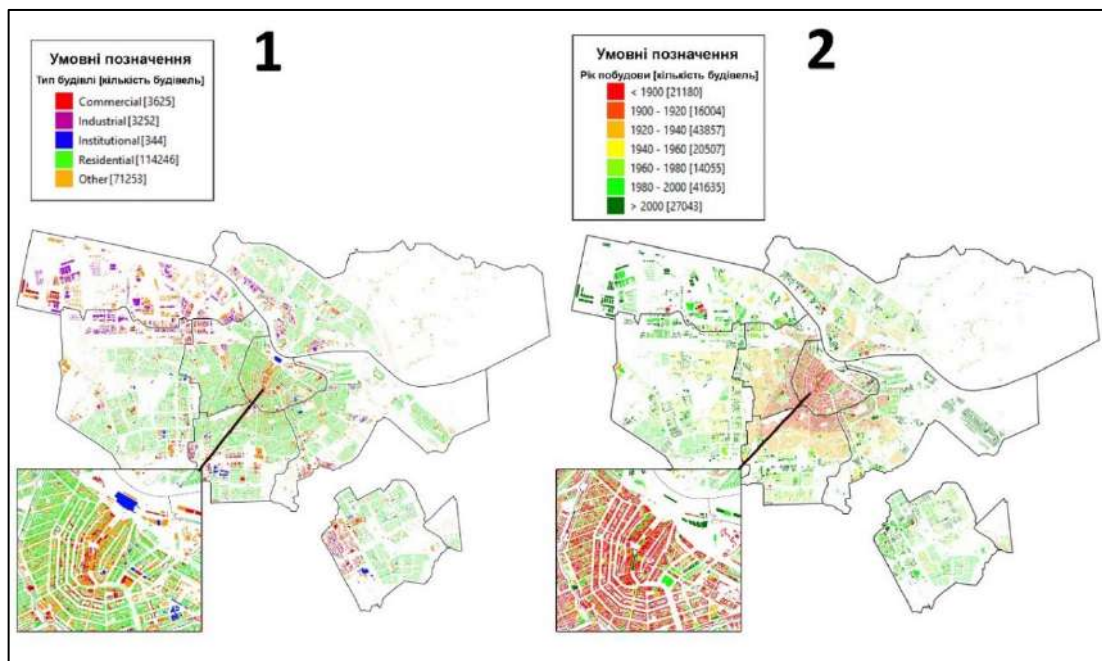


Рис.3.36. Розподіл будівель у місті Амстердам за їх типом (1) та роком побудови (2) за даними *OpenStreetMap*. (побудовано автором за даними [52, 161]).

Інструментом *BERA* для м. Амстердам було розраховано понад 190 тис. моделей будівель з використанням лідарних та атрибутивних даних із тих самих джерел, що й для м. Ейндховен. Це місто має власні особливості розподілу рівня ЕнСп, які можна відстежити на тривимірних картах (рис.3.37).



Рис.3.37. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель міста Амстердам у вікні *Cesium Viewer* (побудовано автором за даними [52, 54]).

В УГС Амстердаму набагато більшу роль відіграє історична забудова, яка має чіткі обриси зони з високим рівнем ЕнСп (клас *G*). Судячи з карти, центральна частина міста щорічно споживає чи не вдвічі більше енергії порівняно з рештою міста. У самому центрі зосереджені будівлі, які були збудовані ще до 1800 року, потім у найближчих околицях розташовується пояс будівель, збудованих у період між 1800 і 1900 роком. Всі ці будівлі мають високий попит на електроенергію, насамперед через свій вік. Найстаріші будівлі взагалі вимагають регулярного догляду та моніторингу змін для збереження цілісності самої будівлі та працездатності систем вентиляції та опалення. Тут потрібна розробка низки комплексних рішень щодо підвищення енергоефективності історичної забудови та модернізації систем теплопостачання. Але при цьому важливо зберігати історичну автентичність таких районів і гармонійно вбудовувати новітні конструкції в історичне міське середовище, що вже є окремим завданням у сфері урбаністики [194].

У центральній частині також спостерігаються окремі осередки енергоефективних будівель, хоча їх розміри та чисельність вже значно нижчі порівняно з розглянутим раніше Ейндховеном. Так, при детальному перегляді можна помітити безліч точкових ділянок з нижчим рівнем ЕнСп (класи *D* і *C*),

які, ймовірно, є окремими модернізованими будинками, хоча окремі відокремлені кластери таких будівель практично відсутні (рис. 3.38).



Рис.3.38. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель історичного центру міста Амстердам у вікні *Cesium Viewer*.

Якщо розглядати наближену до центру та середню зону міста, то тут можна відзначити закономірне накладення одного типу забудови на інший – і це простежується у суттєвій різниці в рівні ЕнСп між різними фрагментами забудови одного й того самого району (рис.3.39).



Рис. 3.39. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель житлового району міста Амстердам у вікні *Cesium Viewer*.

На окремих ділянках, будівлі класу *C* практично чергуються з будівлі класу *F*. При цьому навіть із моделей *LOD1* уловлюються чіткі архітектурні

відмінності між цими будівлями. Така мінливість рівня ЕнСп на обмеженій ділянці забудови пояснюється кількома чинниками. По-перше, в межах житлової забудови часто можуть розташовуватись комерційні заклади щоденного обслуговування (магазини, кафе, аптеки), для яких важливим фактором, в силу специфіки їхніх послуг, є максимальна близькість до пунктів попиту (місця проживання населення) [62]. Такі заклади розташовуються прямо в житлових районах, але споживають значно менше електроенергії порівняно з навколишніми житловими будинками. По-друге, в житлових районах систематично можуть розміщуватись певні інституційні заклади, такі як школи, дитячі садки, клініки, які також можуть відрізнятися більшою енергоефективністю. Будинки для цих закладів у ході планової забудови зазвичай споруджуються одночасно з житловими, але зі своїми особливостями в енергосистемі. По-третє, у процесі урбанізації існуючі житлові райони можуть додатково ущільнитись новими житловими будинками, збудованими з використанням нових енергозберігаючих технологій. Кожен із згаданих чинників так чи інакше простежується на рис.3.39.

Цікавою особливістю Амстердама, яку можна виділити з його тривимірної карти, є висока диференціація різних форм будівель та їх конфігурацій, які спостерігаються навіть у межах невеликих ділянок. Кожна з таких конфігурацій має власну специфіку та період забудови, які дають стійкий рівень ЕнСп у її межах і виділяють її на фоні інших конфігурацій. Так, у межах відносно невеликої ділянки площею 1 км² зосереджено безліч конфігурацій будівель, що належать до 5 різних класів ЕнСп (рис. 3.40).



Рис. 3.40. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель житлового району міста Амстердам у вікні *Cesium Viewer*.

На рис. 3.41 представлені фактично всі типи житлової забудови: окремі одноквартирні будинки, стрічкова забудова, малі та великі багатоквартирні будинки, високоповерхові будинки тощо. І тут можна помітити часткову тенденцію, яка полягає у підвищенні енергоефективності будівель зі збільшенням їх розмірів – маленькі будівлі мають переважно високий рівень ЕнСп, середні за розміром будівлі мають середній рівень, а великі, відповідно, мають найменший рівень ЕнСп. Щоправда, варто відзначити, що великі розміри часто властиві молодшим будинкам, а отже, більш модернізованим. При цьому і серед найменших будівель зустрічаються енергоефективні будинки з рівнем *C* та *D* – це ті будівлі, до яких вже могли бути застосовані реноваційні роботи для підвищення їхньої енергоефективності.

Схожий розкид класів, але у більш хаотичному просторовому розподілі спостерігається в одному зі східних житлових районів Амстердаму (рис. 3.41).



Рис. 3.41 Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель житлового району міста Амстердам у вікні *Cesium Viewer*.

У цьому районі спостерігається не тільки диференціація показників між сусідніми будівлями, а й диференціація між окремими корпусами однієї і тієї ж будівлі, причому в окремих випадках різниця в ЕнСп між ними становить більш ніж у 2 рази. Це може свідчити про точкову модернізацію будівель в окремих кварталах, що полягає в спорудженні прибудов, які не лише самі по собі є більш енергоефективними, оскільки побудовані за більш сучасними технологіями, а й зміцнюють існуючу будівлю, забезпечуючи їй більший обігрів. Ще прибудови часто відводяться під більш енергоємні комерційні заклади різного типу. У прибудов також може бути і негативний ефект, що полягає у порушенні міського дизайну історичних районів, проте, при грамотному застосуванні принципів урбаністики, такий ефект може бути мінімізований [194].

Цікавим спостереженням на підставі рис.3.41 є те, що житлова забудова тут межує з густою парковою зоною із водоймищем. Хоча в розрахунках не бралися до уваги кліматичні показники в межах того чи іншого району міста, варто все ж таки відзначити, що часто на рівень ЕнСп можуть впливати навіть локальні кліматичні особливості, які полягають, наприклад, у підвищенні вологості повітря та зниженні температури поблизу водойм, у додатковому

зовнішньому обігріві будівель, розташованих на сонячній стороні або в інтенсивному обвітрюванні поодиноких високих будівель, розташованих у турбулентних зонах [183]. Всі ці фактори спричиняють окремі УГСит, в яких будівлі вимагають особливих рішень щодо забезпечення комфортних умов проживання, що позначається на їхньому рівні ЕнСп. З урахуванням вищесказаного, можна очікувати, що у високоповерхових будинках у правій частині карти може бути істотно більший попит на обігрів приміщення через їхнє розташування в зеленій зоні поряд з водоймою або навпаки менший попит на кондиціювання повітря в теплу пору року. Таким чином, запровадження додаткових кліматичних змінних, наприклад через побудову локальних кліматичних зон, забезпечило б більш точну оцінку ЕнСп будівлями.

Раніше, при аналізі оцінки ЕнСп забудовою в Ейндховені було зазначено, що рівень ЕнСп будівель у індустріальних зонах залежить від специфіки діяльності підприємств, що у них знаходяться. В Ейндховені всі будівлі цієї зони мали приблизно рівний рівень ЕнСп, що вказувало на їхню спільну специфіку, спільний період забудови та, відповідно, спільні будівельні конструкції. В Амстердамі ж спостерігається істотна диференціація рівнів ЕнСп будівлями та спорудами в одній із індустріальних зон (рис. 3.42).

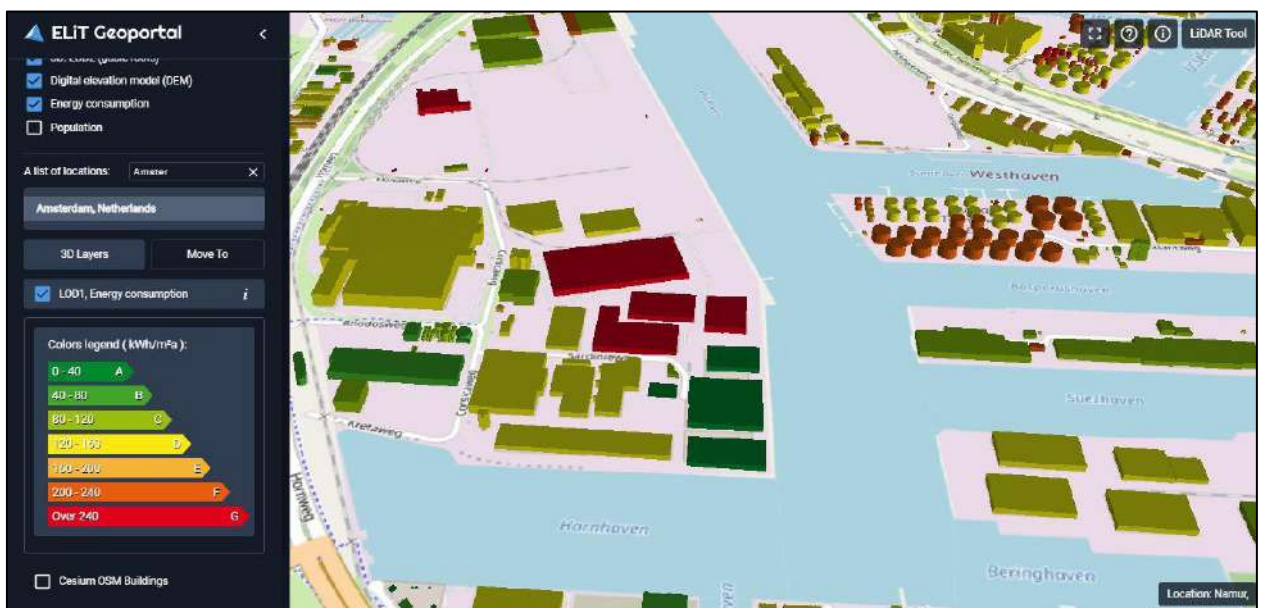


Рис.3.42. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель індустріального району міста Амстердам у вікні *Cesium Viewer*.

У межах невеликого фрагмента індустріальної зони спостерігається суттєвий розкид значень ЕнСп за 5 різними класами (A, B, C, F, G). Таке поєднання різних класів у межах однієї локації може насамперед вказувати на різницю у попиті на електроенергію у тому чи іншому корпусі підприємства. Так, частина будівель має показник ЕнСп більш ніж $240 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, що, як мінімум, у 6 разів перевищує цей показник у сусідніх будівлях. У цій частині будівель, ймовірно, можуть відбуватися інтенсивні виробничі процеси з важкими обладнаннями, а сусідні будівлі можуть бути звичайними складами, сховищами та приміщеннями для персоналу. При цьому між цими будинками також може бути суттєва різниця в роках будівництва, що і призводить до таких перепадів рівнів ЕнСп.

Наступною локацією, для якої було змодельовано оцінку ЕнСп, є місто Маастріхт. Це найменше за площею місто (59 км^2) з тих, що розглядаються в даному розділі, і містить воно всього 60 тис. будівель, згідно з даними *OpenStreetMap*. Тому для нього було пораховано моделі рівня *LOD2*, які дозволили отримати більш точну оцінку ЕнСп будівель на окремих житлових ділянках (рис.3.43).



Рис. 3.43. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель міста Маастріхт у *LOD2* у вікні *Cesium Viewer* (побудовано автором за даними [52, 54]).

Ключовою відмінністю моделей *LOD2* у порівнянні з *LOD1* є наявність більш деталізованої, але спрощеної форми даху. Така зміна насамперед відбивається на малоповерховій житловій забудові, для якої простіше за все змодельювати спрощений дах, який при цьому найбільше відповідатиме реальному даху відповідної будівлі. Інші типи забудови, як правило, матимуть більш складні форми дахів, з якими будуть більш грубі похибки при моделюванні з використанням алгоритмів *BERA* [32]. Саме тому при аналізі оцінки ЕнСп у цьому місті інтерес передусім представляють окремі локації малоповерхової житлової забудови (рис.3.44).



Рис. 3.44. Тривимірна візуалізація результатів оцінки ЕнСп будівель житлового району міста Маастріхт у *LOD2* у вікні *Cesium Viewer*.

Першим спостереженням, яке можна відзначити під час аналізу забудови, змодельованої в *LOD2*, є наявність набагато більшої диференціації форм будівель. Кожна будівля, яка в *LOD1* була б представлена призматичною формою, подібною до всіх інших, в *LOD2* може мати унікальний дах, який виділятиме його від інших будівель і даватиме більш детальний набір геометричних характеристик, які в свою чергу забезпечать більш точну оцінку ЕнСп [64]. На рис.3.44 можна відзначити не тільки високу диференціацію форм, але й високу диференціацію рівнів ЕнСп (6 із 7 класів енергоефективності), яка у тому числі витікає із згаданої деталізації геометрії.

Важливою перевагою моделювання в *LOD2* для даного сценарію користувача є можливість проведення більш докладного візуального аналізу та оцінки місцевості з вилученням нових закономірностей просторового розподілу тематичного показника. Наприклад, по моделі *LOD2* легше візуально визначити підтип будівлі, кількість поверхів та наявність додаткових прибудов. У моделях *LOD1* упускається висота будівлі без урахування даху, тому що в якості висоти призми приймається максимальна точка на самому даху – це ускладнює ідентифікацію будівлі і не дозволяє точно відрізнити двоповерховий будинок із призматичним дахом від одноповерхового будинку з високим пірамідальним дахом. Те саме стосується всіляких навісів, карнизів, гаражних прибудов будівлі, які в *LOD1* просто зливаються з основним корпусом в єдиній призматичній моделі і не ідентифікуються. Будівля, яка включає в свою площу гараж, в середньому, ймовірно, буде споживати менше енергії, ніж будівля, яка матиме ту ж форму *LOD1* і площу, але замість гаража в ньому буде ще одна додаткова кімната, яка має більший попит на обігрів та кондиціонування. На прикладі однієї і тієї ж моделі наочно продемонстровано зазначені переваги *LOD2* для його ідентифікації та більш точної оцінки ЕнСп (рис.3.45).

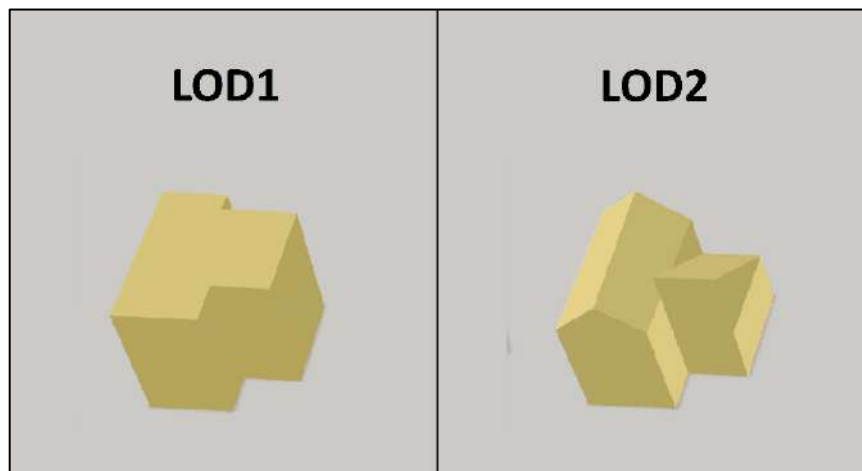


Рис.3.45. Порівняння моделей *LOD1* та *LOD2* побудованих для оцінки ЕнСп.

Таким чином, на основі користувацького сценарію енергоспоживання нами було визначено та описано безліч просторових закономірностей

розподілу рівня ЕнСп будівель в урбанізованому середовищі трьох різних міст. Нам вдалося не лише виявити загальні тренди використання енергії міською забудовою різного типу, а й відстежити низку локальних особливостей на рівні окремих УГСит. На підставі аналізу тематичних тривимірних карт забудови міст Ейндховен, Амстердам та Маастріхт, побудованих за стандартами *CityGML*, були виявлені фактори, що різною мірою впливають на рівень ЕнСп будівель, а саме: вік будівлі, його тип, розмір та форма, специфіка виробничих процесів у підприємстві, розташування малоповерхової забудови поблизу високоповерхової, модернізація окремих будівель і локальні кліматичні особливості. У таблиці 3.2 представлені перелічені фактори та особливості їхньої ідентифікації на основі тривимірної карти оцінки ЕнСп.

Таблиця 3.2

Фактори, що впливають рівень ЕнСп будинків.

<i>Фактор, що впливає на рівень ЕнСп будівлі.</i>	<i>Прояв на тривимірній карті забудови.</i>
Вік будівлі	<ul style="list-style-type: none"> • Поступове зниження рівня ЕнСп від центральних, історичних районів до периферійних, нових районів.
Тип будівлі	<ul style="list-style-type: none"> • Більш високий рівень ЕнСп в житловій забудові порівняно з іншими типами будівель. • На рівні окремих УГСит простежується закономірність зміни рівня ЕнСп будівель залежно від підтипу житлової забудови.
Розмір та форма будівлі	<ul style="list-style-type: none"> • На окремих ділянках індустріальних зон простежується збільшення ЕнСп будівель із збільшенням їх розмірів за інших рівних умов. • Багатоповерхова житлова забудова споживає менше енергії, ніж малоповерхова, що, втім, пов'язано з різницею у віці таких будівель. • LOD2 моделі дозволяють ідентифікувати будівлі з пірамідальними формами дахів та наявністю гаражних прибудов, які за інших рівних умов мають менший попит на енергію.
Специфіка виробничих процесів у підприємстві.	<ul style="list-style-type: none"> • Більш високий рівень ЕнСп може бути в корпусах підприємств, у яких відбуваються інтенсивні виробничі процеси.
Розташування малоповерхової забудови поблизу багатоповерхової.	<ul style="list-style-type: none"> • У деяких районах окремих міст високоповерхова забудова тісно сусідить із малоповерховою і тим самим негативно впливає на неї, перешкоджаючи її природному сонячному обігріву, що підвищує попит на додатковий обігрів цих будівель.

Модернізація окремих будівель	<ul style="list-style-type: none"> • На рівні окремих УГСит зустрічаються будівлі, які за інших рівних умов споживають помітно менше енергії, на відміну від інших навколишніх будівель. • Наявність прибудов у окремих будівель, які є більш енергоефективними та сприяють утепленню самої будівлі.
Локальні особливості кліматичні	<ul style="list-style-type: none"> • Житлові будівлі, що розташовані в зелених зонах, поруч із водоймами, в зонах, що обвітрюються, можуть мати більший/менший попит на енергію для обігріву/кондиціонування приміщень.

Розглянутий підхід до оцінки ЕнСп міськими забудовами навіть в умовах нестачі семантичної інформації здатний дати прийнятний результат, який з досить високою точністю корелюватиме з реальними показаннями лічильників. Однак, для кращого розуміння цих результатів необхідно мати уявлення про загальні властивості, що впливають на диференціацію ЕнСп у різних будинках. І в ході цього дослідження нами було вилучено низку УГС-властивостей міст, що стосуються розподілу рівня ЕнСп у типовій міській забудові та факторів, що на це впливають. Маючи знання про ці властивості можна проводити якісний аналіз результатів автоматичного моделювання для будь-якого міста зі схожими умовами та характеристиками. При цьому оцінка ЕнСп може бути багаторазово вдосконалена, якщо забезпечити для цього більшу повноту семантичної інформації. Насамперед, коригуванню оцінки сприяють дані про локальні кліматичні зони міста, для кожної з яких можуть бути виведені власні усереднені значення ЕнСп, а також більш детальні дані про призначення будівель, кількість кімнат, теплопровідність будівельних конструкцій та наявність ремонту. Поліпшенню оцінки також сприятиме задіяння більшої кількості *LOD2* моделей, зокрема щодо житлової забудови.

Отримані за допомогою цього підходу результати мають досить високу прикладну цінність і можуть бути використані в різних цілях різними організаціями та окремими користувачами. Наприклад, державні та муніципальні органи можуть використовувати результати оцінки для розвантаження енергетичної системи та перерозподілу енергії, планування

реновації та модернізації старих будівель, а також розробки комплексної політики щодо енергозбереження та скорочення викидів парникових газів. Приватним будівельним компаніям та інвесторам оцінка може допомогти при аналізі впливу конструктивних та архітектурних рішень на рівень ЕнСп будівель та оптимізації енергоефективності при проектуванні нових будівель. Орендодавцями будівель результати можуть використовуватись для визначення енерговитрат та виявлення ділянок, де можна скоротити ЕнСп, а орендарями – для прийняття рішень щодо вибору житлового чи комерційного приміщення з меншими енерговитратами. Зрештою, отримані дані можуть бути використані в різних міських дослідженнях при розробці стратегій сталого міського та регіонального розвитку.

3.4. Третій прикладний аспект – реалізація користувачького сценарію аналізу видимості у міському середовищі.

У попередніх розділах, під час аналізу міського середовища, основна увага була зосереджена безпосередньо на тривимірних моделях будівель. Вони надавали цінні геометричні характеристики будівель, що мають високу кореляцію з їх сторонніми характеристиками; відображали форму, розміри та щільність забудови, за якими встановлювалися УГС-властивості; а також дозволяли відстежити зміни в забудові, при порівнянні двох її різночасних моделей. У всіх випадках саме міська забудова розглядалася як єдино важливий елемент міського середовища, який можна було вивчити та виміряти на основі її тривимірної моделі. Однак, крім міських будівель і споруд, за якими з лідарних даних витягуються відповідні дискретні моделі, не менш важливим елементом міського середовища є вільний простір, що залишився в місті, який обмежується існуючими будинками. Саме цей простір є середовищем, в якому щодня перебувають і переміщуються міські жителі під час маятникових міграцій та просто проведення дозвілля. Обсяг цього простору у тій чи іншій частині міста є важливим параметром міського

середовища, який, як і параметри самих будівель, може бути важливим індикатором якості життя в міському середовищі та ефективності його використання. Тому його вимір на основі лідарних даних може стати ще одним важливим сценарієм користувача в рамках нашого дослідження.

Говорячи про вимір об'єму вільного простору в міському середовищі, варто зазначити, що сам по собі такий об'єм, розрахований для певної території, є лише антиподом її забудованого об'єму, який нами вже був детально вивчений у розділі 3.1, тому його вимір не дасть принципово нової інформації про міське середовище. Однак, у контексті позначеної в попередньому абзаці ролі вільного міського простору для міських жителів, об'єм цього простору може бути певною мірою переосмислений, якщо виміряти його з позиції спостереження самих мешканців міського середовища у його конкретній точці місцевості. З такої позиції обсяг вільного простору істотно відрізнятиметься і суб'єктивно сприйматиметься інакше, ніж, наприклад, з висоти пташиного польоту. По суті, цей об'єм, який сприймається з конкретної точки спостерігача, можна назвати видимим об'ємом міського простору, адже все, що знаходиться в його межах – знаходиться у полі видимості спостерігача. Вимірювання зазначеного видимого об'єму з використанням тривимірної моделі міської забудови і є тим, що можна назвати аналізом та оцінкою видимості.

Аналіз видимості, перш за все, є інструментом для вивчення окремих УГСит, адже отримуючи видимий об'єм із певної точки, ми отримуємо інформацію лише про конкретну УГСит [36]. Однак, з урахуванням формування патернів УГСит, можна встановити комплексну оцінку видимості для певного міста, якщо розрахувати видимий об'єм з різних точок спостереження в різних патернах УГСит. Крім цього, аналіз видимості може виконуватися просто з метою пошуку оптимального розташування спостерігача з максимальним охопленням видимості в урбанізованому просторі, або з метою оцінки видимості для конкретного об'єкту в місті.

Обчислення видимого об'єму у міському просторі може бути досить складною процедурою, для якої зараз розроблено низку алгоритмічних рішень у рамках різних методологічних *2D-3D* підходів. Далі ми коротко розглянемо основні підходи та принципи до виконання аналізу видимості в убанізованому середовищі, на основі яких було зроблено власні розробки.

3.4.1. Короткий методичний огляд 2D-3D підходів до аналізу видимості у міському середовищі.

У ранніх дослідженнях аналіз видимості у міському середовищі спочатку застосовувався для оцінки міського дизайну та оцінки привабливості міського пейзажу. Причому перші випадки такого застосування трапляються ще до появи ГІС-технологій – візуальний аналіз місцевості виконувався за серією фотографій та рисунків міста, які формували панораму міського оточення під час руху спостерігача дорогою чи тротуаром [53].

З кінця 70-х років минулого століття розвиваються дві фундаментальні методології аналізу видимості, а саме: концепція Ізовіст (*isovist* – англ.), заснована на аналізі векторного зображення та концепція Вьюшед (*viewshed* – англ.), заснована на аналізі растрового зображення.

Концепція ізовіст заснована на алгоритмі відстежуючого променя, який поширюється на всі боки від точки спостереження до найближчих перешкод у двовимірному просторі. Кінцеві точки таких променів формують так званий ізовіст, тобто полігональну зону видимості із заданої точки спостереження у вигляді замкнутого багатокутника [60, 63]. *2D*-ізовіст може бути розрахований з використанням архітектурного плану місцевості, який надає інформацію про форму забудованого середовища, позначаючи площу та положення будівель (рис. 3.46). Рельєф місцевості, а також архітектурно-морфологічні особливості міського середовища за такого розрахунку не враховуються, як і продовження прямої видимості за межами першого перетину будівлі. Тому ізовіст зображує лінії, які при перетині з вигідної точки забезпечують безперервний огляд цілі і не враховують більш віддалені об'єкти [171].

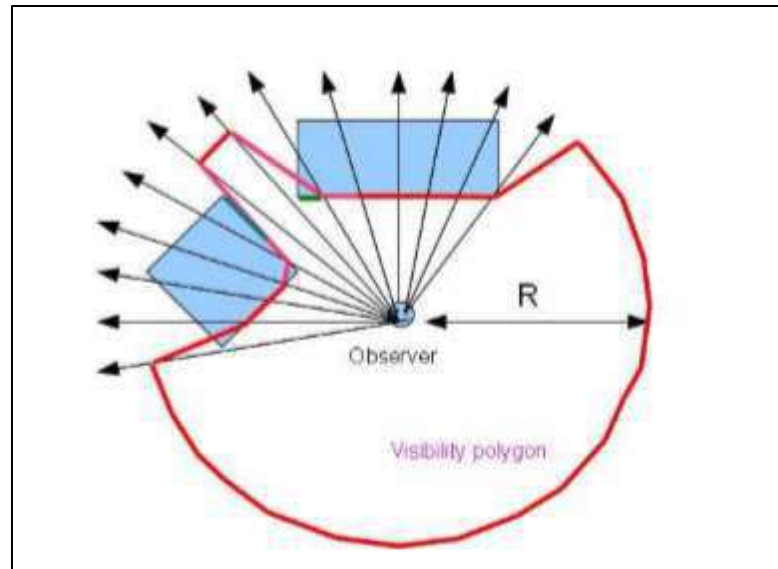


Рис.3.46. Схематичне подання роботи алгоритму відстежуючого променя [171].

Для побудови ізовіста у тривимірному просторі використовувалася інформація про висоту будівель, отримана із ЦМР [128]. В отриманій таким чином $2.5D$ -сцені міського середовища, ізовіст розраховується через побудову лінії видимості [59, 68]. Остання може бути визначена як візуальна лінія між двома точками (точка спостерігача і цільова точка), яка відбиває ті частини поверхні, що знаходяться або спроектовані на цю лінію, та які видно або не видно з позиції точки спостерігача. По суті, лінія видимості тут є ключовим елементом аналізу видимості в тривимірному урбанізованому середовищі. Розрахунок $3D$ -ізовіста таким чином виконується, коли лінія видимості замикає повне коло горизонту через послідовні ітерації, утворюючи ітеративну лінію видимості. Описане коло покриває зону перспективної видимості, а його радіусом є відстань між двома зазначеними раніше точками.

Концепція вьюшед заснована на ГІС-функціональності *Viewshed Analysis*, яка відноситься до категорії інструментів аналізу рельєфу. Інструмент вьюшед приймає на вхід ЦМР, з якої витягуються значення висот кожної її комірки, щоб визначити її видимість для конкретної заданої комірки – точки спостереження [206]. Усі комірки, які потрапляють у межі видимості із встановленої точки спостереження й формують фрагментарну область

видимості. Цей підхід насамперед призначений для аналізу природного рельєфу та ландшафту, адже він не передбачає врахування дискретних моделей будівель. Будівлі в такому аналізі можуть бути враховані тільки при включенні їх у загальну цифрову модель поверхні, проте при цьому суттєво знижується точність представлення їхньої архітектурної морфології [135].

Цікавим прикладом аналізу видимості у міському середовищі, що поєднує в собі елементи згаданих раніше концепцій, є використання воксельної моделі міського оточення, побудованої на основі лідарних даних. Суть цього підходу полягає у застосуванні воксельної моделі з адаптивною прозорістю, яка дозволяє згенерувати через вьюшед шар об'єктів земної поверхні (будівель та дерев) й далі розрахувати 3D-ізовіст через алгоритм відстежуючого променя [169].

В якості найбільш релевантного методологічного підходу до аналізу видимості в рамках тривимірного моделювання міського середовища можна розглядати так званий «сферичний підхід» [67]. Суть цього підходу полягає у побудові тривимірної сфери, центром якої є точка спостерігача у міському просторі. Сфера будується в межах тривимірної моделі міської забудови, за рахунок якої обчислюється фактор відкритості неба (*SVF – Sky-View Factor –* англ.) [93]. Цей показник є геометричною мірою, що показує відношення видимої площі неба до повної видимої площі над точкою спостереження. По суті, чим більше значення *SVF* (від 0 до 1), тим більшу частину неба видно з певної точки в міському середовищі.

Ще одним показником, який може бути порохований в рамках сферичного підходу, є індекс відкритості простору (*SOI – Spatial Openness Index –* англ.). На відміну від показника *SVF*, який зосереджений на площі видимого неба, *SOI* показує об'єм видимого простору в цілому (з заданої точки спостерігача), і його функції аналогічні тим, що обчислюються для 3D-ізовіста (рис.3.47). Авторами підходу *SOI* визначається, як відношення обсягу площі його буферної зони [91]. Передбачається, що об'єм будівлі з більшою площею такої зони забезпечує такій будівлі більшу привабливість через забезпечення

більшої взаємодії з різними елементами міського середовища, включаючи природну частину цього середовища – такими як сонячне світло, свіже повітря та краший оглядовий вид. Позначена вище площа буферної зони може бути однією з перших урбогеосистемних характеристик, що розраховуються в рамках формалізованого представлення міського середовища.

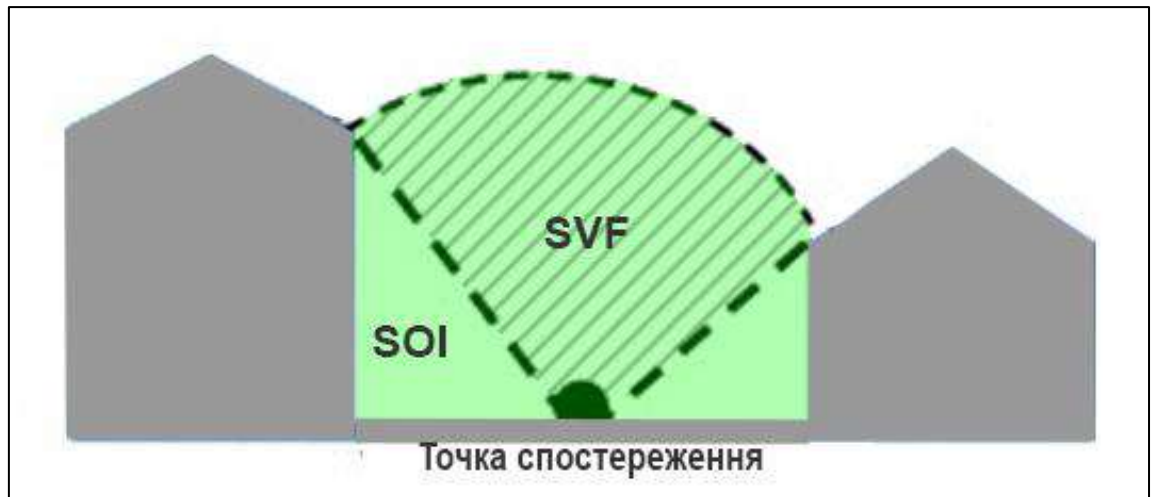


Рис.3.47. Схематичне зображення показників *SVF* та *SOI* у сферичному підході (побудовано автором за [91]).

Саме на основі принципів сферичного підходу нами розроблено власний підхід до аналізу видимості, а саме – концепція півсфери видимості (ПСВ), яка була реалізована у вигляді інструменту аналізу лідарних даних у веб-ГІС. В основі концепції ПСВ лежить теорія сприйняття екологічних оптичних променів (ЕОП) у середовищі існування людини [95]. В аспекті міського простору, згідно з цією теорією, можна припустити, що показник видимості простору може бути вимірний на підставі кумулятивного об'єму простору, зайнятого оптичними променями, відбитими від обмежуючих даних об'єм поверхонь. У такому разі, ЕОП-видимість буде кращими оптичними умовами видимості, що відкриваються спостерігачеві в певній точці міського середовища.

Розрахована у міському середовищі ПСВ, таким чином, відобразатиме видимий об'єм, наповнений ЕОП, з певної точки спостереження. Цей об'єм обмежується заданим користувачем радіусом півсфери, а також точками, що

лежать на поверхнях дискретних об'єктів змодельованого довкілля. Дані точки, у свою чергу, будуть визначатися за допомогою сканування повного азимутального кола двовимірною лінією видимості, що в результаті і сформує тривимірну ПСВ. Алгоритмічна послідовність такого переходу від лінії видимості до ПСВ з подальшою візуалізацією отриманих результатів будуть описані в наступному підрозділі.

3.4.2. Формалізована методика «Лінія Видимості – Півсфера Видимості у міському середовищі».

Як вже зазначалося раніше, лінія видимості є основним інструментом аналізу видимості у міському середовищі. У формалізованій моделі такого середовища вона являє собою оптичний промінь L_{ij} , який складається з початкової точки O_i (заданої користувачем у довільному місці), точок перешкод Q_{ij} (точки зіткнення променя з об'єктами на земній поверхні) та кінцевої (цільової) точки T_{ij} . Максимальна відстань між початковою та кінцевою точками є значенням радіального радіусу r_n , яке задається користувачем. Всі вказані точки лінії видимості, при її перетині будь-якої поверхні, мають різні z -значення (які, у свою чергу, витягуються з ЦМР та дискретних моделей будівель) та відповідну просторову прив'язку зі значенням координати Z_{ij} [20]. Виходячи з зазначеного, лінія видимості – це скоріше набір дискретних сегментів і поліліній, що перериваються точками перешкод, між початковою точкою O_i і цільовою точкою T_{ij} (рис.3.48).

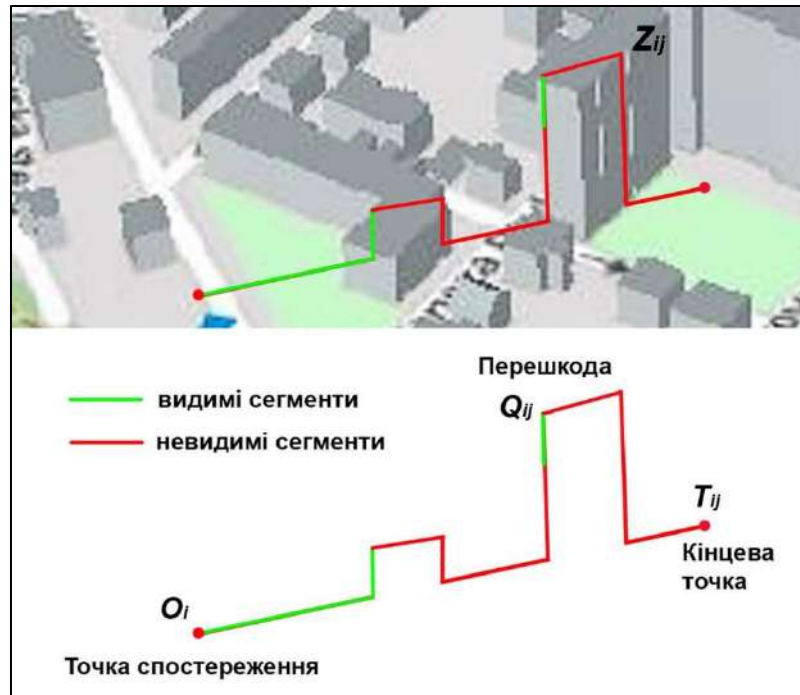


Рис.3.48. Компоненти лінії видимості [20].

Трансформація лінії видимості у масив ПСВ здійснюється шляхом формування тривимірних сегментів простору з видимих сегментів двовимірної лінії видимості з розрахунком відповідних тривимірних характеристик міського простору. Як і у випадку з обчисленням 3D-ізовісту, лінія видимості, при побудові півсфери, утворює ітеративну лінію видимості (ІЛВ). Початковою точкою такої лінії є точка спостереження, а кінцевою – цільові точки. Аналіз видимості визначає відсутність видимості, якщо ця лінія переривається елементом рельєфу або штучним об'єктом (таким чином диференціюються видимі та невидимі сегменти лінії). Ітеративно розподілені цільові точки (через певний інтервал) забезпечують широкий огляд видимих зон і локацій.

Ітеративна лінія видимості перетворюється на сегмент тривимірної ПСВ S_{ij} шляхом об'єднання сукупності поперечних фрагментів, складених по вертикалі оптичних фізичних променів, які є аналогом ЕОП в міському середовищі [61, 95]. Цей процес проходить у 3 послідовні етапи аналізу видимості, які представлені на рис.3.49.

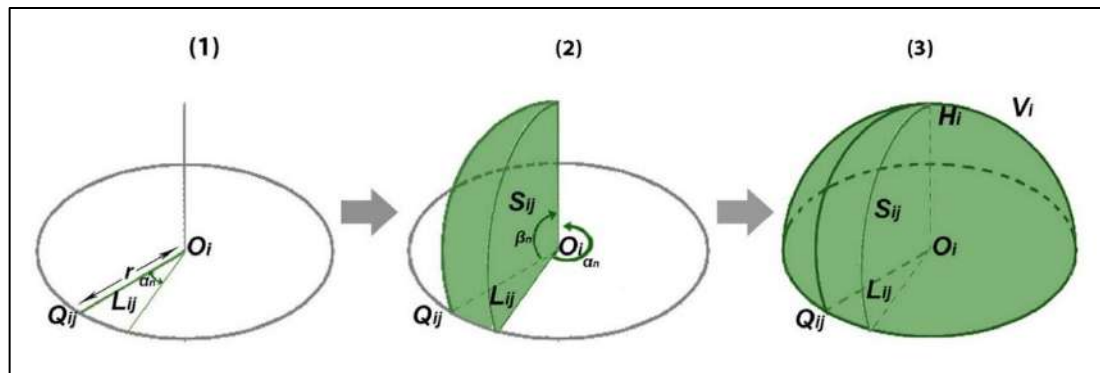


Рис.3.49. Перетворення 2D-лінії видимості L_{ij} (1) у 3D-сегмент півсфери видимості S_{ij} (2) та у закінчену півсферу (3) через введення кутових поворотів α_n (горизонтального) і β_n (вертикального) [20].

Відповідно до базових принципів сферичного підходу [95, 168, 216], 2D-сегмент лінії видимості L_{ij} витягується до найбільш далекої, видимої в горизонтальному напрямку точки перешкоди Q_{ij} , яка формує кутовий поворот вже в перпендикулярній площині, і таким чином, формується вже 3D-сегмент, де H_i – висота сегменту півсфери, що стягує дугу сектора видимості на вісь обертання півсфери (рис. 3.49).

За допомогою утвореної ПСВ тепер доцільно розрахувати видимий об'єм міського простору з заданої точки спостерігача. Як показано на рис.3.49, азимутальний кут повороту α_n визначає певну кругову відстань між точками перешкоди Q_{ij} і $Q_{i(j+1)}$ на периферії ПСВ для кожного 3D-сегменту S_{ij} . При зазначеній круговій відстані, висоті перевищення z_{ij} і радіусі ПСВ r_{ij} , об'єм 3D-сегменту S_{ij} може бути розрахований через введення кутових поворотів α_n і β_n , які знаходяться у взаємно перпендикулярних площинах та формують певний сегмент видимості у тривимірному просторі [20]. Таким чином, об'єм всієї ПСВ V_{HS} може бути розрахований на підставі значення кругової відстані (Q_{ij} $Q_{i(n)}$) і відповідних значень усіх інших параметрів, зазначених вище для повної ПСВ.

На підставі побудованої ПСВ, окремий сегмент видимості в урбанізованому середовищі можна визначити як візуальний об'єм ЕОП-видимості V_{ij} [95]. Такий сегмент може бути обчислений, як об'єм кульового сектору – геометричного тіла, утвореного обертанням колового сектору

навколо одного з радіусів ПСВ, що обмежує даний кульовий сектор. Формула обчислення вказаного об'єму наступна:

$$V_{ij} = \text{об'єм}(S_{ij}) = \frac{2\pi r^2 H^i}{3} \quad (3.8)$$

де усі символи вже були розписані вище.

У випадку, якщо значення Z_{ij} і H_i співпадають, формула може бути видозмінена наступним чином:

$$V_{ij} = \text{об'єм}(S_{ij}) = (\alpha_n r_{ij}^3 \tan \beta_{ij})/3 \quad (3.9)$$

Таким чином, підсумування об'ємів видимих сегментів V_{ij} по повному азимутальному колу складатиме об'єм всієї півсфери V_{HS} , тобто об'єм видимого простору з даної точки спостереження. Дана величина буде сумою усіх об'ємів 3D сегментів V_{ij} , що виходять з точки спостереження O_i в напрямку всіх можливих напрямів видимості j , що може бути формалізовано як:

$$V_{HS} = \sum_{j=0}^{2\pi} V_{ij} \quad (3.10)$$

Описаний розрахунок повного візуального об'єму ЕОП-видимості є ключовою процедурою аналізу видимості в урбаністичному середовищі, яка забезпечує формалізоване уявлення щодо критеріїв видимості у змодельованих УГСит [95]. Із результатів подібних розрахунків ми можемо вилучити ряд параметрів видимості у міському просторі, які можна визначити як візуальні параметри тривимірного урбаністичного середовища. Ці параметри, розраховані для окремих УГСит, можуть характеризувати різні УГС-властивості досліджуваного міста [19].

За допомогою побудови ПСВ та обчислення необхідних об'ємометричних характеристик можна відокремити видимий об'єм від невидимого об'єму міського простору в межах півсфери та охарактеризувати дискретні фрагменти цього простору такими показниками (рис.3.50):

- V_A – видимий об'єм небосхилу з точки спостереження в межах ПСВ;

- V_B – видимий об’єм з точки спостереження до точки перешкоди на природному рельєфі або міському об’єкті;
- V_C – невидимий об’єм за перешкодою – точкою Q_{ij} , що знаходиться всередині ПСВ;
- V_D – невидимий об’єм перед перешкодою – точкою Q_{ij} , що також знаходиться всередині ПСВ;
- H_i – висота сегменту ПСВ, що має стягувати дугу сектора видимості на вісь обертання ПСВ.

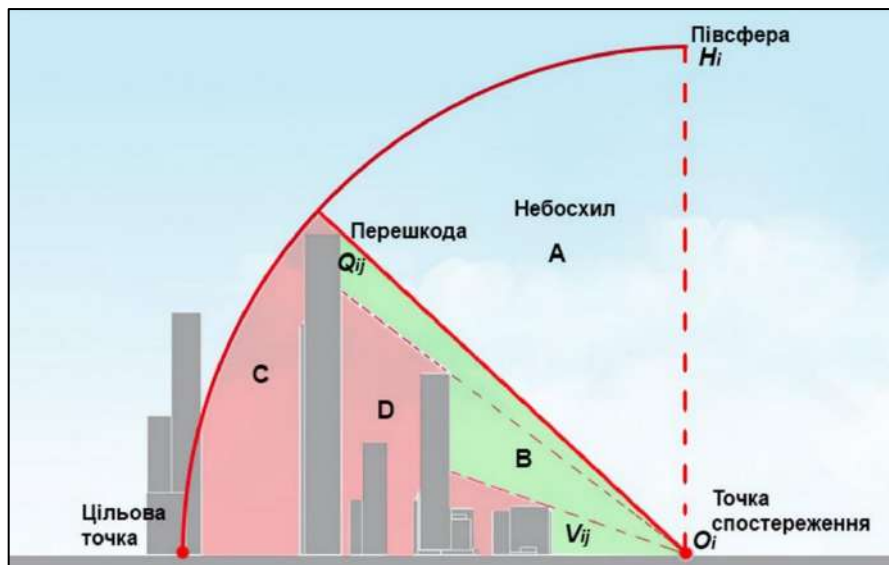


Рис.3.50. Візуальні параметри урбаністичного середовища (зона A – видимий об’єм небосхилу V_A ; зона B – видимий об’єм V_B ; зони C і D – невидимі об’єми V_C і V_D) [20].

На підставі розрахованих параметрів можна також розрахувати агрегований параметр видимості IV , як відсоткове співвідношення видимого простору в межах півсферичного огляду [20]. Тобто, це показник видимого об’єму, який розраховується шляхом розподілу показника повного візуального об’єму ЕОП-видимості V_i на повний об’єм самої ПСВ V_{FULLi} , з будь-яким значенням радіусу r_{ij} , яке довільно задається користувачем.

Об’єм усієї ПСВ тут може бути розрахований за аналогічною зазначеній раніше формулою:

$$V_{FULLij} = \frac{2\pi r_{ij}^3}{3} \quad (3.11)$$

Розрахунок агрегованого параметра видимості IV , у свою чергу, може бути представлений як видимий об'єм або повний візуальний об'єм по відношенню до об'єму ПСВ. Таким чином, формула його розрахунку матиме такий вигляд:

$$IV = \frac{V_B}{V_A + V_B + V_C + V_D} = \frac{V_i}{\text{Об'єм}(V_{FULLij})} \quad (3.12)$$

Кінцевий результат розрахунку IV залежатиме від заданого радіусу ПСВ і коригуватиметься за показником H_i залежно від особливостей його співвідношення з показником Z_{ij} . Так, якщо ці показники рівні й радіусом ПСВ визначено відстань, яку замикає півсфера за першою перешкодою, формуючи лише видимий об'єм V_B (тобто лише частину із можливих видимих об'ємів у ПСВ), а інші частини (V_C, V_D) дорівнюють нулю, то IV розраховується у його лише по частині видимого простору B :

$$IV_{min}^B = \frac{V_B}{V_A + V_B} = \frac{V_i}{\text{Об'єм}(V_{FULLmin})} \quad (3.13)$$

На базі описаних алгоритмів побудови ПСВ та обчислень параметрів видимості нами було розроблено веб-ГІС інструмент *Visibility Analysis (VA)*. Цей інструмент реалізований як додаткова модифікація до базових інструментів обробки лідарних даних – *Building Extraction* та *DEM generation* [32]. Побудована за допомогою цих інструментів тривимірна модель урбанізованого середовища є моделлю міського простору, в межах якої, за допомогою інструменту *VA*, може бути побудована ПСВ (рис.3.51). Розташування ПСВ та її радіус (за замовчуванням 300 м) вручну задаються користувачем.

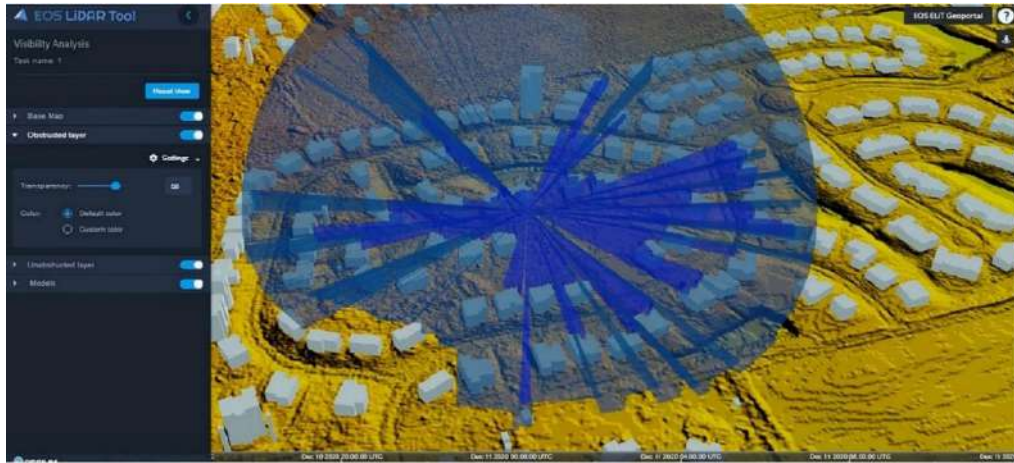


Рис.3.51. Візуалізація півсфери видимості, що побудована у міському середовищі за допомогою інструменту VA (побудовано автором за даними [203])

Отримана візуалізація являє собою УГСит, з якої можна виокремити певні УГС-властивості даного міського середовища, ґрунтуючись на параметрах видимості, які можуть бути зчитані з побудованої ПСВ [36]. Залежно від конкретного сценарію користувача і конкретних цілей аналізу видимості, ПСВ може дати досить точну і наочну інформацію про видимий/невидимий об'єм небосхилу та міського простору з встановленої точки спостереження. Більше того, у вікні візуалізації може бути одночасно збудовано безліч сфер з різних точок спостереження, з метою отримання найкращого показника за вказаними вище параметрами. Далі у цьому розділі будуть детально розглянуті приклади УГС-аналізу міського середовища з урахуванням результатів аналізу видимості, а також конкретні сценарії можливого застосування аналізу видимості для вирішення прикладних завдань.

3.4.3. Приклади реалізації користувацького сценарію аналізу видимості у міському середовищі.

Аналіз видимості, як і всі розглянуті раніше сценарії користувача, є ефективним прикладним аспектом УГС-аналізу міського середовища. Об'єм видимого простору, що розраховується і наочно візуалізується за допомогою ПСВ, може стати важливою УГС-властивістю як окремих УГСит, так і цілих

патернів міської забудови. Розрахована для обраної точки ПСВ дає низку корисних відомостей, за якими можна не лише оцінити видимість у конкретній місцевості, а й на основі цієї видимості охарактеризувати якість міського планування, комфорт пересування та проведення дозвілля у міській місцевості, ефективність використання міської території, ступінь затінення вулиць або об'єм безпосереднього потрапляння на них сонячних променів. Виокремлення та оцінка подібних якостей урбанізованого середовища за допомогою його тривимірного моделювання та застосування ПСВ-підходу, в даному випадку, і є частиною УГС-аналізу, який може мати два ключові призначення. У першому випадку через аналіз видимості ми можемо виявити певну проблему в міському плануванні, визначити ступінь її впливу на функціонування міста і розробити певне рішення цієї проблеми, яке дозволить або її усунути, або запобігти при плануванні нових міських районів. У другому випадку, візуальний аналіз зосереджується не на пошуку проблемних точок міста, а навпаки, на пошуку найкращих точок, які надаватимуть найкращу видимість, найкращу доступність і відкритість міського простору, що може бути застосовано, наприклад, для розміщення нових об'єктів, облаштування громадських просторів та організації міських заходів. Далі у цьому розділі будуть докладно описані конкретні сценарії інтерпретації та використання результатів аналізу видимості під час вирішення різних прикладних завдань.

Аналіз та оцінка міської забудови. Забудова і модернізація історично розвинених міст з багатою архітектурною спадщиною – одні з найскладніших завдань в сучасному містобудуванні. Сучасна забудова не тільки має відповідати існуючому плану міста, орієнтуватися на існуючу міську інфраструктуру, але й має враховувати цінності існуючих міських структур і культурну спадщину міста, щоб не порушити міський пейзаж [78]. Багатьом містам характерне нехтування подібними цінностями – історичні райони міста забудовуються високими будівлями в сучасному архітектурному стилі, який не поєднується з існуючою міською забудовою. Окрім того, нові багатоповерхові будівлі можуть надто перевантажувати об'єм видимого

простору, перегороджуючи значну частину міського пейзажу, а також негативно впливати на старі малоповерхові будинки, перешкоджаючи потраплянню на них сонячного світла (рис.3.52).



Рис.3.52. Приклад обструкції історичного міського пейзажу багатоповерховою будівлею у м. Харків [41].

Збереження та дбайливе ставлення до забудови районів з багатою архітектурою робить їх більш естетично привабливими, а також привабливими з точки зору туризму. Тому для таких районів має встановлюватися ряд обмежень на висоту забудови. Високі будівлі завдають істотний візуальний імпакт на міський пейзаж, на «стратегічний вигляд» міста [77]. На етапі планування такий імпакт можна оцінити за допомогою тривимірної моделі міста та інструменту VA.

ПСВ можна розрахувати в точці потенційного розташування нової будівлі, що дозволить оцінити її візуальний імпакт та виміряти її загальну видимість в залежності від її висоти (рис. 3.53). Також можна встановити 3D-модель потенційної будівлі і розрахувати сфери видимості у найбільш значимих точках міста, щоб оцінити рівень впливу нової будівлі на поточний міський пейзаж. На основі отриманих даних можна визначити допустимі ділянки міста для нової забудови, а також визначити межі висоти забудови. Такі принципи можуть стати частиною генеральних планів, що становлять місцеве законодавство.



Рис.3.53. Оцінка візуального імпакту будівлі за допомогою інструменту VA на прикладі передмістя м. Монреаль, Канада (побудовано автором за даними [131])

Однак, розміщення нової будівлі має виходити не тільки з взаємозв'язку з історичними районами міста, і не тільки з критерію висоти забудови. Щоб зберегти якість міського простору, нова будівля має також відповідати певній концепції дизайну існуючої забудови і стилістично поєднуватися з іншими об'єктами даної місцевості. Міський дизайн пов'язує фізичне розташування будівель і вулиць з функціональною організацією, яка, в свою чергу, відображає соціальну та економічну структуру, яка змушує забудовану середу функціонувати або дисфункціонувати [213].

Грунтуючись на 3D-моделях міста, міський дизайнер може чітко висловити концепцію дизайну, а побудова сфери видимості дозволить оцінити візуальний ефект даної концепції. На підставі даного підходу, користувач може змодельовати сприйняття міського середовища під час переміщення по вулиці, і на підставі отриманих даних редагувати певні елементи дизайну, прагнучи до оптимізації свого плану.

Таким чином, візуальне сприйняття міського простору є достатньо важливим чинником, на який має спиратися план забудови сучасного міста. Забудова має гармонійно вписуватися в існуючий пейзаж міста і відповідати культурі даного міста. Це також впливає на комфортність проживання жителів

міста, які щодня пересуваються по вулицях і візуально сприймають навколишнє середовище. При багаторазовому застосуванні аналізу видимості на різних міських конфігураціях можна вивести певний оптимальний об'єм видимості в забудованій місцевості (наприклад, між будинками та на дорожніх перехрестях), які повинні враховуватися при забудові нових районів.

Розподіл телекомунікаційних мереж в місті. Однією з актуальних проблем сучасних міст є підтримка якісного, безперебійного, мобільного зв'язку та інтернету у всіх районах міста. Використання VA дозволяє змоделювати і проаналізувати зони покриття мобільного зв'язку, виявити проблемні зони і зробити певні рішення щодо оптимізації їх розподілу.

Впровадження мобільних мереж 5G стикається з безліччю проблем, які перешкоджають задоволенню очікуваних вимог до пропускної здатності, швидкості передачі даних, зниження затримки, можливості охоплення більшої кількості пристроїв, зниження витрат енергії, тощо. Частково ці проблеми вирішуються від якості самого обладнання та інфраструктури мереж мобільного зв'язку (базових станцій, антен, точок доступу). Але також важливим фактором є грамотний розподіл цієї інфраструктури в міському просторі.

На високих частотах, на яких діє зв'язок 5G виникають проблеми з поширенням сигналу на великі відстані. При цьому сигнал істотно втрачає потужність при проходженні через тверді матеріали, з яких складаються будівлі [51]. Проблема вирішується поліпшенням якості і збільшенням кількості антен. Антени мають розміщуватися в добре спланованих місцях на прямій видимості, щоб найкращим чином використовувати їх властивості.

Візуальний аналіз може застосовуватися для пошуку оптимальних точок для установки базових станцій та антен з метою максимізації спектральної ефективності зв'язку. Розміщення подібної інфраструктури має відповідати ряду вимог, серед яких, з одного боку забезпечення безперешкодної роздачі зв'язку, з іншого ж боку – максимізація потенційних пристроїв (приймачів), які перебувають в прямій видимості антени – станції мають розташовуватися або

в густонаселених житлових районах, або в ділових районах. Все це безпосередньо впливає на затримку і швидкість передачі даних. У той же час, необхідно обійтися мінімальною кількістю станцій з метою економії витрат електроенергії. Таким чином, базові станції не мають бути занадто віддалені від забудованої території, але і не мають знаходитися в дуже щільно забудованих ділянках.

На рис. 3.54 можна побачити приклад побудови сфер видимості в різних ділянках міста. В даному випадку побудовано 8 сфер з радіусом 300 метрів. Відображення декількох сфер одночасно на карті допомагає візуально оцінити обстановку в місті і визначити найбільш забудовані ділянки міста. Антена має бути встановлена таким чином, щоб її видимий об'єм перетинався з видимим об'ємом інших антен, тобто щоб між ними безперешкодно проходила лінія видимості. За рахунок такого взаємного розташування забезпечується більш якісна ретрансляція зв'язку. Таким чином, візуальний аналіз може застосовуватися не тільки для визначення видимості з певної точки спостереження, а й для визначення поширення частот мобільного зв'язку.

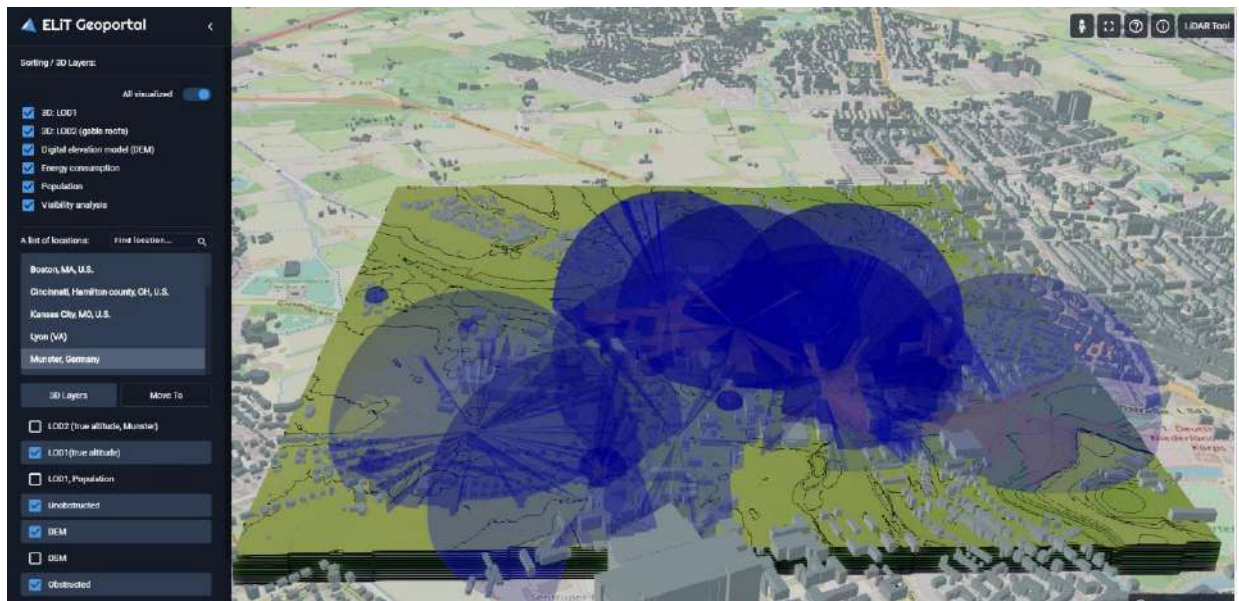


Рис.3.54. Пошук оптимальних місцеположень антен мобільного зв'язку з допомогою побудови сфер видимості інструментом VA (на прикладі забудови м. Мюнстер, Німеччина) (побудовано автором за даними [160]).

Розміщення рекламних банерів. Реклама є невід’ємним атрибутом сучасного міста, особливо в його центральних, комерційних зонах. Оптимальне розміщення рекламних банерів вимагає ретельного аналізу міського середовища, головною метою якого є пошук ділянки будівлі, яка охоплювала б максимальний об’єм видимого простору [98]. Аналіз видимості дозволяє вирішити це питання – за допомогою сфер видимості можна визначити точку, яка буде у полі видимості максимальної кількості населення, яке щодня пересувається в міському просторі [20].

У той же час зовнішня реклама, без належного регулювання, може порушувати візуальне сприйняття міського пейзажу з історичними, культурними або архітектурними особливостями. Відповідно, аналіз видимості може використовуватися місцевими органами планування для прийняття рішення щодо допустимості розміщення реклами в тій чи іншій ділянці міста, а також для врегулювання обмежень на висоту, розмір рекламних банерів, в залежності від типу забудови. Крім того, встановлення рекламних банерів може регулюватися з міркувань суспільної безпеки. Реклама не повинна перешкоджати тлумаченню офіційних дорожніх знаків, відволікати водіїв, і не повинна ставити під загрозу транспортні засоби або пішоходів при пересуванні містом. Подібні сценарії теж можуть бути врегульовані із застосуванням інструменту VA, який змоделює область видимості користувача, що переміщається по вулицях міста.

Пошук точки найкращого огляду. Даний запит може бути характерний для безлічі користувацьких сценаріїв. Можливість моделювання видимого об’єму з різних точок спостереження дозволяє виконувати швидкоплинний і ефективний аналіз місцевості і відразу приймати рішення щодо найкращого огляду.

У сучасних містах, одним з важливих факторів, що впливають на вартість нерухомості, є вид на місто, що відкривається з вікон будівлі. Гарний вид з вікна, що відкривається на міський або природний пейзаж зазвичай сприяє підвищенню цінності та вартості нерухомості для орендодавця. Це

відноситься як до офісних будівель, різних торгових центрах, готелів, так і до житлових будинків. Використання VA дозволить змоделювати і підібрати місце розташування з потенційно кращим видом з вікна. Таке застосування VA може бути актуальним як для орендодавців, так і потенційних орендарів в процесі пошуку нерухомості.

Також, як і в разі оцінки нерухомості, метою виконання аналізу видимості може бути пошук естетично привабливого виду на місто, або пошук відкритої місцевості для проведення різних міських заходів. Побудова сфер видимості в різних точках міста може допомогти скласти найкращі маршрути для екскурсій по мальовничих місцях.. Виходячи з цих запитів, функціональність VA може бути доречна в ГІС-системі, що надає комплексний інформаційний простір міста [29].

Моніторинг та розміщення камер спостереження. Для забезпечення безпеки в місті необхідний постійний моніторинг, який охопив би відритий простір міста, особливо в громадські місцях. Чим краще розташовані камери спостереження, і чим менше залишається території, яка не охоплюється камерами, тим більша ймовірність запобігання і розкриття потенційних злочинів в місті. Побудова декількох сфер видимості дозволить підібрати найкращі точки для взаємного розміщення пристроїв спостереження, а також мінімізувати кількість таких пристроїв при заданому охопленні. Загалом окрім розміщення камер спостереження, за схожим принципом VA може бути застосований для розміщення інших об'єктів міста, які мають на своїй меті охопити якнайбільший об'єм міського простору – серед таких об'єктів, наприклад, вуличні ліхтарі та всілякі датчики збору інформації щодо різних міських об'єктів та процесів

Таким чином, спектр застосування аналізу видимості охоплює різні області, починаючи з міських муніципальних досліджень, які мають на меті забезпечити ефективне функціонування міста, закінчуючи окремими випадками застосування приватними особами, для досягнення особистих цілей. При цьому, залежно від цілей і запиту користувача, аналіз видимості

може бути зосереджений не тільки на пошуку точки з максимальним видимим об'ємом, але і на її пошуку з оптимальним та мінімальним видимим об'ємом. Як і у випадку з попередніми користувальницькими сценаріями УГС-аналізу міського середовища за допомогою тривимірного моделювання, описаний тут аналіз видимості в черговий раз демонструє те, наскільки даний підхід полегшує міські дослідження та дозволяє отримувати з них безліч цінної та недоступної раніше інформації про існуючі міські проблеми.

3.5. Актуальність та рекомендації щодо впровадження урбогеосистемного аналізу до території м. Харків

Харків є високоурбанізованим та багатофункціональним містом, з широко розвиненою інфраструктурою та складною архітектурною морфологією будівель. За даними *OpenStreetMap*, він налічує більш ніж 80 тис. будівель різних розмірів і призначень, а проживає в ньому наразі не менше 1 млн. осіб [22, 161]. Через різні історичні, соціальні, економічні та політичні чинники місто на сьогодні налічує низку урбаністичних проблем, які з роками лише посилюються непередуманими рішеннями в міському плануванні.

Місто має досить складну історію, пов'язану зі своїм розвитком та розширенням території. Так, до приходу радянської влади, урбанізація у місті протікала послідовно, від центру до периферії. Починаючи з 20-х років минулого століття почалася активна індустріалізація міста, в ході якої було суттєво розширено адміністративні кордони міста до заміських прилеглих залізничних вузлів та заводських комплексів, а разом з ними до межі міста увійшли значні ділянки прилеглої одноповерхової сільської забудови. Далі, вже у другій половині 20 століття починається масова забудова багатоповерхових житлових районів, проте, через процеси, що відбулися на початку століття, ця забудова відбувається навколо існуючої сільської забудови, включеної раніше до міста [26]. Таким чином, на початок XXI століття місто має високу диференціацію форм і типів будівель, що

відносяться до різних історичних епох та різних архітектурних стилів, які тісно сусідять один з одним і утворюють різноманітні геоситуації. Усе це представляє досить цікавий кейс у контексті викладених у дисертації аспектів впровадження УГС-аналізу.

Крім того, у 2022 році місто охопила війна. Харків, виявившись фактично прифронтовим містом, регулярно піддається інтенсивним обстрілам, що призводять до масових руйнувань міської забудови. Так, на 2023 рік налічувалося більш ніж 14,5 тис. будівель, що зазнали повних чи часткових руйнувань [3]. Війна назавжди змінила урбаністичний портрет міста та принесла безліч нових проблем у існуючу міську забудову, яка й без цього була досить проблемною. При цьому, обстріли відбуваються донині й продовжуватимуться в майбутньому протягом невизначеного часу, і невідомо, які нові виклики постануть перед нашим суспільством. Враховуючи це, актуальність застосування всіх викладених у цій дисертації напрацювань для харківського сценарію є беззаперечною.

Виходячи зі змісту 3 розділу дисертації, можна виокремити 6 основних аспектів упровадження УГС-підходу: виокремлення патернів УГСит (зокрема за типами ЗК), аналіз просторового розподілу щільності забудови, відстеження змін у забудові, оцінка чисельності населення за геометрією будівель, оцінка міського ЕнСп за геометрією будівель та аналіз видимості в міському середовищі. Далі, розглянемо кожен із наведених аспектів стосовно дослідження Харкова.

Виокремлення патернів УГСит. За рахунок досить складної історії з розширенням та забудовою Харкова в ХХ столітті, на сьогодні він має досить високу диференціацію низькорангових патернів забудови, а також хаотичний розкид різних патернів по всій території міста. Належна детальна стандартизація типів забудови та типів ЗК є дійсно важливим кроком в урбаністичному дослідженні Харкова, який дозволить систематизувати в ГІС-середовищі усі міські будівлі, і надалі проводити набагато якісніші та результативніші ГІС-дослідження. Так, ґрунтуючись на типі конкретного

будинку, за його приналежністю до того чи іншого патерну забудови, можна буде наділяти його певною характеристикою, а потім поширювати її на всі будівлі такого ж типу [36]. Наприклад, ми можемо висувати деякі міркування щодо комфорту проживання в тому чи іншому будинку або районі, а також вимірювати та призначати для них додаткові властивості та характеристики, такі як: енергоефективність будівлі, очікувана кількість мешканців, наявність вільних просторів тощо.

Однак, для ефективного виокремлення патернів та їх точного розмежування потрібні точні дані про геометричні параметри будівель та їх архітектурні особливості, які, в обсязі, що покриває все місто, можуть бути отримані тільки через лідарну зйомку. Подальша обробка лідарних даних із виокремленням моделей будівель може бути виконана за наведеними у другому розділі методиками.

Маючи набір моделей будівель з усього міста та можливість їхньої просторової візуалізації у середовищі «Цифрове місто» ми можемо виконати наступні дії. У загальній атрибутивній таблиці можна звести виокремлену геометричну інформацію про кожну міську будівлю, а потім значення, що повторюються у великій кількості, об'єднати в певні групи, які й характеризуватимуть попередні патерни забудови. Далі, через аналіз тривимірної візуалізації результатів моделювання лідарних даних, ми можемо вже остаточно уточнити виділені патерни, ґрунтуючись на архітектурній морфології будівель, їх конфігураціях, просторовому розподілі тощо.

Ґрунтуючись на тих даних про забудову Харкова, які є у відкритому доступі наразі (дані з *Google Eearth/OpenStreetMap/Mapbox*), ми можемо лише обмежено виділити патерни УГСит за різними узагальненими властивостями та візуальними параметрами забудови. Якщо розглядати типи ЗК загалом, то з явних високорангових патернів виокремлюється лише два основні типи: індустріальний і житловий, які можуть бути описані тими самими характеристиками, якими описувалися нами відповідні типи в місті Нью-Йорк. Комерційний та інституційний тип, які нами також розглядалися, у Харкові не

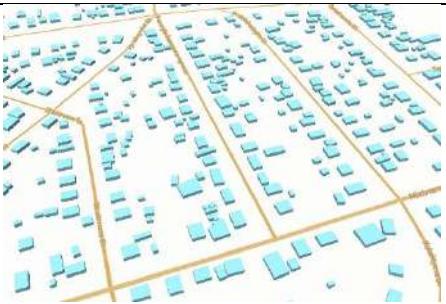
мають певних чітких обрисів, оскільки зосереджені вони переважно упереміш з іншими типами забудови. З більш-менш окреслених ділянок інституційного типу можна назвати забудову в районі площі Свободи. Комерційний же тип, або поєднується з житловими будівлями в центрі міста, або ж займає різні великі будівлі, які раніше були відведені під виробничі приміщення. Як окремий підтип комерційного патерну можна також виокремити забудову різних міських ринків (Барабашово, Кінний ринок, Благовіщенський ринок тощо) – їм характерна висока щільність, сувора впорядкованість і малоповерховість.

Щодо конкретно житлового типу забудови, то тут, залежно від кількості розглянутих параметрів забудови, можна виокремлювати величезну кількість чітко розмежованих низькорангових патернів. Якщо брати до уваги найпоширеніші будівлі, то насамперед виділяються патерни, які мають чітку прив'язку до періоду міської забудови. Так, ми можемо виділити 5 основних низькорангових патернів житлової забудови Харкова (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Патерни УГСит житлового типу ЗК у м. Харків. Візуалізація у середовищі *Mapbox Studio*.

Тип забудови	Характеристика та загальні властивості	Візуалізація у MapBox
Центральна забудова	характерна висока щільність історичних будівель, вузькі вулиці, маленькі двори та висока диференціація форм будівель	
Салтівська забудова	характерні менш щільні житлові масиви, з великими внутрішніми дворами; охоплюють великі за площею території, забудовані переважно секційними будинками на 9-12 поверхів, розбиваються на велику кількість низькорангових патернів забудови, що відрізняються, передусім, характером	

	впорядкованості та конфігурацією будівель.	
"Хрущовська" забудова	характерні переважно п'ятиповерхові уніфіковані будівлі з примітивною архітектурою; будівлі та двори мають достатньо чітку впорядкованість. Щільність нижча, ніж у центрального типу, але явно вища, ніж у салтівського	
Приватний сектор	до цієї категорії заноситься майже уся одноповерхова забудова, яка колись належала до приміських сіл, проте згодом була поглинута містом; має характерне для сільської місцевості планування доріг; містить безліч старих будівель сільського типу, що включають також дерев'яні будівлі та мазанки.	
«Новобудови»	високоповерхові житлові комплекси, що сягають 27 поверхів, збудовані вже за часів незалежності України, мають різні форми та конфігурацій, характерною особливістю таких зон є низький рівень озеленення та великі паркувальні зони	

За рахунок прив'язки до періоду забудови, унікальні властивості кожного з виділених патернів обумовлюються тими запитами, можливостями та орієнтирами суспільства, які були актуальні в момент їхнього планування та побудови. Наприклад, за часів хрущовської та салтівської забудови проблема надмірної автомобілізації суспільства була ще настільки актуальною, тому навколо будинків виділялося порівняно мало паркувальних місць. У ХХІ столітті така непередбачливість стала для міста істотною проблемою, тому сучасні житлові комплекси стали вже більш орієнтовані на забезпечення паркувальних місць, що, у свою чергу, позначилося на зниженні озеленення території [152]. Приватний сектор взагалі був сільською місцевістю і не передбачався під функціонування в тому міському ритмі, в

якому він згодом опинився, тому тут досить вузькі, неасфальтовані дороги і незручне для міського транспорту планування.

Ще варто відзначити особливість, яка полягає в тому, що раніше житлові комплекси забудовувалися переважно на околицях з наявністю великої кількості простору для оптимального розміщення будівель. Навколо таких районів потім облаштовувалась транспортна інфраструктура, яка пов'язувала їх із загальноміською транспортною системою [26]. Сучасні новобудови часто орієнтуються на вже існуючу інфраструктуру і забудовуються на обмежених ділянках усередині міста, не маючи достатньо простору для оптимального розміщення будівель, що породжує масу урбаністичних проблем і конфліктів.

Аналіз просторового розподілу щільності забудови. На додаток до тривимірної візуалізації патернів УГСит, нами також будувалися двовимірні карти, що відображають особливості їхнього розподілу територією міста, залежно від різних кількісних параметрів. Такі карти дають змогу краще зрозуміти специфіку урбанізаційних процесів і виявити проблемні ділянки в місті через візуалізацію просторового розподілу щільності, кількості, площі та висоти міської забудови за умовно згенерованими УГСит. Стосовно Харкова, ми можемо побудувати аналогічні карти, але без урахування висоти забудови, яка могла б дати чимало інформації про ефективність використання міської території (рис. 3.55).

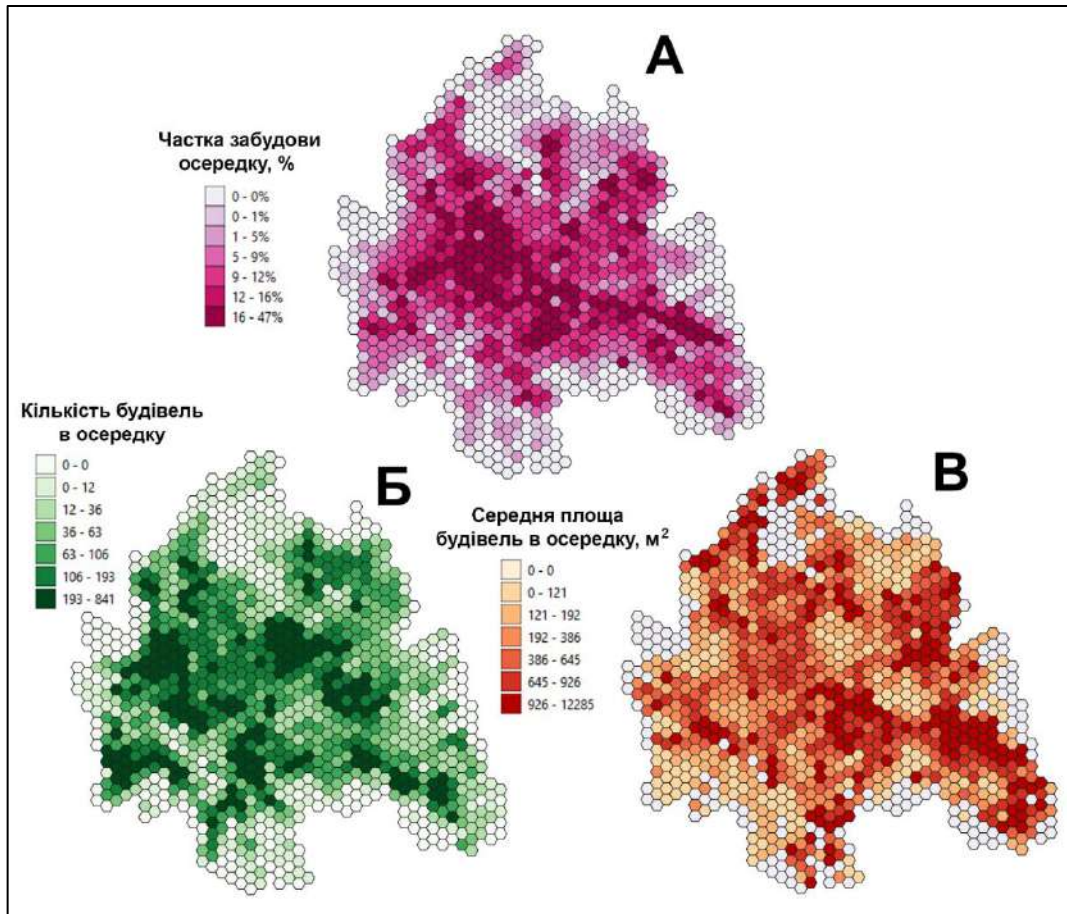


Рис. 3.55. Візуалізація розподілу щільності забудови (А), кількості будівель (Б), та середньої площі будівель (В) за осередками площею 0.4 км² у м. Харків (побудовано автором за даними [161])

Побудовані карти, крім того, що в наочній формі показують розподіл щільності забудови по території міста, демонструють також особливості розподілу різних типів забудови. Через зіставлення карт кількості будівель і середньої площі будівель, чітко виокремлюються райони приватного сектору, з характерними для них осередками великої кількості будівель з маленькою середньою площею. Аналогічним же чином виокремлюються й індустріальні зони, для яких характерна велика середня площа і мала кількість будівель. Таким чином, якщо ми спостерігаємо певну зосередженість осередків, що належать до спільного класу за якимось із параметрів, то забудову за цими осередками можна відносити до спільного патерну УГСит. Так, ґрунтуючись лише на цих картах, ми можемо явно простежити центральну забудову, з її найвищою щільністю, приватний сектор, з його найвищою кількістю будівель,

та індустріальний, з його найвищою середньою площею будівель. Візуалізація розподілу висоти забудови також дала б змогу явно виокремити забудову салтівського типу за її найвищою середньою висотою будівель. На наявних же картах, ця забудова не має характерних прикмет, за якими вона б виділялася в окремий патерн.

Загалом побудовані карти ще раз демонструють вкрай високу диференціацію харківської забудови, яка пов'язана з досить специфічною історією його урбанізації, про що вже згадувалося на початку цього підрозділу. В якості основних урбаністичних проблем, за цими картами можна виокремити: різке просідання щільності забудованої території, через забудову приватного сектору, прилеглого до центру міста; тісне розміщення промислових зон із житловими; нерівномірний розподіл середньої площі будівель, що, імовірно, був би ще більш нерівномірним, якби до уваги бралася середня висота будівель. З усього вищевказаного випливає те, що для міста вкрай важко розробити такий план оптимізації, який був би однаково задовільний для всіх наявних типів забудови. Проте їхня детальна класифікація за різноранговими патернами забудови, та наділення чітких характеристик для кожного патерну могли б суттєво полегшити це завдання.

Відстеження змін. Цей користувацький сценарій, ймовірно, є найбільш актуальним для поточної ситуації в Харкові, який продовжує регулярно зазнавати ракетних ударів, що призводять до руйнувань усіх типів міської забудови, незалежно від її призначення. Нерідко від таких ударів страждають об'єкти, що становлять культурну спадщину, подальше відновлення яких є вельми трудомістким і копітким процесом. Точне і своєчасне фіксування обсягу таких руйнувань та їхня подальша систематизація в цифровому середовищі є однозначно корисним сервісом, що здатний істотно полегшити вивчення й оцінку пошкоджень, а також планування реставрації. Переваги застосування лідарної зйомки та інструментів обробки її вихідних даних для цих цілей є цілком очевидними.

У підрозділі 3.1. інструмент відстеження змін нами розглядався насамперед в рамках відстеження динаміки та інтенсивності міської забудови. Однак, аналогічним же чином він може бути застосований для відстеження та оцінки пошкоджень. Для цього над Харковом має бути проведена повітряна лідарна зйомка й отримані відповідні дані, що покривають або все місто, або найцінніші його райони. Ці дані мають бути розбиті на окремі *LAS*-файли для їх зручнішого зберігання та обробки. Потім, після виникнення руйнувань, лідарна зйомка виконується повторно, але вже точково, тільки для тих ділянок міста, які постраждали від обстрілів. Із двох наборів лідарних даних – зібраних до і після руйнувань, за допомогою спеціальних ГІС-інструментів виокремлюються моделі будівель, накладаються одна на одну, і з цього накладення потім віднімається різниця, яка й характеризуватиме обсяг руйнувань [37]. Чітка алгоритмічна послідовність цих процедур нами детально описувалася в підрозділі 2.3.

Результат може бути експортований у вигляді зведеної таблиці, що описує характер змін, їхні геометричні параметри і точні координати – всі ці дані є атрибутами, які потім вже можуть бути зіставлені з іншими характеристиками будівель для проведення детального аналізу та оцінки пошкоджень. Наприклад, зіставивши дані про об'єм пошкодження з даними про будівельні матеріали будівлі, або кількість квартир, ми можемо отримати вже детальнішу оцінку щодо рівня завданих збитків, яка може дедалі більше уточнюватися, якщо брати до уваги дедалі більшу кількість атрибутів будівлі. До того ж, модель будівлі, отримана до її пошкодження, може послужити гарним орієнтиром під час подальшої реставрації будівлі. Наприклад, витягнуту модель будівлі можна додатково опрацювати в *BIM*-додатку (*Building Information Modeling*, *BIM* – англ.), а потім, після отримання інформації про руйнування, її можна буде одразу занести в *BIM*-проєкт і ефективно спланувати процес реставрації будівлі.

Варто зазначити, що окремі комерційні проведення лідарної зйомки в Харкові виконуються, але це лише часткові випадки, які виконуються за

конкретними замовленнями. Нами ж акцентується на необхідності реалізації регулярної процедури проведення лідарної зйомки, з подальшим занесенням її результатів до єдиної бази даних, і подальшим застосуванням інструментів обробки лідарних даних з метою відстеження та систематизації змін. Як приклад застосунку, в якому може зберігатися вся інформація щодо витягнутих у такий спосіб змін, є проєкт «Цифрове місто», який нами був детально охарактеризований у другому розділі дисертації [120].

Оцінка чисельності населення за геометрією будівель. Виконання оцінки чисельності населення в Харкові могло б стати серйозним внеском у суспільно-географічні дослідження міста, особливо з урахуванням низької періодичності проведення перепису населення. Наявність таких даних не тільки істотно посилює б низку прикладних міських досліджень за допомогою ГІС, а й дала б змогу точніше оцінювати шкоду, завдану міському населенню внаслідок воєнних дій, і регулювати таким чином гуманітарну допомогу [33]. Отримання інформації про детальний просторовий розподіл міського населення дозволяє виявити масу урбаністичних проблем і виявити найбільш перенаселені ділянки міста, які потребують певної оптимізації. Так, можна зіставити дані про кількість населення за тим чи іншим житловим масивом міста з даними про послуги, що надаються в найближчих околицях цього житлового масиву, і з'ясувати, чи достатньою мірою він обслуговується.

Проблема поточної інформації про розподіл населення в Харкові, окрім того, що вона є досить застарілою, полягає в тому, що загальна кількість міського населення розбита лише по 9 районах, що дуже слабо характеризує просторовий градієнт розподілу житлового фонду. Це значно знижує ефективність застосування безлічі ГІС-інструментів у міських дослідженнях. У тому ж о. Арлінгтон, який ми розглядали в підрозділі 3.2, інформацію про кількість населення було розбито на 71 переписну ділянку, при тому що площа округу більш ніж у 5 менша, ніж у Харкові. І навіть у тому випадку нами зазначалося, що такої інформації недостатньо для докладного УГС-аналізу. Якщо ж розглядати Харків, то один лише Немишлянський район включає

приватний сектор селища Новозахідний, приватний сектор Немишлі, п'ятиповерхову та дев'ятиповерхову забудову Нових Будинків, новобудови ЖК «Пролісок», 624-627 мікрорайони Салтівки, тощо. І кількість населення в усіх цих районах характеризується лише однією цифрою для всього Немишлянського району. У результаті, набагато кориснішими даними для будь-якого більш-менш детального ГІС-аналізу, були дані про кількість поверхів або квартир у будинках, що завантажуються з *OpenStreetMap*, хоча ці дані можуть дуже слабо корелювати з реальною кількістю населення [120].

Інформація про об'єм житлових будівель, що виокремлюється з лідарних даних, навіть у сукупності з тими обмеженими даними про населення по районах Харкова, які є в даний момент, може бути корисною для отримання попередньої оцінки населення за допомогою об'ємо-метричного методу. Отримавши очікувану кількість мешканців на кожен житловий будинок, ми далі можемо провести низку точкових перевірок відповідності отриманої оцінки реальному показнику у певній репрезентативній вибірці будинків, що належать до різних патернів забудови. Потім, оцінку можна певним чином відкоригувати, залежно від виявленого відхилення, та застосувати це коригування до всіх будівель відповідного патерну. Будівлі, які постраждали від обстрілів, також можуть бути окремо відмічені та відкориговані, залежно від ступеня пошкодження. У результаті оцінка все одно буде досить неточною, насамперед через неактуальність даних про кількість міського населення, що приймаються до розрахунку, проте, вона, як мінімум, відобразить потенціал для заселення наявних житлових районів, що матиме важливе значення при повоєнному відновленні міста і залученні до нього нового населення. Крім того, така оцінка допоможе визначити патерни житлової забудови за просторовим сусідством та однаковою оцінкою населення відповідних будівель. Ці патерни в майбутньому можуть бути розглянуті як окремі переписні ділянки, які можуть бути сформовані для проведення повноцінного перепису населення.

За наявними даними нами виконано аналогічну оцінку населення лише на основі ПМ-підходу. Інформацію про площу будівлі було отримано з шару футпринтів будівель, завантаженого з *OpenStreetMap*, а узагальнену інформацію про кількість населення за районами Харкова було отримано з головного управління статистики харківської області. За викладеною в підрозділі 3.2.2 методикою, районну кількість населення було пропорційно розподілено за житловими будинками міста залежно від їхньої площі. У результаті в *QGIS* було побудовано карту розподілу населення за центроїдами житлових будинків, візуалізованими методом градуйованих знаків. Обчислене населення потім було підсумовано за осередками площею 0.4 км^2 , які застосовувалися нами раніше для візуалізації розподілу патернів УГСит (рис. 3.56).

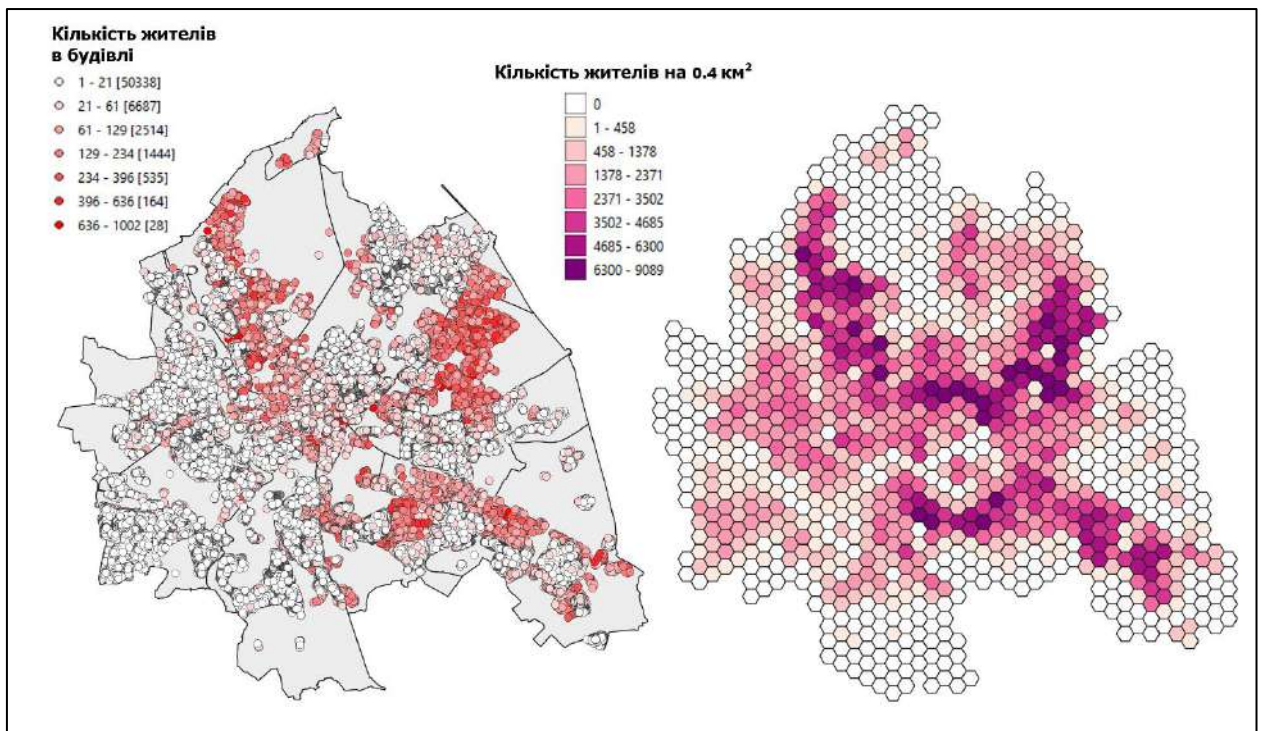


Рис. 3.56. Візуалізація розподілу розрахованої кількості жителів за центроїдами будівель, та кількості жителів за осередками площею 0.4 км^2 у м. Харків (побудовано автором за даними [5]).

Через те, що в розрахунках враховувалась тільки площа будівель, при детальному вивченні карти виявляється безліч грубих похибок. Наприклад, п'ятиповерхові будівлі можуть мати більшу кількість мешканців, ніж 12-

поверхові лише через те, що мають трохи більшу площу футпринта. Для аналізу загального тренду розподілу міського населення може бути достатньо й такої оцінки. Так, ми можемо виявити цілком очікувану концентрацію населення в основних спальних районах міста, таких як Салтівка, Нові Доми, Олексіївка, ХТЗ, тощо. При цьому видно, як знижується населення в районах із приватним сектором. Однак, для локалізованого УГС-аналізу та для ухвалення важливих рішень щодо оптимізації того чи іншого району, такий результат є вкрай поверхневим. Залучення лідарних даних показало б важливу значущість саме висотності забудови в міському плануванні, а також показало б, на скільки оптимально таку забудову розміщено та на скільки вона забезпечена необхідною інфраструктурою й послугами з урахуванням тієї кількості населення, яку вона вміщує.

Оцінка міського EnSp за геометрією будівель. Так само, як інформація про тип будівель та очікувану кількість мешканців у них, інформація про очікувану енергоефективність будівель є достатньо корисним атрибутом, який однозначно розширить спектр прикладних міських досліджень із застосуванням ГІС. Особливо актуальною для Харкова ця інформація є в умовах дефіциту електроенергії, який був спричинений масованими російськими ударами по українській енергосистемі. Так, через масштабні пошкодження енергетичної інфраструктури, протягом зими 2022-2023 рр., у багатьох областях України запроваджувались графіки аварійних відключень світла [7]. В особливо критичні моменти деякі райони по кілька днів залишалися без електрики та обігріву будівель, що в умовах холодної зими могло фатально позначитися на життєдіяльності населення. При цьому, виялові відключення світла не були повністю збалансованими, через пріоритетність заживлення енергією насамперед об'єктів критичної інфраструктури. Як альтернативні джерела електроенергії, люди використовували електрогенератори. Для полегшення ситуації владою також було запроваджено проєкт "Пункти незламності", що передбачав розміщення

в місті точок із безперервним постачанням електроенергії, де міські жителі могли тимчасово скористатися необхідним сервісом [25].

З огляду на вищезазначене, з'являється очевидний запит на інформацію про просторовий розподіл ЕнСп будівель. Така інформація, по-перше, могла б допомогти оптимізувати віялові відключення електрики, зробивши їх більш збалансованими, там, де це можливо, а по-друге, оптимізувати розподіл пунктів незламності з метою максимізації охоплення міських районів, що мають найбільший запит на обігрів та електроенергію.

Як показало наше дослідження в підрозділі 3.3, рівень ЕнСп будівель може залежати від безлічі чинників, серед яких найважливішими зазначалися тип і вік будівель. Харкову за цими характеристиками властива досить висока диференціація забудов та їх непослідовний розподіл територією міста, що вже неодноразово зазначалося в цьому підрозділі. Така ситуація могла б цікаво відобразитися на карті міського ЕнСп, яку ми раніше будували для нідерландських міст. По-перше, у воєнний час, ця мапа могла б посприяти певному переосмисленню розподілу електропостачання в період аварійних відключень, а також розміщення пунктів незламності, з оглядом на те, які райони є найбільш проблемними, з точки зору енергоефективності будівель. По-друге, навіть у мирний час, ця карта дала б змогу виокремити найпроблемніші ділянки забудови, які потребують модернізації будівельних конструкцій і систем опалення та вентиляції, що буде особливо актуально в період повоєнного відновлення міста. При цьому, в поєднанні з інформацією про розподіл міського населення, аналіз міського ЕнСп став би ще більш інформативним.

За наявності лідарних даних, а також даних про вік і поверховість будівель, просторову оцінку ЕнСп для Харкова можна виконати за тією самою методикою, яку ми описували в підрозділі 3.3.1. Єдиною значущою зміною в застосуванні цієї методики до Харкова, є необхідність отримання даних із реальних показників лічильників саме за будівлями Харкова або подібних до нього міст, та побудови на їхній основі нової семантичної таблиці. Для цього

спершу можна виокремити основні типи будівель у Харкові, ґрунтуючись на тих самих властивостях забудов, за якими ми раніше виокремлювали патерни житлової забудови. Після чого за кожним із типів можна зібрати деяку кількість реальних вимірювань середньорічного ЕнСп, а потім сформувати на їхній основі нову семантичну таблицю з усередненими значеннями ЕнСп залежно від типу і віку будівлі. Застосовуючи цю таблицю, потім можна буде вже на основі обчисленої корисної площі будівель виконати оцінку ЕнСп для кожної будівлі та візуалізувати результат у 3D-сцені. Подальший аналіз результатів міститиме як виявлення загального тренду розподілу міського ЕнСп, так і виявлення окремих локалізованих закономірностей, подібно до того, як це робилося в підрозділі 3.3.2.

Аналіз видимості в міському середовищі. Як уже неодноразово зазначалося, з огляду на історичні особливості урбанізації Харкова, йому характерна непослідовна забудова території, що призводить до безлічі локальних урбаністичних конфліктів. Так, на обмежених ділянках території часто розміщуються різні типи забудови, гармонійне співіснування яких неможливе через суттєві відмінності в розмірах будівель і кількості населення, яке в них проживає. Поширеною проблемою для Харкова є тісне розміщення одноповерхової забудови з високоповерховою, що, з одного боку, призводить до затінення та обмеження об'єму видимого простору одноповерхової забудови, а з іншого – ускладнює обслуговування високоповерхових будівель через обмежувальне планування приватного сектору. Ще однією поширеною проблемою, особливо актуальною для останніх десятиліть, є нерегульоване будівництво нових багатоповерхівок у центрі міста, що порушують міський пейзаж і конфліктують з наявною історичною забудовою [158]. Як приклади, ми виділили чотири найхарактерніші конфлікти такого роду (рис. 3.57)



Рис. 3.57. Приклади проблемних будівель у м. Харкові, що конфліктують з навколишнім міським простором (побудовано автором за [41]).

Кожен із наведених прикладів негативно впливає на навколишній міський простір. ЖК "Інфініті" загороджує панорамний вид на місто з височини саду Шевченка – однієї з головних культурно-рекреаційних зон Харкова. ЖК "Острів" несе комплекс проблем – по-перше, загороджує панорамний вид на місто, а по-друге, конфліктує з історичною забудовою на вулиці Римарська, контрастуючи з історичною будівлею міської філармонії. ЖК "Люксембург" порушує краєвид головної алеї центрального парку культури та відпочинку, зміщуючи акцент із домінанти цього парку – колеса огляду, а також загороджує вид на місто з висоти самого колеса огляду. ТРЦ "Нікольський" затінює навколишню історичну забудову та суттєво перевантажує трафік на прилеглих вузьких центральних вулицях. Усі ці приклади безумовно виконують важливу житлову та торговельно-розважальну функцію для міста, проте їхнє розміщення повинно доречно вписуватися в міський простір, щоб уникнути всіх наведених конфліктів. Крім

того, для злагодженого функціонування, такі об'єкти мають бути забезпечені розвиненою дорожньою інфраструктурою та достатнім простором для паркувальних місць, що не здатне забезпечити вже наявне щільне планування історичного центру. В ідеальному випадку, такі об'єкти мають формувати нові кластери сучасної забудови, із сучасною інфраструктурою, на віддалених від центру територіях.

Аналіз видимості є тим інструментом, який може допомогти у врегулюванні зазначених міських конфліктів. ПСВ, що є результатом виконання цього інструменту, може не тільки показати об'єм видимого простору із заданої точки, але вона також може відобразити візуальний імпаکت тієї чи іншої будівлі на навколишній простір [20]. За допомогою ПСВ, побудованої в тривимірній моделі міста, ми можемо окреслити певні буферні зони навколо значущих міських об'єктів, де високоповерхова забудова небажана. При цьому, доречність розміщення нової високоповерхової будівлі може також визначатися за допомогою аналізу видимості, наприклад, через введення порогового значення візуального імпакту. Багаторазове моделювання ПСВ в історичному центрі міста може загалом дати підстави для виділення зон, у яких забудова певної поверховості буде заборонена на законодавчому рівні.

Нами розглянуто лише один, найбільш актуальний для Харкова спосіб застосування аналізу видимості, хоча спектр його прикладного застосування може бути набагато ширшим, що було підтверджено нами в підрозділі 3.4.3.

Як і у випадку з усіма раніше розглянутими аспектами, ключовою умовою для впровадження запропонованого підходу є наявність лідарних даних. Причому, в даному випадку, вони необхідні не тільки для моделювання будівель, а й для моделювання рельєфу міста, який також впливає на видимий об'єм міського простору.

Таким чином, місто Харків дійсно могло б бути доцільним об'єктом даного дослідження, оскільки ціла низка його описаних урбаністичних проблем підлягають ефективному вирішенню саме за допомогою лідарної

зйомки та тривимірного моделювання. А в умовах війни, коли існує запит до прийняття швидких і правильних рішень, а також своєчасної адаптації до складних непередбачуваних обставин, актуальність залучення сучасних технологій лише посилюється. УГС-підхід при цьому чудово підходить для чіткої систематизації та дослідження такої складної, високодиференційованої та багатофункціональної територіальної структури міста Харкова.

Висновки до розділу 3

1. У третьому розділі дисертації виконано впровадження УГС-аналізу глобального урбанізованого простору на основі змісту різних ГІС-порталів, із застосуванням інструментів повноформатних ГІС, а також із використанням власних методологічних підходів та напрацювань, розкритих у попередніх розділах. Зокрема, як один із аспектів УГС-аналізу різнорангових міст розглянуто визначення різнорангових патернів урбаністичних геоситуацій (УГСит), що витікає із однієї з ключових властивостей УГСит – їх повторюваності. Зокрема, розглянуто визначення та класифікація патернів УГСит за типами землекористування (ЗК) на підставі аналізу забудови м. Нью-Йорк.

Окремо досліджено розподіл патернів УГСит по території м. Вашингтон через 2D-моделювання ключових параметрів забудов, за якими ці патерні виділяються.

В аспекті виокремлення патернів УГСит досліджено динамічні процеси міст з використанням інструменту відстеження змін у забудові настільного додатку *City Change Management*.

2. Впроваджено прикладний аспект УГС-аналізу в рамках реалізації оцінки чисельності міського населення по геометрії забудов. Запропонований підхід передбачає наявність високого кореляційного зв'язку між розмірами житлових будівель та кількістю населення, яке може у них проживати. На основі цього припущення нами було висунуто об'ємо-метричний (ОМ) та

площе-метричний (ПМ) підходи до обчислення очікуваної кількості населення в житлових будинках.

На основі вищевказаних методик у середовищі додатків *ELiT Geoportal* та *QGIS* виконано оцінку чисельності населення для житлової забудови у м. Бостон та округу Арлінгтон. За результатами оцінки виділено декілька основних класів житлових будівель за місткістю мешканців.

Окремо визначено та охарактеризовано основні типи житлової забудови округу Арлінгтон за щільністю населення. На основі УГС-властивостей визначених типів було визначено потенційні урбаністичні проблеми таких типів, а також можливі шляхи їх вирішення.

3. Впроваджено 3D-просторовий підхід до оцінки енергоспоживання (ЕнСп) міськими будинками на основі геометрії забудов. Підхід орієнтується на наявність досить високої кореляції між об'ємом будівель і рівнем споживаної енергії, а також певної залежності між середньорічним рівнем ЕнСп будівель та їх віком й типом користування. Виконано розрахунок ЕнСп шляхом обчислення корисної площі будівлі на основі об'єму його моделі, виокремленої з лідарних даних, та подальшого визначення еталонного значення ЕнСп будівлі, в залежності від її типу та віку за реальними показниками теплолічильників на одиницю площі (kWh/m^2a).

Виконано 3D-візуалізацію результатів оцінки ЕнСп для міст Ейндховен, Амстердам та Маастріхт у середовищі *ELiT Geoportal*. Зіставлення 3D-моделей будівель з рівнем їхнього ЕнСп дозволило відстежити різні закономірності розподілу ЕнСп в урбанізованому середовищі, а також висунути певні припущення щодо факторів, що впливають на рівень ЕнСп будівлями. З основних закономірностей виділено: поступове зниження середнього рівня ЕнСп від центру до периферії, утворення кластерів забудови, зі спільними властивостями будівель й спільним рівнем ЕнСп та послідовне чергування рівня ЕнСп будівель залежно від їх типу.

4. Розкрито методику аналізу видимості у міському середовищі, як третій прикладний аспект урбогеосистемного аналізу. Методика полягає у

побудові півсфери видимості (ПСВ), яка відображає видимий об'єм, наповнений екологічними оптичними променями, які являють собою кращі оптичні умови видимості з певної точки спостереження.

Окремо розглянуто приклади реалізації описаного підходу в середовищі *ELiT Geoportal* та особливості УГС-аналізу із застосуванням ПСВ. Встановлено, що аналіз видимості у 3D-моделі міської забудови, побудованої на основі лідарних даних, дозволяє віддалено отримати такі параметри міської місцевості, як точка найкращого огляду та рівень візуального імпаكتу будівель.

5. Обґрунтовано актуальність впровадження розглянутих аспектів УГС-аналізу на підставі обробки лідарних даних для м. Харкова. Визначено 6 основних сценаріїв використання лідарних даних щодо Харкова: виокремлення патернів УГСит, аналіз щільності забудови, оцінка чисельності жителів у будівлях, оцінка ЕнСп будівель, відстеження змін у забудові, аналіз видимості в міському просторі. За кожним зі сценаріїв охарактеризовано передумови до їх реалізації у м. Харкові. Наведено попередній план дій зі збору й обчислення даних та моделювання результатів у вигляді 3D- та 2D-карт.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило вдосконалити й поглибити суспільно-географічні дослідження міст через впровадження урбогеосистемного аналізу регіональних і локальних сегментів глобального урбанізованого простору на основі ГІС-моделювання та аналізу даних лідарної зйомки. За результатами дослідження зроблені наступні висновки.

1. На підставі аналізу попередніх досліджень визначено ключові поняття, які передували виокремленню УГС та обґрунтовані передумови до її виокремлення. З метою розширення спектру застосування УГС-підходу, було визначено два його додаткові розгалуження: екстернальна УГС та інтернальна. Перша характеризує місто як точковий об'єкт, що має лінійні зв'язки з іншими містами, друга – як полігональний об'єкт, що містить лінійні зв'язки між внутрішніми компонентами міста. В контексті суспільно-географічних досліджень, УГС визначена як частковий прояв соціогеосистеми у конкретному екстенсі географічного простору, який складається з сукупності взаємодіючих між собою біогеоценозу, населення, техносфери та абіотичного середовища, що перебувають під управлінням суспільством.

2. Визначено роль сучасних технологій ДЗЗ в урбаністичних дослідженнях через огляд та аналіз існуючих застосувань. Можливості ДЗЗ суттєво збільшують розмаїття даних про досліджуване місто, які відкривають простір до введення безлічі нових методик до міських досліджень, та сприяють кращому розумінню сучасних урбаністичних проблем. При цьому ДЗЗ значно полегшують моніторинг міського довкілля, який може бути певною мірою автоматизований та проведений кінцевим користувачем у віддалених, камеральних умовах. Основним призначенням даних лідарної зйомки є подальше тривимірне моделювання об'єктів, просканованих під час її виконання. Таке їх застосування особливо привабливо при моделюванні урбаністичного середовища, оскільки робить його більш візуально зрозумілим у компактному цифровому перегляді, а також дозволяє виокремити будівлі, та

отримати точну геометричну та архітектурно-морфологічну інформацію про них.

3. Визначено особливості УГС-аналізу через ГІС-моделювання даних лідарної зйомки. Вони полягають у тому, що параметри забудов, які виокремлюються в результаті обробки лідарних даних можуть слугувати важливими індикаторами урбогеосистемних властивостей досліджуваної місцевості. У виявленні таких властивостей, їх дослідженні, співставленні та визначенні їх ролі на міському функціонуванні і полягає сутність зазначеного урбогеосистемного аналізу. Для визначення локалізованих УГС-властивостей нами виокремлено поняття урбаністичної геоситуації (УГСит) – динамічного аспекту певного стану міського середовища, у якому існують об'єкти, процеси і явища з урахуванням особливостей стану їх самих, і які знаходяться у діалектичній єдності з цим міським середовищем. Окрім того, властивості УГСит дозволяють ефективно виконувати урбаністичні дослідження на обмежених наборах лідарних даних.

4. На підставі обробки та моделювання лідарних даних побудовано тривимірну модель урбаністичного середовища, яка точно відбиває реально існуюче міське довкілля в окремих просторових екстентах різнорангових міст. Для моделювання використовувалися методики високополігонального та низькополігонального моделювання забудови міста. Подібна модель, побудована для конкретного міста, запропонована в якості основи проекту «Цифрове місто».

5. Обґрунтовано засади до реалізації проекту «Цифрове місто», як ключової ланки до реалізації концепції «Розумне місто» у його геопросторовій перспективі. Цифрове місто, представлене у вигляді тривимірної імітаційної моделі реального міста може стати центральним компонентом міського веб-ГІС застосування, що поєднуватиме у собі операції введення, аналізу, обробки, виконання розрахунків, моделювання, візуалізації та виведення геопросторових даних. УГС-підхід визначено в якості основного теоретичного

підґрунтя до створення проекту «Цифрове місто» та реалізації відповідного веб-ГІС застосування.

6. Розкрито методику побудови 3D-проекту «Цифрове місто» через обробку лідарних даних на базі веб-ГІС застосування. Зокрема розкрито три ключові функціональності: 1) виокремлення будівель, що розгалужується на високополігональне та низькополігональне моделювання будівель 2) відстеження змін у забудові через зіставлення двох наборів лідарних даних; 3) генерація цифрової моделі рельєфу. Кожний, з вказаних функціональних блоків заснований на складних алгоритмах обробки лідарної хмари точок, які були детально описані та часткового вдосконалені автором роботи. Викладено також авторські напрацювання з реалізації інтерфейсу веб-ГІС застосування для обробки й аналізу лідарних даних та тривимірної візуалізації результатів.

7. На прикладі урбанізованої території м. Нью-Йорк виокремлено та охарактеризовано патерни УГСит комерційного, індустріального, інституційного та житлового типів землекористування. У житловому типі додатково виокремлено 6 низькорангових патернів за формою, розміром будівель, їх щільністю та характером упорядкованості. Встановлено, як диференціація вказаних властивостей забудов у різних комбінаціях позначається на передбачуваній якості життя населення в тому чи іншому патерні. Побудовано карти розподілу щільності забудов, середньої площі, висоти та кількості будівель за сіткою УГСит на прикладі м. Вашингтон. Карти наочно показали ключові аспекти щільності забудови, а також тренд міського планування, що полягає у зменшенні розмірів будівель та збільшенні їх кількості від центру до периферії міста. Для окремих патернів також було побудовано ЦМР, що розширюють уявлення про вертикальне планування міста, та зіставлено два набори лідарних даних для відстеження змін у забудові.

8. В результаті оцінки чисельності населення – пропорційного розподілу переписного населення по житлових будівлях, в залежності від їх розмірів, були отримані показники очікуваної чисельності жителів в будівлях о.

Арлінгтон, за якими були побудовані карти розподілу населення по території округу. За кількістю жителів було виокремлено 7 класів будівель, серед яких найбільш домінантними визначені малоповерхові будівлі на 1-3, 3-6 та 6-18 жителів – вони склали 97% від усієї житлової забудови міста та сумарно вмістили 66% від усього міського населення. За картою розподілу населення було також визначено та проаналізовано 6 основних типів житлової забудови.

На підставі даних про об'єм, вік, та тип користування будівель виконано просторову оцінку енергоспоживання (ЕнСп) будівель для міст Ейндховен, Амстердам та Маастріхт. За тривимірними картами розподілу рівня ЕнСп досліджено різні патерни УГСит, що виявляються у співвідношенні форми, конфігурацій будівель та їх ЕнСп. Основними факторами, що впливають на рівень ЕнСп будівель визначено: вік будівлі, тип будівлі, розмір та форма, специфіка виробничих процесів у підприємстві, розташування малоповерхової забудови поблизу багатоповерхової, модернізація будівель та локальні кліматичні особливості.

9. Розкрито півсферичний підхід до аналізу видимості з певної точки спостереження у змодельованому урбаністичному середовищі. Підхід полягає у прокладенні з заданої початкової точки безлічі ліній видимості по фіксованому азимутальному колу, які перериваються при зіткненні з точками перешкод, фіксуючи видимий сегмент. набір прокладених ліній трансформується у 3D-сегменти видимого простору, які і формують півсферу видимості. Побудова півсфери у 3D-моделі урбанізованого простору дозволяє виокремити такі показники, як: видимий та невидимий об'єм з точки спостереження, а також видимий об'єм небосхилу, які можуть мати важливе значення у ряді урбаністичних задач. Зокрема, наведені приклади реалізації вказаного підходу при вирішенні таких задач, як: оцінка візуального імпаكتу будівель, розподіл телекомунікаційних мереж у місті, визначення точок найкращого огляду та точок найкращого розміщення об'єктів.

10. Обґрунтовано актуальність та висунуто набір рекомендацій щодо застосування розглянутих прикладних аспектів урбогеосистемного аналізу до

дослідження території м. Харків. Через складну історію урбанізації м. Харкова, наразі йому характерна висока диференціація типів забудов та їх непослідовний розподіл міською територією, що призводить до безлічі невирішених урбаністичних проблем, які додатково помножилися в умовах війни. Для ефективного дослідження та оптимізації наявних проблем, охарактеризовано 6 основних сценаріїв можливого використання лідарних даних та окреслено попередній план дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бардов В. Г., Федоренко В. І., Білецька Е.М. Основи екології: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Вінниця, 2013. 424 с.
2. Безрук В.А., Костріков С.В., Чуєв А.С. ГІС-аналіз функції урбогеосистеми з метою оптимізації розміщення закладів громадського харчування (на прикладі м. Харків). *Часопис соціально-економічної географії*. 2016. Вип.21(2). С. 91-101.
3. Війна на Харківщині: 2022 рік у цифрах. *Суспільне | Новини*. URL: <https://suspilne.media/350116-vijna-na-harkivsini-2022-rik-u-cifrah/> (дата звернення: 17.01.2024).
4. Воронін І. Н., Яковенко І. М. Теорії і концепції сучасної суспільної географії: інформаційна складова. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*”, серія «Географія». 2011. Вип. 24(63). С. 148-159.
5. Головне управління статистики у Харківській області. URL: <http://kh.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 17.01.2024).
6. Голубець М. А. Геосоціосистемологія. Львів, 2013. 264 с.
7. Графік відключення світла Харків (Харківська область). *Графік відключення світла у Харківській області*. URL: <https://kharkiv.energy-ua.info/select/Харків> (дата звернення: 17.01.2024).
8. Дерун Т. Теоретичні підходи до визначення змісту понять "місто" та "мале місто". *Вісник Національної академії державного управління при Президентові України*. 2009. Вип. 2. С. 146-156.
9. Заставецький Т. Б. Система міських поселень агропромислового регіону в умовах трансформації суспільства: монографія. Тернопіль, 2005. 180 с.
10. Костріков С. В. Геоінформаційний підхід до аналізу урбогеосистем на підставі технології лазерного дистанційного зондування. *Регіон – 2014: Стратегія оптимального розвитку: матеріали міжнародної науково–практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців, (м. Харків, 5-6 листопада 2014 р.)*. Харків, 2014. С. 31-34.
11. Костріков С. В. Деякі особливості впровадження ГІС-застосувань при суспільно-географічних дослідженнях. *Регіон – 2013: Стратегія оптимального розвитку: матеріали Міжнародної науково–практичної конф. студентів, аспірантів та молодих науковців, (м. Харків 28-29 жовтня 2013 р.)*. Харків, 2013. С. 98–100.
12. Костріков С. В., Сегіда К. Ю. Теоретична і прикладна геоінформатика: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Харків, 2016. 592 с.
13. Костріков С. В., Чуєв О. С. Аналіз дворівневих урбогеосистем через засоби ГІС. *Вісник Харківського національного університету. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2016. Вип. 44. С. 98-109.

14. Костріков С., Бубнов Д., Кострікова А. [та інші]. Веб-застосування ELiT – програмне забезпечення для моделювання і аналізу міського середовища. Збірник матеріалів конференції «ГІС-Форум» – 2018». Харків, 2018. С.56-59.
15. Костріков С.В. Серьогін Д.С., Кравченко К.О. Практикум із створення ГІС-карт, просторового аналізу і геообробки на повноформатних ГІС-платформах (на прикладі ArcGIS 10.2 і QGIS 3.16): Навчально-методичний посібник для студентів вишів. Харків, 2022. 499 с.
16. Костріков С.В., Васильєв В.В., Пудло Р.А. [та інші]. Дослідження міського середовища через його відтворення за допомогою обробки лідар-даних. *Регіон – 2019: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 16 – 17 жовтня 2019 р.). Харків, 2019. С. 34-37.
17. Костріков С.В., Кулаков Д.Л., Сегіда К.Ю. Програмне забезпечення ГІС для LiDAR–технології дистанційного зондування в цілях аналізу урбогеосистем. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2014. Вип. 19. С. 45-52.
18. Костріков С.В., Серьогін Д.С. Відтворення топографічної поверхні урбанізованих територій на підставі геообробки лідарних даних // Матеріали доповідей XIII науково-практичного семінару за міжнародної участі “Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат та прилеглих територій” (м. Львів, 2–3 березня 2023 р). Львів, 2023. С. 72-77.
19. Костріков С.В., Серьогін Д.С. Візуальний аналіз міського середовища для підтримки прийняття рішень у муніципальному менеджменті. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Міста та регіони в епіцентрі просторових змін” (м. Київ, 24-25 листопада 2022 р). Київ, 2023. С. 42-43.
20. Костріков С.В., Серьогін Д.С., Бережний В.А. Візуальний аналіз урбаністичного середовища як складова урбогеосистемного підходу. *Часопис соціально-економічної географії*. 2021. Вип.30(1). С. 7-23.
21. Немець К. А., Немець Л.М. Теорія і методологія географічної науки: методи просторового аналізу у суспільній географії: Навчально-методичний посібник. Харків, 2014. – 172 с.
22. Основні показники економічного та соціального розвитку м. Харкова за 9 місяців. *Офіційний сайт Харківської міської ради, міського голови, виконавчого комітету*. URL: <https://www.city.kharkiv.ua/ru/document/osnovni-pokazniki-ekonomichnogo-ta-sotsialnogo-rozvitku-m-kharkova-za-9-misyatsiv-69275.html> (дата звернення: 18.01.2024).
23. Попович О.В., Костріков С.В. ГІС-моделювання ландшафтного компоненту урбогеосистем. *Регіон – 2017: Стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково–практичної конференції (м. Харків 19-20 вересня 2017 р.). Харків, 2017. С. 56-59.
24. Попович О.В., Костріков С.В. Щодо поняття суспільно-географічного ландшафту. *Регіон – 2018: Суспільно-географічні аспекти*: матеріали міжнародної науково–практичної конференції (м. Харків 3-4 квітня 2018 р.). Харків, 2018. С. 36-38.

25. Пункти незламності. *nezlamnist.gov.ua*. URL: <https://nezlamnist.gov.ua/> (дата звернення: 15.01.2024).
26. Радянська (де)урбанізація Харкова. *Радянська (де)урбанізація Харкова*. URL: <https://litteralis.com/kharkiv/> (дата звернення: 15.01.2024).
27. Реймерс Н. Ф. Природопользование. Словарь-справочник. Москва, 1990. 639 с.
28. Світличний О.О., Пяткова А.В., Муркалов О.Б. Геоінформаційні технології в географії – освіта, наука та практична діяльність. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2022. Том 27. Вип. 2(41). С. 67-82.
29. Серьогін Д. «Юз-кейси» як предметні впровадження результатів, отриманих через обробку лідарних даних у середовищі ELiT. *Регіон-2021: Суспільно-географічні аспекти*: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців (м. Харків, 15 квітня 2021 р.). Харків, 2021. С. 45-48.
30. Серьогін Д.С. ГІС-моделювання та тривимірна візуалізація міської забудови в середовищі веб-ГІС порталу Марбох. *Регіон – 2021: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 21 жовтня 2021 р.). Харків, 2021. С. 157-159.
31. Серьогін Д.С. Костріков С.В. Особливості та переваги ГІС-моделювання міського середовища на підставі лідарної інформації. *Регіон – 2020: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 8-9 жовтня 2020 р.). Харків, 2020. С. 34-36.
32. Серьогін Д.С. Принципи обробки та тривимірного моделювання через лідарні дані для прикладних досліджень міського середовища. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2022. Вип. 57. С. 218-233.
33. Серьогін Д.С., Білянська С.М. Застосування оцінки чисельності населення у житлових будівлях на основі лідарних даних з метою геомаркетингового аналізу міської території. *Регіон-2023: стратегія оптимального розвитку*: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків 20 жовтня 2023 р.). Харків, 2023. С. 140-143.
34. Серьогін Д.С., Костріков С.В. Моделювання урбаністичного середовища через обробку лідарних даних для оцінки воєнного імпаку. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2023»* (Львів-Брюховичі, 19-21 квітня 2023 р.). Львів, 2022. С. 43-47.
35. Серьогін Д.С., Костріков С.В. Виокремлення урбаністичних геоситуацій в міському середовищі. *Сьомі Сумські наукові географічні читання*: збірник матеріалів Всеукраїнської наукової конференції (м. Суми, 14-16 жовтня 2022 р.). Суми, 2022. С. 129-133.
36. Серьогін Д.С., Костріков С.В. До питання виокремлення урбаністичних геоситуацій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2022. Вип. 58. С. 241-256.

37. Серьогін Д.С., Костріков С.В. Переваги лідарних даних для відстеження та оцінки руйнувань міської забудови під час воєнних дій. *Регіон – 2022: стратегія оптимального розвитку: матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків, 24 листопада 2022 р.). Харків, 2022. С. 180-184.
38. Серьогін Д.С., Костріков С.В. Просторова оцінка енергоспоживання забудов на підставі тривимірного моделювання міського середовища. *Часопис соціально-економічної географії*. 2023. Вип. 34. С. 27-41.
39. Симоненко І.В., Костріков С.В., Серьогін Д.С. Суспільно-географічний ландшафт як один із способів подання міського довкілля // *Регіон – 2023: суспільно-географічні аспекти: матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків, 20 квітня 2023 р.). Харків, 2023. С. 54-56.
40. Соціальна географія: підручник / за ред. Л. Немець та К. Мезенцева. Київ, 2019. 304 с.
41. ТОП-5 новобудов, які зіпсували Харків. *NewsRoom*. URL: <https://www.newsroom.kh.ua/ua/city/top-5-novobudov-yaki-zipsuvali-harkiv> (дата звернення: 17.01.2024).
42. Топчієв О. Г. Суспільно-географічні дослідження: методологія, методи, методики. Одеса, 2005. 632 с.
43. Універсальний словник-енциклопедія (4-ге вид.) / Укл. М. В. Попович (гол. ред.) та ін. Львів, 2006. 1432 с.
44. Філатов В.М., Костріков С.В. Щодо розгляду окремих аспектів концепції «Розумне Місто» у суспільно-географічній площині. *Регіон–2019: Суспільно-географічні аспекти*. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців (м. Харків 11–12 квітня 2019 р.). Харків, 2019. С. 108–111.
45. Чуєв О. С. Вирішення задачі пошуку придатної ділянки міста за допомогою просторового аналізу. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія – Географія – Екологія»*. 2017. Вип. 47. С. 169-175.
46. Чуєв О. С. Дефініція поняття «урбогеосистема». *«Майбутній науковець - 2017»*: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Сєверодонецьк, 1 грудня 2017 р.). Сєверодонецьк, 2017. – С. 489-490.
47. Чуєв О.С., Костріков С.В. Оцінка через ГІС-засоби просторової диференціації благоустрою міста як функції урбогеосистеми (на прикладі м. Харків). *Часопис соціально-економічної географії*. 2015. Вип. 18(1). С. 52-62.
48. Шаблій О. І. Основи загальної суспільної географії: підручник. Львів, 2003. 444 с.
49. Шипулін В. Д. Основи ГІС-аналізу: Начальний посібник. Харків, 2014. 330 с.
50. 3D Tiles Specification. *OGC Portal System*. URL: <https://portal.ogc.org/files/102132> (date of access: 17.11.2023).

51. Agyapong P.K., Iwamura M., Staehle D. [and other]. Design considerations for a 5G network architecture. *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52(11). P. 65-75.
52. Alles over de BAG - Kadaster.nl zakelijk. *Kadaster | Particulier - Kadaster.nl particulier*. URL: <https://www.kadaster.nl/zakelijk/registraties/basisregistraties/bag> (date of access: 05.06.2023).
53. Appleyard D. Lynch K, Meyer J.R. *The View from the Road*. Cambridge, MA, 1965. 258 p.
54. ArcGIS Web Application. *Services*. URL: <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/> (date of access: 05.06.2023).
55. Arlington Census Tracts. *ArcGIS Hub*. URL: <https://hub.arcgis.com/datasets/arlingtontx::arlington-census-tracts/explore> (date of access: 13.06.2023).
56. Arlington County Virginia. *Official Website of Arlington County Virginia Government*. URL: <https://www.arlingtonva.us/> (date of access: 13.06.2023).
57. Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2000. Vol. 33(4). P. 110-117.
58. Bai X. Eight energy and material flow characteristics of urban ecosystems. *AMBIO A Journal of the Human Environment*. 2016. Vol. 45(7). P 819-830.
59. Bartie P., Reitsma F., Kingham S. [and other]. Advancing visibility modelling algorithms for urban environments. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2010. Vol. 34(6). P. 518-531.
60. Batty M. Exploring isovist fields: space and shape in architectural and urban morphology. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2001. Vol. 28. P. 123-150.
61. Batty M., Rana S. The automatic definition and generation of axial lines and axial maps. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2004. Vol. 28. P. 123-150.
62. Baviera-Puig A., Buitrago-Vera J., Escriba-Perez C. Geomarketing models in supermarket location strategies. *Journal of Business Economics and Management*. 2016. Vol. 17(6). P. 1205-1221.
63. Benedikt M.L. To take hold of space: isovists and isovist fields. *Environment and Planning B*. 1979. Vol. 6. P. 47-65.
64. Biljecki F. Level of detail in 3D city models: Doctoral dissertation. Delft, 2017. 353 p.
65. Biljecki F., Ohori K. A., Ledoux H. [and other]. (2016): Population Estimation Using a 3D City Model: A Multi-Scale Country-Wide Study in the Netherlands. *PLoS One*. 2016. Vol. 11(6). P. 1-22.
66. Blesl M. Kempe S., Huther H. Erfassung des räumlich hoch aufgelösten Raumwärmebedarfs. *EuroHeat&Power*. 2010. Vol. 39(1). P. 28-33.
67. Bosselmann P. *Representation of Places: Reality and Realism in City Design*. Berkeley, 1998. 228 p.

68. Brossard T., Joly D. Tourneux F. Modélisation opérationnelle du paysage. *Paysage et information géographique* / Edited by T. Brossard, J. C. Wieber. Paris, 2008. P. 119-140.

69. Carrión, D. Estimation of the energetic state of buildings for the city of Berlin using a model represented in 3D city CityGML model: Master's thesis. Berlin, 2010. 178 p.

70. CesiumJS. *Cesium*. URL: <https://cesium.com/platform/cesiumjs/> (date of access: 13.11.2023).

71. Cheer B.C. Urban morphology as a research method. *Planning Knowledge and Research* / Edited by T.W. Sanchez. New York, 2017. P. 167-181.

72. Chen Q., Gong P., Baldocchi D. [and other]. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2007. Vol. 73. P. 175-185.

73. Chen Y., Shooraj E., Rajabifard A. [and other]. From IFC to 3D Tiles: An integrated open-source solution for visualizing BIMs on Cesium. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2018. Vol. 7(10). P. 393.

74. Chester L. Arnold Jr., Gibbons C. J. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*. 1996. Vol. 62(2). P. 243-258.

75. Chi Z. Smart Cities. *Encyclopedia MDPI | Scholarly Community*. URL: <https://encyclopedia.pub/entry/7953> (date of access: 28.11.2023).

76. Christaller, W. Central Places in Southern Germany / Translated by C.W. Baskin. NY, 1967. 230 p.

77. Czyska K. Application of lidar data and 3D-city models in visual impact simulations of tall buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. Vol. 40. P. 1359-1366.

78. Czyska K. Tall buildings and harmonious landscape. *Space and Form*. 2010. Vol. 13. P. 267-280.

79. Döllner J., Kolbe T., Liecke F. [and other]. The virtual 3D city model of Berlin - Managing, Integrating and communicating complex urban information. Proceedings of the *25th International Symposium on Urban Data Management UDMS* (Aalborg, Denmark, 15-17 May 2006). Aalborg, 2006. P. 1-16.

80. Dong P., Chen. Q. LiDAR Remote Sensing and Applications. Boca Raton, 2018. 246 p.

81. Dong P., Guo H. A framework for automated assessment of post-earthquake building damage using geospatial data. *International Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 33. P. 81-100.

82. Dong P., Ramesh S., Nepali A. Evaluation of small area population estimation using LiDAR, Landsat TM and parcel data. *International Journal of Remote Sensing*. 2010. Vol.31. P. 5571-5586.

83. Dong P., Zhong R., Yigit A. Automated parcel-based building change detection using multitemporal airborne LiDAR data. *Surveying and Land Information Science*. 2018. Vol. 77. P. 5-13.

84. Download Elevation Data. *Avaleht | Geoportaal | Maa-amet*. URL: <https://geoportaal.maaamet.ee/eng/Maps-and-Data/Elevation-data/Download-Elevation-Data-p664.html> (date of access: 27.06.2023).
85. Du, G. Using GIS for analysis of urban system. *GeoJournal*. 2001. Vol. 52. P. 213-221.
86. Ehlers M., Jadcowski M. A., Howard R. R. [and other]. Application of SPOT data for regional growth analysis and local planning. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1990. Vol. 56. P. 175-180.
87. Energy management in Osnabrück. *All things environmental*. URL: <https://enviropaul.wordpress.com/2016/06/07/energy-management-in-osnabruck/> (date of access: 28.11.2023).
88. Esch T., Heldens W., Hirner A. [and other]. Breaking new ground in mapping human settlements from space – The Global Urban Footprint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Vol. 134. P. 30-42.
89. Esch T., Taubenböck H., Roth A. [and other]. TanDEM-X mission – New perspectives for the inventory and monitoring of global settlement patterns. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2012. Vol. 6(1). P. 1-22.
90. Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*. 1981. Vol. 24. P. 381-395.
91. Fisher-Gewirtzman D., Wagner I. A. Spatial openness as a practical metric for evaluating built-up environments. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2003. Vol. 30. P. 37-49.
92. Foucquier A., Robert S., Suard F. [and other]. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 23. P. 272-288.
93. Gal T., Lindberg F., Unger J. Computing continuous sky view factor using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. Vol. 95. P. 111-123.
94. Gemeente Eindhoven. *Gemeente Eindhoven*. URL: <https://www.eindhoven.nl/> (date of access: 17.06.2023).
95. Gibson J.J. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Hillsdale, 1986. 548 p.
96. Giffinger R., Fertner C., Kramar H. [and other]. Smart Cities: Ranking of European Medium-sized Cities. *Center of Regional Science*. Vienna, 2007. 28 p.
97. Goodhew J., Pahl S., Auburn T. [and other]. Making heat visible: Promoting energy conservation behaviors through thermal imaging. *Environment and Behavior*. 2015. Vol. 47(10). P. 1059-1088.
98. Haidu I., Craciun A.I., Lupau C. [and other]. Using GIS in order to detect the optimal areas for dedicated advertising. *Geographia Technica*. 2009. P. 40-49.
99. Harris P. M., Ventura S. J. The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1995. Vol. 61. P. 993-998.

100. Harvey J.T. Population estimation at the pixel level: developing the expectation maximization technique. *Remotely Sensed Cities* / Edited by V. Mesev. 2003. P. 181-205.
101. Harvey J.T. Population estimation models based on individual TM pixels. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2002. Vol. 68. P. 1181-1192.
102. Hnatushenko V., Shedlovska Y., Shedlovsky I. Processing Technology of Thematic Identification and Classification of Objects in the Multispectral Remote Sensing Imagery. *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making*. 2022. P.407-425.
103. How Lidar Drone Surveying Works. *Propeller*. URL: <https://www.propelleraero.com/blog/how-lidar-drone-surveying-works/> (date of access: 11.11.2023).
104. Høydedata. *Høydedata*. URL: <https://hoydedata.no/LaserInnsyn2/> (date of access: 14.06.2023).
105. Huang X., Zhang L. A multidirectional and multiscale morphological index for automatic building extraction from multispectral GeoEye-1 imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2011. Vol. 77(7). P. 721-732.
106. Hung Q. Ha, Q. Weng. Mapping Impervious Surfaces in the Greater Hanoi Area, Vietnam, from Time Series Landsat Image 1988–2015. *Urban Remote Sensing, 2nd ed.* / Edited by A. Weng, D. Quattrochi, P. Gamba. Boca Raton, 2018. P. 224-243.
107. Industrial Energy Efficiency: Using New Technologies to Reduce Energy Use in Industry and Manufacturing. *Search Issue Lab*. URL: <https://search.issuelab-dev.org/resource/industrial-energy-efficiency-using-new-technologies-to-reduce-energy-use-in-industry-and-manufacturing> (date of access: 12.12.2023).
108. Introducing 3D Tiles. *Cesium*. URL: <https://cesium.com/blog/2015/08/10/introducing-3d-tiles/> (date of access: 13.11.2023).
109. Introduction – Google Earth User Guide. *Google Earth*. URL: <https://earth.google.com/intl/ar/userguide/v4/index.htm> (date of access: 13.11.2023).
110. Jaffal I., Inard Ch., Ghiaus Ch. Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments. *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41(6). P. 669-677.
111. Jain A.K., Murty M.N., Flynn P.J. Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*. 1999. Vol. 31(3). P. 264-323.
112. Jakubiec J. A., Reinhart C.F. A method for predicting city-wide electric production from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly DAYSIM simulations. *Solar Energy*. 2013. Vol.93. P 127-143.
113. Jwa Y., Sohn G., Cho W. [and other]. An implicit geometric regularization of 3D building shape using airborne LiDAR data. *ISPRS - International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. Vol. 37. P. 69-75.

114. Kashani A.G., Olsen M.J., Parrish C.E. [and other]. A review of LiDAR radiometric processing: From ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration. *Sensors*. 2015. Vol. 15(11). P. 28099-28128.
115. Kobler A., Pfeifer N., Ogrinc P. [and other]. Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from aerial laser scanner data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 108. P. 9-23.
116. Kolbe T.H. Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. *3D Geo-Information Sciences. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography / Edited by J. Lee, S. Zlatanova*. Springer, 2009. P. 175-192.
117. Kolbe T.H., König G., Nagel C. *Advances in 3D Geo-Information Sciences*. Springer, 2011. 294 p.
118. Kostrikov S. V. Urban remote sensing with lidar for the Smart City Concept implementation. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*. 2019. Vol. 50. P. 101-124.
119. Kostrikov S., Bubnov D., Pudlo R. Urban environment 3D studies by automated feature extraction from LiDAR point clouds. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*. 2020. Vol. 52. P. 156-182.
120. Kostrikov S., Kravchenko K., Serohin D. [and other]. 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"*. 2023. Vol. 59. P. 140-165.
121. Kostrikov S., Pudlo R., Bubnov D. [and other]. Automated Extraction of Heavyweight and Lightweight Models of Urban Features from LiDAR Point Clouds by Specialized Web-Software. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2020. Vol. 5(6). P. 72-95.
122. Kostrikov S., Pudlo R., Bubnov D. [and other]. ELiT, multifunctional web-software for feature extraction from 3D LiDAR point clouds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol.9(11). P. 650-885.
123. Kostrikov S., Pudlo R., Kostrikova A. [and other]. Studying of urban features by the multifunctional approach to LiDAR data processing. *2019 Joint Urban Remote Sensing Event* (Vannes, France 22-24 May 2019). Vannes, 2019. P. 1-4.
124. Kostrikov S., Seryogin D. Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. *Urban Agglomeration / Edited by A. Battisti and S. Baiani*. INTECH Open, 2022. P. 251-273.
125. Kostrikov, S.; Pudlo, R.; Kostrikova, A. Three key EOS LiDAR Tool functionalities for Urban Studies. In *Proceedings of the 39th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)* (Kuala Lumpur, Malaysia, 15-19 October 2018). Kuala Lumpur, 2018. Vol. 3. P. 1676-1685.
126. Kraus K., Pfeifer N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1998. Vol. 53. P. 193-203.

127. Kumar P., McElhinney C.P., Lewis P. [and other]. An automated algorithm for extracting road edges from terrestrial mobile LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013. Vol. 85. P. 44-55.
128. Lake I.R., Lovett A.A., Bateman I.J. Using GIS - and large-scale digital data to implement hedonic pricing studies. *International Journal of Geographical Information Science*. 2000. Vol. 14(6), P. 521-541.
129. Landa J., Prochazka D. Automatic road inventory using LiDAR. *Procedia Economics and Finance*. 2014. Vol. 12. P. 363-370.
130. LAStools: converting, filtering, viewing, processing, and compressing LIDAR data in LAS and LAZ format. *LAStools LiDAR Processing*. URL: <https://lastools.github.io/> (date of access: 11.04.2023).
131. LiDAR aérien 2015 – Carte interactive de téléchargement du LiDAR aérien - Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal. *Bienvenue - Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal*. URL: <https://donnees.montreal.ca/dataset/lidar-aerien-2015/resource/a2bc4ed1-3850-4bdf-b15c-6318dc7b305f> (date of access: 30.06.2023).
132. LiDAR Data for Washington DC is Available as an AWS Public Dataset. *Amazon Web Services*. URL: <https://aws.amazon.com/ru/blogs/publicsector/lidar-data-for-washington-dc-is-available-as-an-aws-public-dataset/> (date of access: 15.06.2023).
133. Linares S., Picone N. Application of Remote Sensing and Cellular Automata Model to Analyze and Simulate Urban Density Changes. *Urban Remote Sensing, 2nd ed.* / Edited by A. Weng, D. Quattrochi, P. Gamba. Boca Raton, 2018. P. 268-283.
134. Liu X., Zhang Z. LIDAR data reduction for efficient and high quality DEM generation. *ISPRS - International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. Vol. 37. P. 173-178.
135. Llobera M. Extending GIS-based visual analysis: the concept of visual scapes. *International Journal of Geographic Information Science*. 2003. Vol. 17. P. 25-48.
136. Loga T., Diefenbach N. Born R. Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, zweite erweiterte Auflage. Darmstadt, 2015. 281 p.
137. Loga T., Stein B., Diefenbach N. [and other]. Deutsche Wohngebäudetypologie. *Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Darmstadt, 2016. 281 p.
138. Lu M., Kieloch Z. Accuracy of transmission line modeling based on aerial LiDAR survey. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. Vol. 23(3). P. 1655-1663.
139. Lwin K., Murayama Y. A GIS approach to estimation of building population for micro-spatial analysis. *Transaction in GIS*. 2009. Vol. 13(4). P. 401-414.
140. Maltezos E. Automatic extraction of building roof planes from airborne lidar data applying an extended 3d randomized hough transform. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. Vol.III-3. P. 209-216.

141. Mapbox Studio manual. *Mapbox*. URL: <https://docs.mapbox.com/studio-manual/guides/> (date of access: 27.11.2023).
142. Marinoni A., Gamba P. Air Quality and Health Monitoring in Urban Areas Using EO and Clinical Data. *Urban Remote Sensing, 2nd ed.* / Edited by A. Weng, D. Quattrochi, P. Gamba. Boca Raton, 2018. P. 328-343.
143. Marinoni A., Gamba P. Big data for human–environment interaction assessment: Challenges and opportunities. Proceedings of the ESA Big Data Space conference (Frascati, November 2014). Frascati, 2014. P. 1-4.
144. Mason D.C., Horritt M.S., Hunter N.M. [and other]. Use of fused airborne scanning laser altimetry and digital map data for urban flood modelling. *Hydrological Processes*. 2007. Vol. 21(11) P.1436-1447.
145. MassGIS Data: 2010 U.S. Census. *Mass.gov*. URL: <https://www.mass.gov/info-details/massgis-data-2010-us-census> (date of access: 06.06.2023).
146. Mavrogianni A., Davies M., Kolokotroni M. [and other]. A GIS-based bottom-up space heating demand model of the London domestic stock, Proceedings *11th International IBPSA Conference, Building Simulation* (Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009). Glasgow, 2009. P. 1061-167.
147. McLaughlin R.A. Extracting transmission lines from airborne LiDAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2006. Vol. 3(2) P. 222-226.
148. Meeteren M. Urban System. *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies* / Edited by A.M. Orum. John Wiley & Sons, 2019. P. 1–11.
149. Miyazaki, H., Shao, X., Iwao, K. [and other]. An automated method for global urban area mapping by integrating ASTER satellite images and GIS data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2013. Vol. 6(2). P. 1004-1019.
150. Mollashahi H., Szymura M. Urban Ecosystem: An Interaction of Biological and Physical Components. *Biodiversity of Ecosystems* / Edited by L. Hufnagel. INTECH Open, 2021. P. 1-14.
151. Monzon A. Smart cities concept and challenges: Bases for the assessment of smart city projects. *2015 International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)* (Lisbon, Portugal 20-22 May 2015). Lisbon, 2015. P. 1-11.
152. Morar C., Lukić T., Valjarević A. [and other]. Spatiotemporal Analysis of Urban Green Areas Using Change Detection: A Case Study of Kharkiv, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10.
153. Moser G, Pol. E, Bernard M. [and other]. People, places, and Sustainability. Gottingen, 2013. 340 p.
154. Nam T., Pardo T.A. Smart City as Urban Innovation: Focusing on management, Policy, and Context. *ICEGOV Conference* (Tallinn, Estonia 26-28 September 2011). Tallinn, 2011. P. 185-194.
155. Nan L., Jiang C., Ghanem B. [and other]. Template assembly for detailed urban reconstruction. *Computer Graphics Forum*. 2015. Vol. 34(2). P. 217-228.

156. Nan L., Wonka P. PolyFit: Polygonal surface reconstruction from point clouds. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision* (Venice, Italy, 22-29 October 2017). Venice, 2017. P. 2372-2380.
157. Niemets K., Sehida K., Niemets L. [and other]. Methodology of human-geographical researches: contemporary approaches and methods. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*. 2022. Vol. 56. P. 143-158.
158. Niemets L., Suptelo O., Lohvynova M. [and other]. Conflicts in urban space and post-industrial urban transformations. *Economic and Social Geography*. 2021. Vol. 85. P. 62-71.
159. Niemets. K., Kravchenko K., Kandyba Y. [and other]. World cities in terms of the sustainable development concept. *Geography and Sustainability*. 2021. Vol. 2. P. 304-311.
160. OpenGeodata.NRW. *Information und Technik Nordrhein-Westfalen*. URL: https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/hm/3dm_1_las (date of access: 02.07.2023).
161. OpenStreetMap Wiki. *OpenStreetMap Wiki*. URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki> (date of access: 26.11.2023).
162. OpenTopography. *Home* / *OpenTopography*. URL: <https://opentopography.org/> (date of access: 26.11.2023).
163. Pesaresi M., Ehrlich D., Ferri S. [and other]. Operating procedure for the production of the Global Human Settlement Layer from Landsat data of the epochs 1975, 1990, 2000, and 2014. *JRC Technical Report EUR 27741 EN*. 2016. 67 p.
164. Pickett S. T. A. Urban ecosystem | Human Impact, Biodiversity & Pollution. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/science/urban-ecosystem> (date of access: 01.12.2023).
165. Polat N., Uysal M., Toprak A.S. An investigation of DEM generation process based on LiDAR data filtering, decimation, and interpolation methods for an urban area. *Measurement*. 2015. Vol. 75. P. 50-56.
166. Portsmouth City Council Launches Online Thermal Map. *Pollution Solutions Online*. URL: <https://www.pollutionsolutions-online.com/news/consultancy-services/19/bluesky/portsmouth-city-council-launches-online-thermal-map/23962> (date of access: 03.12.2023).
167. Pred A. R. Urban Growth and the Circulation of Information: The United States System of Cities, 1790-1840. Cambridge, 1973. 348 p.
168. Putra S.Y, Yang P., Li W. GIS-based 3D visibility analysis for a high-density urban housing environment // *Proceedings of 5th China Urban Housing Conference*. Hong Kong, 2005. P.567-578.
169. Pyysalo U., Oksanen J., Sarjakoski T. Viewshed analysis and visualization of landscape voxel models // *Proceedings of the 24th International Cartographic Conference* (Santiago, Chile, 15-21 November). Santiago, 2009. P. 124-135.
170. QGIS User Guide. *QGIS Documentation*. URL: https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/user_manual/index.html (date of access: 14.11.2023).

171. Rana, S., 2006. Isovist analyst: an ArcView extension for planning visual surveillance. *Proceedings of ESRI International User Conference*. Redlands, 2006. P. 1-9.
172. Ratti C., Baker N., Steemers K. Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*. 2005. Vol. 37(7). P. 762-776.
173. Sagl G., Resch B., Blashker T. Contextual sensing: integrating contextual information with human and technical geo-sensor information for Smart Cities. *Sensors*. 2015. Vol. 15(7). P. 17013-17035.
174. Sampath A., Shan J. Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial LIDAR point clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010. Vol 48(3). P. 1554-1567.
175. Schnabel R., Wahl R., Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. *Computer graphics forum*. 2007. Vol. 26. P. 214-226.
176. Shan J., Sampath A. Building extraction from LiDAR point clouds based on clustering techniques. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing* / Edited By J. Shan, C.K. Toth. Boca Raton, 2008. P. 423-446.
177. Shan, J.; Sampath, A. Urban DEM generation from raw LiDAR data: A labeling algorithm and its performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2009. Vol. 75. P. 427-442.
178. Shewchuk J.R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation. *Computational Geometry*. 2014. Vol. 47(1). P. 741-778.
179. Smart Nation Singapore. *Smart Nation Singapore*. URL: <https://www.smartnation.sg/> (date of access: 02.04.2023).
180. Song X. Sexton J. O, Huang C. [and other]. Characterizing the magnitude, timing and duration of urban growth from time series of Landsat-based estimates of impervious cover. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 175. P. 1-13.
181. Srinivas H. Sustainable Development: Concepts. *GDRC / The Global Development Research Center*. URL: <https://www.gdrc.org/sustdev/concepts.html> (date of access: 01.12.2023).
182. Stadler A., Nagel C., König G. [and other]. Making interoperability persistent: A 3D geo database based on CityGML. *3D Geo-Information Sciences. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* / Edited by J. Lee, S. Zlatanova. Springer, 2009. P. 175-192.
183. Stewart I. D., Oke T. R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. Vol. 93(12). P. 1879-1900.
184. Storing lidar data–ArcMap | Documentation. URL: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/storing-lidar-data.htm> (date of access: 01.12.2023).
185. Strzalka A., Eicker U., Coors V. [and other]. Modeling energy demand for heating at city scale. *SimBuild– Fourth National Conference*. New York, 2010. P. 358-364.
186. Suliman A., Zhang Y. Stereo-Based Building Roof Mapping in Urban Off-Nadir VHR Satellite Images: Challenges and Solutions. *Urban Remote Sensing, 2nd ed.* / Edited by A. Weng, D. Quattrochi, P. Gamba. Boca Raton, 2018. P. 91-121.

187. Syrri V., Ferri S., Ehrlich D. [and other]. Image enhancement and feature extraction based on low-resolution satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. Vol. 8(5). P. 1986-1995.
188. Tacoli C.G., McGranahan G.U., Satterthwait D.J. World migration report 2015 – Urbanization, Rural–urban Migration and Urban Poverty. *IOM's Global Migration Data Analysis Centre*. London, 2015. – 35 p.
189. Talari S., Shafie-khah M., Siano P. [and other] A review of Smart Cities based on the Internet of Things concept. *Energies*. 2017. Vol. 10(4). P. 421.
190. Tarsha-Kurdi F., Landes T., Grussenmeyer P. Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from Lidar data // *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland*. 2007. Vol. XXXVI-3/W52. P. 407-412.
191. Tarsha-Kurdi F., Landes T., Grussenmeyer, P. Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LIDAR data. *The Photogrammetric Journal of Finland*. 2008. Vol. 21(1). P. 97-109.
192. The City of Amsterdam. *City of Amsterdam*. URL: <https://www.amsterdam.nl/> (date of access: 16.06.2023).
193. The L'Enfant Plan (U.S. National Park Service). *NPS.gov Homepage (U.S. National Park Service)*. URL: <https://www.nps.gov/articles/dc-monumental-core-the-lenfant-plan.htm> (date of access: 01.12.2023).
194. The significance of urban design codes. *Urban Design*. URL: <https://nclurbandesign.org/the-significance-of-urban-design-codes> (date of access: 14.07.2023).
195. Thermographie des immeubles parisiens. *Apur*. URL: <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/thermographie-immeubles-parisiens> (date of access: 03.12.2023).
196. Treitz P. M., Howard P. J., Gong P. Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural–urban fringe: A case study. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1992. Vol. 58. P. 439-448.
197. Tse R., Gold Ch., Kidner D. Using the Delaunay Triangulation/ Voronoi Diagram to extract Building Information from Raw LIDAR Data. *4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD)* (Glamorgan, UK, 09-11 July 2007). Glamorgan, 2007. P. 222-229.
198. Tsubaki R., Fujita I. Unstructured grid generation using LiDAR data for urban flood inundation modelling. *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24(11). P. 1404-1420.
199. Tsvetkov V.Ya. Virtual Modeling. *European Journal of Technology and Design*. 2016. Vol. 11(1). P. 35-44.
200. Tymkow P., Borkowski A. Land cover classification using airborne laser scanning data and photographs. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. Vol. 37. P. 185-190.

201. Urban Ecosystem Definition, Characteristics, Examples, Importance. *Felsics.com*. URL: <https://www.felsics.com/urban-ecosystem-definition-characteristics-examples-importance/> (date of access: 01.12.2023).
202. Urban Ecosystems. *Biodiversity Information system of Europe*. URL: <https://biodiversity.europa.eu/europes-biodiversity/ecosystems/urban-ecosystems> (date of access: 01.12.2023).
203. USGS Science Data Catalog. *USGS Science Data Catalog*. URL: <https://data.usgs.gov/datacatalog/data/USGS:b7e353d2-325f-4fc6-8d95-01254705638a> (date of access: 15.06.2023).
204. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung- EnEV). Bundesrepublik Deutschland (BRD), 2007. 50 p.
205. Voegtle T., Steinle D., Tovari D. Airborne laser scanning data for determination of suitable areas for photovoltaics. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2005. Vol.36. P. 215-220.
206. Wang J., Robinson G., White K. Fast solution to local viewshed computation using grid-based digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 1996. Vol. 62(10). P. 1157-1164.
207. Webster T. L., Forbes D. L., MacKinnon E. [and other]. Flood-risk mapping for storm-surge events and sea-level rise using lidar for southeast New Brunswick. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 32(2). P. 194-211.
208. Weng A., Quattrochi D., Gamba P. *Urban Remote Sensing*, 2nd ed. Boca Raton, 387 p.
209. Weng, Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 117(2). P. 34–49.
210. What is Lidar data and where can I download it? | *U.S. Geological Survey. USGS.gov / Science for a changing world*. URL: <https://www.usgs.gov/faqs/what-lidar-data-and-where-can-i-download-it> (date of access: 15.06.2023).
211. Wieland, M., Pittore, M. Large-area settlement pattern recognition from Landsat-8 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. Vol. 119. P. 294-308.
212. Wu S., Qiu X., Wang L. Population estimation methods in GIS and remote sensing: A review. *GIScience & Remote Sensing*. 2005. Vol. 42. P. 80-96.
213. Xia Z., Qing Z. 3D City Models Based Spatial Analysis to Urban Design. *Geographic Information Sciences*. 2004. Vol. 10(1). P. 82-86.
214. Xiao Y., Wang C., Li J. [and other]. Building segmentation and modeling from airborne LiDAR data. *International Journal of Digital Earth*. 2014. Vol. 8. P. 694-709.
215. Xu B., Jiang W., Shan J. [and other]. Investigation on the Weighted RANSAC Approaches for Building Roof Plane Segmentation from LiDAR Point Clouds. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8(1). P. 5.

216. Yang P., Putra S. Y., Li W. Impacts of density and typology on design strategies and visual quality of urban environment. Proceedings of *Map Asia 2005 Conference* (Jakarta, Indonesia, 22-25 August 2005). Jakarta, 2005. P. 331-338.

217. Zhang Y. Linking the public with landscape preservation: public perception of a traditional urban landscape: a case study from Suzhou, China. Freiburg im Breisgau, 2017. 182 p.

ДОДАТКИ

СПИСОК

наукових публікацій здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 103 – «Науки про Землю»

кафедри соціально-економічної географії і регіоназнавства імені Костянтина Немця, Серьогіна Дениса Сергійовича, які висвітлюють наукові результати дисертації на тему «Геоінформаційне моделювання та аналіз регіональних сегментів глобального урбанізованого простору (на прикладах різнорангових міст)»

Публікації у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України:

1. Костріков С. Серьогін. Д., Бережний В. Візуальний аналіз урбаністичного середовища як складова урбогеосистемного підходу. *Часопис соціально-економічної географії*. 2021. Вип.30(1). С. 7-23.

DOI: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/socecongeo/article/view/17764/16278>

Особистий внесок Серьогіна Д.: опис процедур розрахунку півсфери видимості у середовищі веб-ГІС ELiT, підготовка ілюстративних матеріалів, підготовка даних та виконання візуалізації півсфери видимості для міст Монреаль та Мюнстер.

Особистий внесок Кострікова С.: аналіз попередніх досліджень, визначення та обґрунтування концепції півсфери видимості, опис формалізації видимості у 3D-просторі через концепцію півсфери видимості, визначення ролі концепції півсфери видимості в урбогеосистемному підході.

Особистий внесок Бережного В.: опис процедур розрахунків візуальних параметрів на підставі півсфери видимості, опис окремих процедур розрахунку півсфери видимості на базі веб-ГІС застосування, опис прикладних аспектів застосування функціональності аналізу видимості.

2. Серьогін Д.С., Костріков С.В. Просторова оцінка енергоспоживання забудов на підставі тривимірного моделювання міського середовища. *Часопис соціально-економічної географії*. 2023. Вип. 34. С. 27-41.

DOI: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-01>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/socecongeo/article/view/23538/21460>

Особистий внесок Серьогіна Д.С.: опис 3D-просторового підходу до диференційованої оцінки енергоспоживання міськими забудовами, проведення урбогеосистемного аналізу результатів просторової оцінки енергоспоживання.

Особистий внесок Кострікова С.В.: аналіз попередніх досліджень, підготовка розділу про низькополігональне моделювання будівель для розрахунку енергоспоживання, виведення формул для розрахунку енергоспоживання забудов.

Публікації у наукових фахових виданнях України, які входять до Web of science:

3. **Серьогін Д.С.** Принципи обробки та тривимірного моделювання через лідарні дані для прикладних досліджень міського середовища. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2022. Вип. 57. С. 218-233 (**Web of Science**).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-17>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/21385/19956>

4. **Серьогін Д.С., Костріков С.В.** До питання виокремлення урбаністичних геоситуацій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2022. Вип. 58. С. 241-256 (**Web of Science**).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-19>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/22204/20544>

Особистий внесок Серьогіна Д.С.: визначення та обґрунтування властивостей урбаністичних геоситуацій, підготовка ілюстративних матеріалів та їх аналіз, викладення прикладних аспектів виокремлення урбаністичних геоситуацій, обґрунтування застосування лідарних даних та ГІС для дослідження патернів урбаністичних геоситуацій.

Особистий внесок Кострікова С.В.: підготовка вступної частини статті, огляд і аналіз попередніх досліджень, обґрунтування предметного контенту урбаністичної геоситуації, пояснення компаративного аналізу геоситуаційних патернів, опис окремих аспектів виокремлення геоситуацій через VA-функціональність.

5. Kostrikov S., Kravchenko K., **Serohin D.**, Bilianska S., Savchenko A. 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"*. 2023. Vol. 59. P. 140-169 (**Web of Science**).

DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-11>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/23202/21243>

Особистий внесок Серьогіна Д.: опис методики побудови цифрового міста у ГІС на підставі даних з OpenStreetMap, обґрунтування використання

лідарних даних у проекті Цифрове місто, виокремлення урбаністичних геоситуацій у проекті Цифрове місто.

Особистий внесок Кострікова С.: обґрунтування наукової проблеми, визначення та обґрунтування урбогеосистемного підходу для забезпечення реалізації проектів «Цифрове місто», опис методик обробки лідарних даних для побудови тривимірних моделей до проекту «Цифрове місто»

Особистий внесок Кравченко К.: огляд та аналіз попередніх досліджень, підготовка геопросторових даних для побудови проектів «Цифрове місто» для міст Харків та Дніпро, аналіз результатів ГІС-аналізу за побудованими картами.

Особистий внесок Білянської С.: формування проекту «Цифрове місто» для м. Харків, обґрунтування проведення геомаркетингового дослідження на підставі проекту «Цифрове місто», побудова карт м. Харкова та їх аналіз.

Особистий внесок Савченко А.: формування проекту «Цифрове місто» для м. Дніпро, визначення особливостей аналізу забезпеченості міського населення мережами громадського транспорту у проекті «Цифрове місто», побудова карт м. Дніпро та їх аналіз.

Публікації у наукових виданнях інших держав:

6. Kostrikov S., Seryogin D. Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. *Urban Agglomeration* / Edited by A. Battisti and S. Baiani. INTECH Open, 2022. P. 251-273.

DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.102482>

URL: <https://www.intechopen.com/chapters/80383>

Особистий внесок Серьогіна Д.: підготовка даних та виконання розрахунків для тривимірної візуалізації результатів оцінки чисельності населення, опис особливостей обробки та аналізу та моделювання даних лідарної зйомки.

Особистий внесок Кострікова С.: обґрунтування наукової проблеми, викладення та пояснення концепції урбогеосистем, опис функціональності веб-ГІС застосунку для впровадження урбогеосистемного підходу, опис методики виконання оцінки чисельності населення за даними лідарної зйомки.

Наукові публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Серьогін Д.С. Костріков С.В. Особливості та переваги ГІС-моделювання міського середовища на підставі лідарної інформації. *Регіон – 2020: стратегія оптимального розвитку: матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків, 8-9 жовтня 2020 р.). Харків, 2020. С. 34-36

8. **Серьогін Д.С.** «Юз-кейси» як предметні впровадження результатів, отриманих через обробку лідарних даних у середовищі ELiT. *Регіон-2021: Суспільно-географічні аспекти*: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців (м. Харків, 15 квітня 2021 р.). Харків, 2021. С. 45-48.

9. **Serohin D.S.** Features and advantages of the urban environment GIS-modeling based on LiDAR information. *Proceedings of Academic and scientific challenges of diverse fields of knowledge in the 21st century* (Kharkiv, 12 March, 2021). Kharkiv, 2021. P. 273-279.

10. **Серьогін Д.С.** ГІС-моделювання та тривимірна візуалізація міської забудови в середовищі веб-ГІС порталу Mapbox. *Регіон – 2021: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 21 жовтня 2021 р.). Харків, 2021. С. 157-159.

11. **Серьогін Д.С., Костріков С.В.** Виокремлення урбаністичних геоситуацій в міському середовищі. *Сьомі Сумські наукові географічні читання*: збірник матеріалів Всеукраїнської наукової конференції (м. Суми, 14-16 жовтня 2022 р.). Суми, 2022. С. 129-133.

12. Костріков С.В., **Серьогін Д.С.** Візуальний аналіз міського середовища для підтримки прийняття рішень у муніципальному менеджменті. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "*Міста та регіони в епіцентрі просторових змін*" (м. Київ, 24-25 листопада 2022 р.). Київ, 2023. С. 42-43.

13. **Серьогін Д.С., Костріков С.В.** Переваги лідарних даних для відстеження та оцінки руйнувань міської забудови під час воєнних дій. *Регіон – 2022: стратегія оптимального розвитку*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 24 листопада 2022 р.). Харків, 2022. С. 180-184

14. Костріков С.В., **Серьогін Д.С.** Відтворення топографічної поверхні урбанізованих територій на підставі геообробки лідарних даних // Матеріали доповідей XIII науково-практичного семінару за міжнародної участі "*Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат та прилеглих територій*" (м. Львів, 2–3 березня 2023 р.). Львів, 2023, С. 72-77.

15. **Серьогін Д.С., Костріков С.В.** Моделювання урбаністичного середовища через обробку лідарних даних для оцінки воєнного імпаку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «*Геофорум-2023*» (Львів-Брюховичі, 19-21 квітня 2023 р.). Львів, 2022. С. 43-47.

16. Симоненко І.В., Костріков С.В., **Серьогін Д.С.** Суспільно-географічний ландшафт як один із способів подання міського довкілля //

Реґіон – 2023: суспільно-географічні аспекти: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 20 квітня 2023 р.). Харків, 2023. С. 54-56.

17. **Серьогін Д.С., Білянська С.М.** Застосування оцінки чисельності населення у житлових будівлях на основі лідарних даних з метою геомаркетингового аналізу міської території. *Реґіон-2023: стратегія оптимального розвитку: Матеріали міжнародної науково–практичної конференції (м. Харків 20 жовтня 2023 р).* Харків, 2023. С. 140-143.

Довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження



ХАРКІВСЬКА ОБЛАСНА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ

ДЕПАРТАМЕНТ ЕКОНОМІКИ І МІЖНАРОДНИХ ВІДНОСИН

майдан Свободи 5, Держпром, 3 під., 8 пов., м. Харків, 61022, тел.: (057) 705-10-17, факс: 705-10-29
e-mail: uek@kharkivoda.gov.ua, код ЄДРПОУ 38157940

04.05.2024

№ 06.01-14/1512

на №

від

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження аспіранта
Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна
СЕРЬОГІНА Дениса Сергійовича
на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 103 Науки про Землю

Результати дисертаційного дослідження СЕРЬОГІНА Дениса Сергійовича за темою: «Геоінформаційне моделювання та аналіз регіональних сегментів глобального урбанізованого простору (на прикладах різнорангових міст)», а саме – рекомендації щодо просторового аналізу території міста Харкова на підставі ГІС-аналізу та моделювання даних лідарної зйомки можуть бути впроваджені Департаментом економіки і міжнародних відносин Харківської обласної військової адміністрації при розробці програм та стратегій з відбудови та розвитку міст, районів і громад Харківської області, які зазнали масових пошкоджень та руйнувань.

Директор Департаменту



Іван ДУДКА



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, тел. +38 057 706-13-54, +38 057 707-52-31, факс +38 057 705-02-41
E-mail: univer@karazin.ua, сайт: www.univer.kharkov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 02071205

08.04.2024 № 0201/44
на № _____

ДОВІДКА

Про впровадження результатів дисертаційного дослідження

СЕРЬОГІНА Дениса Сергійовича

Результати дисертаційного дослідження Серьогіна Дениса Сергійовича за темою «Геоінформаційне моделювання та аналіз регіональних сегментів глобального урбанізованого простору (на прикладах різнорангових міст)» були використані для виконання науково-дослідницької роботи: «**Великий Харків обґрунтування та теоретико-методологічна основа дослідження сучасних процесів агломерації**» (державний реєстраційний номер 0121U113116) на кафедрі соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Немця Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна при аналізі передумов розвитку та формування Харківської міської агломерації, при аналізі поточних проблем у функціонуванні Харківської агломерації, зокрема її ядра – міста Харкова, у розрізі геоурбаністики.

Проректор з науково-педагогічної роботи
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Антон ПАНТЕЛЕЙМОНОВ

000000

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи

Харківського національного університету

імені В. Н. Каразіна



Олександр ГОЛОВКО

про впровадження результатів дисертаційного дослідження на здобуття ступеня доктора філософії Серьогіна Дениса Сергійовича за темою *«Геоінформаційне моделювання та аналіз регіональних сегментів глобального урбанізованого простору (на прикладах різнорангових міст)»* у навчальні курси на факультеті геології, географії, рекреації і туризму Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Комісія у складі: декана факультету геології, географії, рекреації і туризму, доктора географічних наук, професора, Пересадько В. А., завідувача кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Немця, доктора географічних наук, професора, Немець Л. М., кандидата географічних наук, професора, Жемерова О. О. встановила, що результати дисертаційного дослідження Серьогіна Д. С., а саме: теоретико-методичні основи урбаністичних досліджень в суспільній географії, ГІС-моделювання міського середовища через обробку даних лідарної зйомки, просторовий аналіз щільності міської забудови за патернами урбаністичних геоситуацій, оцінка чисельності міського населення та рівня міського енергоспоживання по геометрії забудов, аналіз видимості у міському середовищі за допомогою півсферичного підходу впроваджені в навчальний процес факультету геології, географії, рекреації і туризму у рамках курсів:

- *«Інформатика з основами геоінформатики»* для студентів 2-го курсу першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 106 Географія;
- *«Географічні інформаційні системи»* для студентів 3-го курсу першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальностей 106 Географія та 014.07 Середня освіта (Географія);
- *«Урбаністична географія»* для студентів 4-го курсу першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальностей 106 Географія та 014.07 Середня освіта (Географія).

Завідувач кафедри
соціально-економічної географії і
регіонознавства
імені Костянтина Немця,
д. геогр. н., професор

Людмила НЕМЕЦЬ

Декан факультету геології, географії,
рекреації і туризму
д. геогр. н., професор

Віліна ПЕРЕСАДЬКО

Голова методичної комісії,
к. геогр. н., професор

Олександр ЖЕМЕРОВ



НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
РЕГІОНАЛЬНОГО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ
Громадська організація ЄДРПОУ 42932350 E-mail: ndirer@ukr.net

04.04.2024 р. № 6/1

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційного дослідження
СЕРЬОГІНА Дениса Сергійовича

Результати дисертаційного дослідження Серьогіна Дениса Сергійовича за темою: «Геоінформаційне моделювання та аналіз регіональних сегментів глобального урбанізованого простору (на прикладах різнорангових міст)», а саме наведена у роботі методологія суспільно-географічного дослідження міст на підставі даних дистанційного зондування Землі через засоби геоінформаційних систем, а також рекомендації щодо використання даних лідарної зйомки та ГІС-інструментів стосовно поточної геоситуації у м. Харків були визнані корисними та будуть впроваджені ГО «Науково-дослідний інститут регіонального економічного розвитку» при розробці стратегій повоєнного відновлення українських міст від наслідків російської збройної агресії.

Голова громадської організації
«Науково-дослідний інститут
регіонального економічного розвитку»
к.геогр.н., доцент



Олександр НОСИРСЬВ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 09:50:31 17.06.2024

Назва файлу з підписом: Serohin_diss.pdf
Розмір файлу з підписом: 14.9 МБ

Назва файлу без підпису: Serohin_diss.verified.pdf
Розмір файлу без підпису: 14.9 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: СЕРЬОГІН ДЕНИС СЕРГІЙОВИЧ

П.І.Б.: СЕРЬОГІН ДЕНИС СЕРГІЙОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 3535409656

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 12:00:01
14.06.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000003EF6801A26A2605

Тип носія особистого ключа: Незахищений

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підписаний PDF-файл (PAdES)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (PAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2024.05.30 13:00