

<https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-36-01>
УДК 004.9+004.451+911.3+338.23

Надійшла 15 березня 2024 р.
Прийнята 28 квітня 2024 р.

Сергій Костріков

д. геогр. н., професор кафедри соціально-економічної географії і регіоназнавства імені Костянтина Немця,
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
e-mail: sergiy.kostrikov@karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4236-8474>

Денис Серьогін

аспірант кафедри соціально-економічної географії і регіоназнавства імені Костянтина Немця,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
e-mail: denys.serohin@student.karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0169-4468>

ЛОКАЛІЗОВАНИЙ УРБОГЕОСИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЧЕРЕЗ ЛІДАРНІ ДАНІ ДЛЯ ФОРМАЛІЗОВАНОЇ ОЦІНКИ ЧИСЕЛЬНОСТІ МІСЬКОГО НАСЕЛЕННЯ

У статті робиться наголос на подальшому розгляді потенціалу урбогеосистемного підходу в аспекті суспільно-географічних досліджень через поєднане застосування ГІС-засобів та результатів міського дистанційного лазерного (лідарного) сканування. Дотепер попри визначення урбогеосистем (УГС), як окремих географічних сутностей, що об'єктивно існують у визначеному геопросторі міста, ми ще не розглядали такий аспект, як оцінку однієї з їх ключових характеристик – просторового розподілу чисельності міського населення.

Актуальність міських досліджень вимагає новітніх методів для оцінки кількості населення, які можуть бути засновані на геометрії забудов та архітектурній морфології міста. Виходячи із цього, метою статті є подання локалізованого урбогеосистемного аналізу (ЛУГА), який впроваджується у найкрупнішому масштабі геопростору даної УГС й включає в себе використання площеметричних (ПММ) та об'ємометричних методів (ОММ) для розрахунку чисельності мешканців у міських будівлях й, таким чином – у певному осередку урбанізованого геопростору. Останній можна вважати найменшою структурною одиницею детально-сітчастого подання цифрового урбаністичного середовища (УС).

Весь предметний зміст цього дослідження відповідає одному з основних постулатів урбогеосистемного аналізу, згідно якого відбувається формалізація УГС-атрибутивних характеристик у різних геолокаціях УС – формалізованої моделі міського довкілля. Розглядаються наявні теоретичні передумови ЛУГА. Відповідно досвіду попередніх досліджень пропонується тезовий опис трьох альтернативних методик оцінки розподілу міського населення, що засновані на парадигмі «ДДЗ ↔ ГІС». Щодо методики М1 ЛУГА, яка є подальшим розвитком «мікропросторового ГІС-аналізу», та двох її параметричних методів (ПММ та ОММ) робиться детальний опис їх операційної послідовності та формалізованого апарату. Наводиться блок-схема покрокової реалізації обох методів з детальним поясненням кожного з етапів. Представлений приклад реалізації ЛУГА щодо користувацького сценарію оцінки розподілу міського населення по агломерації м. Бостон (штат Массачусетс, США). Наведені ілюстрації зразків інтерфейсу Хмарної ГІС-платформи.

Ключові слова: оцінка розподілу міського населення, локалізований урбогеосистемний аналіз, лідарні дані, хмарна ГІС-платформа, тривимірний сцена, урбаністичне середовище.

Як цитувати: Костріков, С., Серьогін, Д. (2024). Локалізований урбогеосистемний аналіз через лідарні дані для формалізованої оцінки чисельності міського населення. *Часопис соціально-економічної географії*, 36, 7-25. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-36-01>

In cites: Kostrikov, S., Serohin, D. (2024). Localized urbogeosystemic analysis through LiDAR data for formalized urban population estimation. *Human Geography Journal*, 36, 7-25 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-36-01>

Наукова проблема та її попередні дослідження. У ряді наших попередніх робіт ми вже розглядали потенціал урбогеосистемного підходу в контексті суспільної географії, який реалізується через використання геоінформаційних систем та обробку даних дистанційного зондування, включаючи первинні та вторинні дані, отримані з досліджень на підставі лідарних зйомок [1-6]. У цих роботах урбогеосистеми представлені як функціонально цілісні сутності, до яких можуть бути застосовані результати обробки

даних дистанційного зондування, зокрема міського лазерного сканування (лідарної зйомки) для виявлення та аналізу характеристик довкілля міста, його просторових патернів та суспільно-географічних параметрів. Проте, попри визначення урбогеосистем (УГС), як окремих географічних сутностей, що об'єктивно існують у визначеному геопросторі міста [1, 2], їх значення для концепції “Розумного Міста” [3] та для оцінки видимості в міському середовищі, а саме – візуального аналізу урбогеосистеми [7],

ми ще не розглядали такий предметний аспект, як оцінку найважливішої атрибутивної характеристики УГС – просторовий розподіл чисельності міського населення. Для отримання вказаного атрибуту урбогеосистеми вкрай необхідним є наявність надійного джерела первинних даних, які б з високою точністю описували морфологію і геометрію архітектурної забудови даної урбанізованої території. Відповідно думки деяких фахівців, яку ми повністю поділяємо, подібному критерію не тільки в урбаністичних, але й в інвайронментальних дослідженнях, взагалі, можуть задовольняти лише *лідарні дані* – результати дистанційного лазерного сканування земної поверхні ландшафту й соціуму [8-11].

Відомо, що *LIDAR* (англ. *Light Detection and Ranging*) – це технологія отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища відображення світла та його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах. *LiDAR* як прилад є, як мінімум, активним далекоміром оптичного діапазону. Скануючі лідари в системах машинного зору формують двовимірну або тривимірну картину навколишнього простору, що вдало корегується із можливостями ГІС-платформ надавати тривимірну візуалізацію у вигляді так званої *3D-Сцени* [12-14].

Лідарна зйомка та подальший аналіз її результатів стали дієвою альтернативою супутниковим знімкам різних діапазонів та аерофотозйомці у варіативних предметних дослідженнях урбанізованих територій саме за останні два-три десятиріччя [15-19]. Враховуючи вказане, доцільно стверджувати, що головне місце в наших предметних дослідженнях із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення для обробки *LiDAR*-даних і відповідної геоінформаційної (ГІС) платформи має займати *інтеграція різноманітних даних* із наступною візуалізацією проміжних або кінцевих результатів їх обробки. Так у предметній галузі аналізу міського середовища і визначення морфології / динаміки архітектурних змін певного міста дуже важливим для досягнення результатів є визначення так званих патернів (певних класів) просторового розповсюдження різноманітних архітектурних форм та міської інфраструктури. А у цьому відношенні зрозуміло, що великі обсяги як первинних, так і похідних даних без застосування засобів геоінформаційного аналізу і просторового моделювання важко обробляти та майже неможливо ефективно аналізувати.

Таким чином, актуальність міських досліджень вимагає розширення горизонтів та застосування нових методів для оцінки кількості населення, які можуть бути засновані зокрема на вже вказаних вище *геометрії забудов та архітектурній морфології міста*. Виходячи із цього, **ціллю** цієї статті є подання *локалізованого урбогеосистемного аналізу* (ЛЮ-ГА), що має впроваджуватися, як правило, у великомасштабному зрізі, тобто – у найкрупнішому масштабі геопростору даної УГС. Цей зріз охоплює, як правило, незначну територію, й включає в себе використання *площаметричних* (ПММ) та *об'ємометричних* методів (ОММ) для розрахунку

чисельності мешканців у міських будівлях й, таким чином – у певному осередку урбанізованого геопростору. Останній можна вважати найменшою структурною одиницею детально-сітчастого подання цифрового урбаністичного середовища. Локалізований урбогеосистемний аналіз дозволить не лише більш-менш точно оцінювати кількість міського населення, але й забезпечувати глибше розуміння структури аналогового (фізичного) міського довкілля та його динаміки, оскільки чисельність мешканців певної міської локації є складовою як одного, так й іншого.

Розглядаючи місто як складну урбогеосистему, ми прагнемо визначити, як архітектурна форма та просторова конфігурація впливають на розподіл населення. Використання геометричних параметрів забудови, таких як площа її основи та об'єм будівель, дозволяє нам розробити кількісні формалізовані моделі, які через використання на цифрових платформах можуть слугувати основою для планування та розвитку міських територій. Такий підхід відкриває нові перспективи для розуміння міської динаміки та взаємодії між архітектурою та соціальними процесами в місті. Він також має сприяти розробці стратегій для створення більш гармонійних та функціональних міських просторів, що відповідають потребам їх мешканців.

Також треба окремо підкреслити, що у відповідь на швидке зростання міст, ефективне управління міськими процесами вимагає швидкого й частого оновлення інформації про всі аспекти міського життя. Якщо ця потреба не задовольняється, дані швидко застарівають, що може призвести до невірних аналітичних висновків та рішень у критичних управлінських ситуаціях. Традиційні методи збору даних, такі як перепис населення, який проводиться кожні 5-10 років у розвинених країнах, є очевидно недостатньо оперативними для сучасних динамічних міських середовищ. Хоча ці методи забезпечують точність і глибину демографічної інформації, включаючи стать, вік, національність, та склад сім'ї, процес їх збору та обробки є вочевидь складним і часвитратним. Відповідно до цього, а також з огляду на стрімкий прогрес у сфері інформаційних технологій, національні агентства та міжнародні організації все частіше вдаються до інноваційних методологічних та технологічних рішень. Ці нововведення спрямовані на автоматизацію оцінки чисельності населення та їх інтеграцію в комплексні системи моніторингу міста та прийняття рішень. Приклад однієї з таких можливих систем вже наводився в одній із наших попередніх публікацій [20].

Викладення основного матеріалу. Деякі аспекти теоретичного підґрунтя локалізованого урбогеосистемного аналізу. Незважаючи на вказане у попередній рубриці статті втілення загальних інформаційно-цифрових технологій у процедури оцінки чисельності населення, ГІС-технології в оцінці населення, які використовують розширені дані, включаючи зйомку за допомогою дистанційного зондування та інтеграцію результатів в ГІС-платформи, виявляються ще більш ефективними [21,

22]. Такі підходи дозволяють, наприклад, встановити кореляцію між геопросторовими характеристиками та чисельністю населення. Оновлені дані з дистанційного зондування надають інформацію про типи земельних ділянок, щільність житлової забудови та параметри будівель, що допомагає точно визначити розподіл населення по місту. Застосування, наприклад, спеціалізованих геостатистичних методів дозволяє розрахувати приблизну кількість населення в конкретних районах даного міста, що точно відповідає просторовому критерію застосування ЛУГА-підходу.

Ми робимо наступні ключові посилання і обговорення не у оглядовій рубриці статті, а тут – при викладенні основного матеріалу, оскільки вони також є теоретичним підґрунтям даного дослідницького контенту.

Динаміка чисельності населення урбанізованих територій – один з найбільш затребуваних різнорівневими муніципальними властями показників. Однак для оцінки цієї характеристики навіть у розвинених країнах історично використовувалися лише традиційні методи переписних ділянок. Лише в останні приблизно три-чотири десятиріччя різні національні агентства і міжнародні організації стали використовувати варіативні методологічно-технологічні інновації для оновлення показників переписних ділянок і корекції чисельності населення протягом певного періоду між двома переписними датами. У публікації, яка на думку багатьох фахівців започаткувала таку опосередковану оцінку, мова йде про дві основні коригуючі методики [23]: 1) двокомпонентний аналіз (Component II) – використання існуючих статистичних показників народжуваності та смертності між двома переписними реперними даними; 2) кореляційно-регресійний аналіз, який встановлює зміни в чисельності населення всередині періоду між двома переписами щодо змін його (населення) відносних індикаторів (кількості учнів, що пішли до шкіл, кількості виборців, кількості дозволів на забудову, кількості виданих водійських прав, кількості зареєстрованих платників податків).

Однак, безпосередніми концептуальними попередниками локалізованого урбогеосистемного аналізу, на нашу думку, доцільно вважати низку методів оцінки чисельності населення на обмежених міських територіях через залучення комбінованих лідарних та супутникових даних [22], та певною мірою альтернативний підхід, який його автори визначають як «мікропросторовий аналіз» (МПА), маючи на увазі оцінку в межах «урбанізованого мікропростору» [24]. Незважаючи на те, що формалізований апарат ЛУГА щодо впровадження площеметричного та об'єметричного методів оцінки чисельності населення будувався нами через редагування загальних формул МПА, тут вважаємо необхідним детальніше розглянути саме підхід із [22]. Цей підхід є тим сталим комплексним рішенням залучення ДДЗ та програмного забезпечення ГІС, яке можна зіставити для порівняння або впроваджувати паралельно з застосуванням локалізованого урбогеосистемного аналізу. Загальна методична діаграма (блок-схема) вказаного комплексного рішення із [22] наводиться на наступ-

ній ілюстрації (рис. 1).

Дана блок-схема загалом описує процедуру оцінки чисельності міського населення за допомогою даних дистанційного зондування та лідарних даних.

Процес починається з розгляду трьох основних джерел даних: зображень *Landsat TM*, даних *LIDAR* та даних про житлові та комерційні ділянки відповідно певному перепису населення (2000 р.). Ці дані обробляються для отримання класів житлових будівель, будівель, отриманих через обробку даних *LIDAR*, та визначення житлових та комерційних будівель. «Нежитлові» чарунки-пікселі видаляються з карти *nDSM* (*a normalized digital surface model* – англ.) – карти нормалізованої цифрової моделі місцевості (НЦММ). Сама НЦММ, побудована через лідарні дані, безпосередньо застосовується для виокремлення площ основ будівель (*footprint* – англ.) і моделей відповідних тривимірних об'єктів, за якими можна отримувати їх об'єми. Виділяються окремі будівлі у вибірково-кварталах даної міської території. Потім створюється вже остаточна карта *nDSM* (як різниця між Цифровою Моделлю Рельєфу – ЦМР та Цифровою Моделлю Місцевості – ЦММ) для оцінки кількості населення після застосування зональної статистики у вибірково-кварталах. Дані по квартальним полігонам перетворюються в точки центроїдів та просторово об'єднуються; розраховується кількість будівель у кожному переписному кварталі, площа будівель та їх об'єм також у кожному переписному кварталі.

Ключовим змістом даної методики, яку, що вже підкреслювалося вище, ми приймаємо однією із теоретичних підстав ЛУГА, можна вважати побудову моделей звичайного методу найменших квадратів (*ordinary least squares* – *OLS* – англ.) і регресійних моделей з вагами за геолокацією (*GWR* – *geographically weighted regression*). Модель *GWR*, яка, у свою чергу, може прийматися окремим теоретичним підґрунтям ЛУГА – відома в географічному моделюванні сутність, запропонована приблизно 15 років тому [25]. Головне положення методики *GWR*: в будь-якій точці в межах певного екстену географічного простору залежна змінна (населення) може бути визначена через від одну до трьох незалежних змінних (наприклад, кількість домівок, площі їх основ, їх об'єми), емпіричні значення яких були встановлені для вказаного екстену через безпосередні вимірювання у реперних точках. Це цілком відповідає одному з основних постулатів урбогеосистемного аналізу, згідно якого відбувається формалізація описових (атрибутивних) характеристик у різних геолокаціях урбаністичного середовища – формалізованої моделі міського довкілля [7, 26].

Населення по даній території у «підході ДДЗ/ГІС», на який ми посилаємося [22], оцінювалося за трьома модельними параметрами: 1) чисельність населення в зіставленні з числом будівель; 2) чисельність населення в співставленні з площею, займаною будівлями; 3) чисельність населення в співставленні з об'ємом будівель на цій території. Ці параметри були задіяні у наступній оціночній послідовності блок-схеми із [22] (рис. 1), яку узагальнено можна

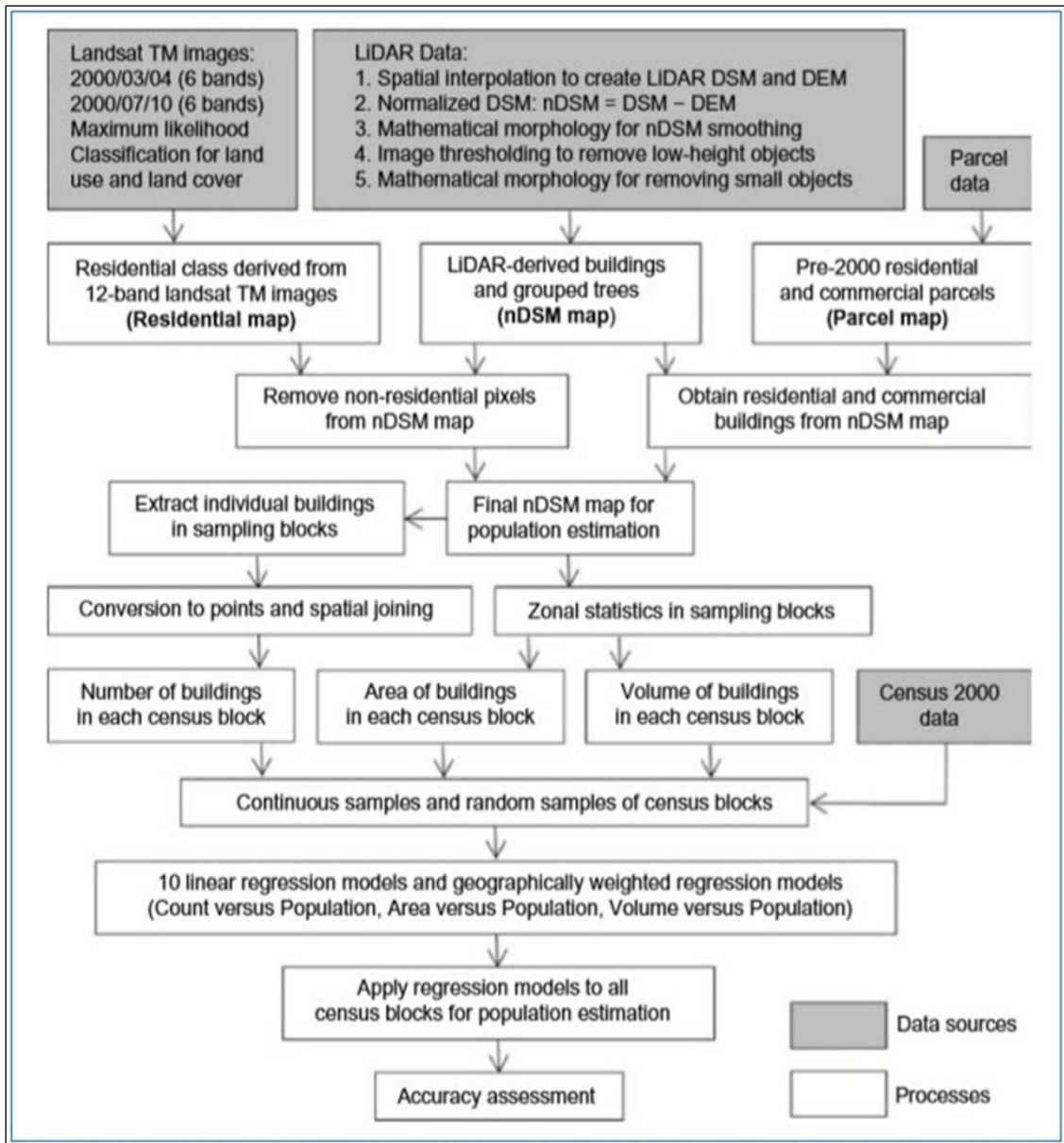


Рис. 1. Загальна методична діаграма (блок-схема) комплексного рішення щодо оцінки чисельності міського населення на підставі геометрії забудов через залучення комбінованих ДДЗ та ГІС-платформи [22, с. 5577]
Fig. 1. General flowchart of urban population estimation through building geometry using combined remote sensing data and GIS-platform [22, p. 5577]

описати наступними кроками з наголосом саме на той сегмент блок-схеми, який актуалізує роботу з ДДЗ [22, с. 5577]:

1. **Зображення Landsat TM:**

- Дати зображень: 2000/03/04 (6 каналів), 2000/07/10 (6 каналів).
- Класифікація за методом максимальної правдоподібності стосовно типу підстильного ландшафту та типу землекористування.

2. **Дані LIDAR:**

- Просторова інтерполяція для створення DSM (ЦММ) та DEM (ЦМР) через дані LIDAR.
- Нормалізована DSM (НЦММ) = $DSM - DEM$.
- Математична морфологія для згладжування nDSM.

- Порогова обробка зображень для видалення об'єктів з низькою відносною висотою.
- Застосування математичної морфології для видалення малих об'єктів.
- 3. **Віокремлення класу житлових будівель,** отриманого з 12-канальних зображень Landsat TM (Карта житлових будівель).
- 4. **Будівлі, отримані з даних LIDAR, та згруповані дерева** (Карта nDSM).
- 5. **Дані про житлові та комерційні ділянки** до перепису 2000 року (Карта ділянок).
- 6. **Видалення “нежитлових” пікселів** з карти nDSM.
- 7. **Отримання житлових та комерційних будівель** з карти nDSM.
- 8. **Виділення окремих будівель у вибіркових**

переписних кварталах.

9. **Впровадження 10 моделей лінійної регресії та GWR-моделей** за наступними параметричними парами (*Кількість будівель проти Населення, Площі основ проти Населення, Об'єми будівель проти Населення*).
10. **Застосування обох типів регресійних моделей** по переписних кварталах для оцінки кількості населення.
11. **Оцінка точності моделей**, що розраховують кількість населення за **площами основ та об'ємами будівель**.

Ця блок-схема є таким саме комплексним підходом до оцінки чисельності міського населення, який інтегрує різні джерела даних та аналітичні методи для створення точної моделі розподілу населення в міських районах, яким є ЛУГА. Відмінність між цими двома підходами полягає у наступному:

- локалізований урбогеосистемний аналіз приймає на **Кроці 1** в якості ключового джерела первинних даних не супутникові знімки, а результати лідарної зйомки з літаків (*Airborne LiDAR* – англ.) – так звані *ALS*-дані;

- на **Кроці 2** замість застосування «лідарних даних взагалі» передбачається обробка виключно результатів зйомки з БПЛА та з наземних платформ – так звані *MLS*-дані;

- також на **Кроці 2** замість виокремлення моделей споруд лише по єдиному континуальному об'єкту – поверхні ЛУГА звертається до сталої ієрархічної модельної конструкції, якою є урбаністичне середовище з усією його безліччю дискретних ГІС-об'єктів;

- на кроках ЛУГА, які можна вважати аналогами **Кроків 3-9** підходу, на який ми посилаємося, впроваджується надскладне *низькополігональне* та *високополігональне* моделювання, яке геть чисто відсутнє за методикою із [22];

- ЛУГА забезпечує відповідно до **Кроку 11** не лише строгу оцінку точності моделей засобами як настільного, так і веб-додатку, але й високоякісну візуалізацію методами комп'ютерної графіки, про яку у вказаному аналогічному підході взагалі не йдеться;

- як не йдеться про впровадження ГІС-функціональності *Data Interoperability*, що впроваджує ЛУГА, для експорту результатів у повноформатну ГІС-платформу.

Локалізований урбогеосистемний аналіз впроваджується у певному сегменті того окремого екстену географічного простору міського довкілля, у якому функціонує інтернальна урбогеосистема [5, 7, 20]. Це – ті самі великомасштабний зріз й мікрорівень УГС, про які йшлося у вступі до нашої статті. У вказаному сегменті зведена до мінімуму просторова варіація між ГІС-об'єктами й, таким чином, однією з основних характеристик *арени впровадження ЛУГА* є так звана *просторова гомогенність* між ГІС-об'єктами, які складають урбаністичне середовище – цифрову модель фізичного міського довкілля. Об'єктивними показниками або гомогенності, або гетерогенності даного осередку геопростору можуть бути лише атрибутивні характеристики цих об'єктів

[27, 28]. ЛУГА, зокрема, ґрунтується на існуючих принципах взаємодії просторових гомогенності та гетерогенності серед атрибутивних характеристик ГІС-об'єктів. Таким ключовим положенням, що можна приймати за замовченням, є те, що в даному осередку геопростору міське населення залишиться єдиною атрибутивною характеристикою, розподіл якої є гетерогенним у той час, коли усі схожі атрибути нівелюються до стану просторової гомогенності.

Безпосередньо первинні ГІС-дані для ЛУГА, які стосуються даного міського населення, можуть асоціюватися з: 1) переписними ділянками, 2) територіями, підпорядкованими муніципалітетам (міським радам), 3) територіями, підпорядкованими префектурам. Відповідність первинних інформаційних джерел подібним одиницям адміністративного розподілу зазвичай притаманна предметним дослідженням розподілу населення через ГІС / ДДЗ [29].

Загалом двома основними завданнями ЛУГА при модельному розрахунку чисельності населення на підставі архітектурної морфології міста, побудованої по результатах лідарної зйомки, можуть бути:

- наочна картографічна візуалізація для осіб, які приймають рішення, просторового розподілу щільності міського населення, через інструменти стандартної ГІС-візуалізації (наприклад, через карти хороплет);

- отримання похідних кількісних характеристик розподілу населення для подальшої розробки комплексних аналітичних моделей відповідними фахівцями.

Методологічні основи, наявні і перспективні методичні рішення в рамках ЛУГА. Місце моделювання на основі лідарних даних у методологічній послідовності ЛУГА. Створення модельного урбаністичного середовища (УС) і розрахунок архітектурної морфології в даному екстені геопростору на підставі лідарних даних є вступом до загальної методологічної послідовності ЛУГА.

Процедура моделювання УС розпочинається з класифікації на основі *LiDAR*-даних. На цьому кроці окремі квазидискретні об'єкти зі схожими значеннями (обраними за певними критеріями) виокремлюються із хмари лідарних точок, об'єднуються та відносяться до певного класу ГІС-об'єктів. Перш за все, авторське програмне забезпечення, будь-то або наше настільне застосування [1], або хмарна платформа [30], приписує точки до ключових класів об'єктів, що складають УС. Це – *ground* (поверхня – рельєф місцевості), *vegetation* (рослинність), та *buildings* (збудови). Після цього здійснюється тематичне картографування для наочної візуалізації результатів класифікації. Кожен клас *LiDAR*-точок розміщується в окремий шар даних для подальшого аналізу та виокремлення дискретних об'єктів.

Завдяки впровадженню алгоритмів класифікації «точкових хмар», визначенню підстильної поверхні та виокремленню штучних та природних об'єктів перш за все можливо здійснювати безперервний моніторинг стану та змін у міському середовищі. Що може бути особливо корисно для муніципального менеджменту урбанізованих площ, включаючи території великих міст. Оцінка чисельності населення у

цьому відношенні може бути лише певним частковим рішенням. Для рішення вказаних задач встановлені архітектурна морфологія та динаміка міста формалізуються через відповідні записи до бази даних спеціалізованого програмного забезпечення, а наочна візуалізація забудов подається у Вікні 3D Сцени настільного додатку [5], або у веб-інтерфейсі хмарної платформи [2, 30]. Після проведення геообробки, просторового аналізу та настільної або веб-візуалізації, доцільно організувати багатокористувачський доступ до інформації про поточний стан міського середовища. Це включає наочну візуалізацію та створення семантичних і топологічних моделей міст різних рівнів, аж до великих агломерацій. Такі моделі складається із певних територіальних осередків – арен застосування ЛУГА, які являють собою цеглинки мікрорівня у геопросторі функціонування УГС, як вже це підкреслювалося вище.

Три окремі методики: мікропросторовий ГІС-аналіз, дазиметричне картографування, уникнення гетерогенності масштабу через штучні нейронні мережі. Так би мовити, класичний просторовий аналіз щодо оцінки населення [23], та навіть його оновлена дещо пізніше методологія, що передбачала залучення складових ГІС / ДДЗ [21, 25], мали на увазі обмеження оцінки населення на рівні переважно переписних ділянок, приписуючи кожній ділянці єдине значення, яке мало б розподілятися рівномірно. Такий підхід може відображати загальні тенденції, але не враховує конкретних факторів просторового розподілу кількості населення. ЛУГА, навпаки, дозволяє детально розбивати оцінку населення на окремі міські осередки, враховуючи їхні геометричні та семантичні характеристики й впроваджуючи, таким чином, просторову класифікацію через певні параметричні методи, які враховують такі ключові

характеристики урбогеосистеми, як наповненість урбогеосистемного середовища ГІС-об'єктами, їх предметний зміст та архітектурну морфологію даного міського осередку. Зрозумілим чином, це забезпечує точніше відображення чисельного розподілу населення та виявлення причин цього розподілу, зокрема, таких як щільність забудови, типи житлових зон або переважання високоповерхових або низькоповерхових будівель, розвиненість міської транспортної інфраструктури тощо.

Кожна ЛУГА-арена, як це вже підкреслювалося вище, є певною цеглинкою УГС, що, у свою чергу, складається із сукупностей ГІС-об'єктів – окремих будівель або їх певних конфігурацій. Розрахунок будь-якого суспільно-географічного показника урбанізованої території на такому детально-сітчастому рівні із врахуванням урбогеосистемних властивостей є вочевидь більш точними, ніж на рівні будь-яких адміністративних кордонів, включаючи кордони переписних ділянок, у даному місті. У другому випадку фактично впроваджується один із варіантів достатньо відомого ГІС-методу дазиметричного картографування, про який детальніше буде йтися далі. Зроблений авторами компаративний аналіз просторового розподілу чисельності населення по частині м. Вашингтон (округ Колумбія, США) на підставі відкритих геопросторових даних [31] ще раз це підтверджує. На наступній ілюстрації наводиться порівняльна оцінка розподілу населення на невеличкій території, яка охоплює декілька переписних ділянок (рис. 2). Результати оцінки на детально-сітчастому рівні демонструють значення, які приблизно на 15-20% більш точніші, якщо беремо за критерій оцінки точності наявні документальні підтвердження кількості мешканців із муніципальних джерел.

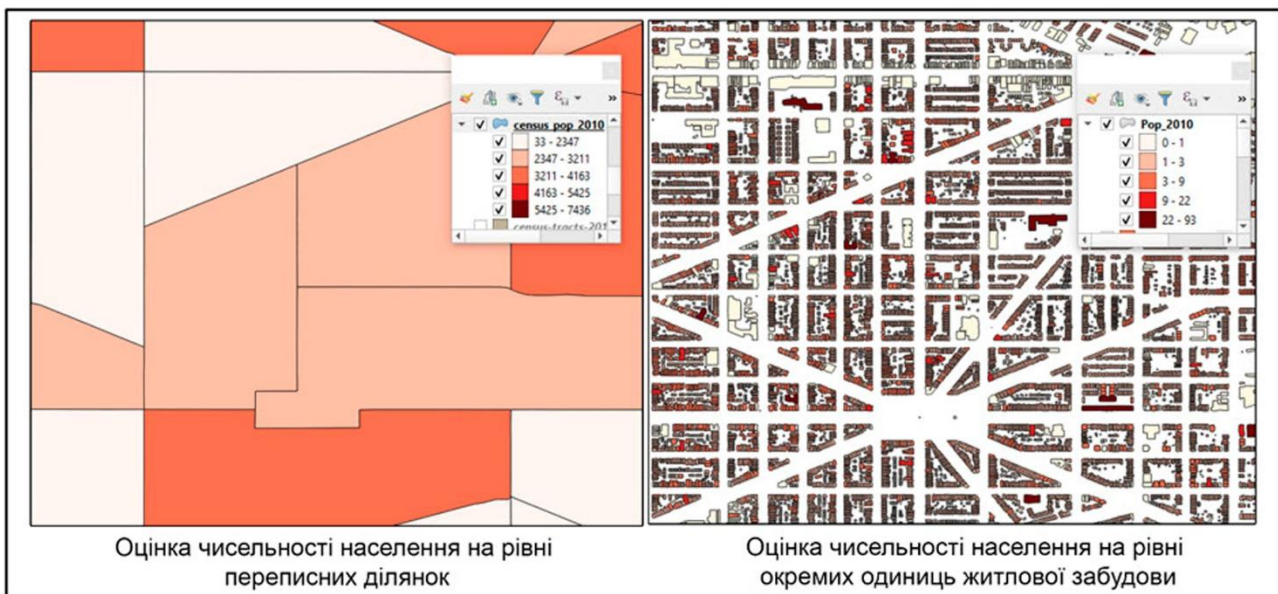


Рис. 2. Компаративний аналіз розподілу чисельності міського населення за двома рівнями: традиційному (переписні ділянки) – ілюстрація зліва; детально-сітчастому (ЛУГА) – ілюстрація справа

Fig. 2. Comparative analysis of urban population distribution at two levels: traditional (census tracts) – illustration on the left; fine-gridded (Dasymetric Mapping in localized urbogeosystemic analysis) – illustration on the right

Вказана змістовна варіативність ЛУГА, на нашу думку, дозволяє впроваджувати в його рамках до трьох адаптованих варіантів окремих інструментальних методик оцінки розподілу чисельності населення:

1. *Мікропросторовий ГІС-аналіз* [21, 22, 24, 32] – *методика # 1 (М1)* – реалізована в ЛУГА. Дані про міське населення, що використовувалися у традиційному просторовому аналізі (тобто, ще до залучення інструментарію ГІС / ДДЗ) зазвичай розглядалися як доволі однорідні і лише двовимірні (наприклад, переписні ділянки, міські райони або префектури). Причина полягала у відсутності можливості «вийти у третій вимір» через відсутність доступних даних про населення окремих будівель. Однак для ефективного управління надзвичайними ситуаціями, планування міської інфраструктури, дослідження споживчих і роздрібних ринків вкрай важливо асоціювати кількість мешканців з певними одиницями забудови. Саме **М1**, адаптована до операційної імплементації через ЛУГА на підставі спрощених моделей забудов стандарту *LOD1 (Level Of Detail – англ.)*, отриманих через лідарні дані, є основним предметом подання в цій статті. Ця методика є операційною імплементацією авторського підходу до використання оригінального програмного забезпечення. Останнє передбачає реалізацію двох параметричних (ареального та об'ємного) методів оцінки населення в будівлях на основі даних переписних ділянок, морфології і геометрії будівель. Отримані оцінки можуть бути перевірені за допомогою документальних муніципальних даних про населення в будівлях, а також за допомогою візуальних, статистичних і інших просторових методів.

2. *Загальне дазиметричне ГІС-картографування для оцінки кількості населення у невеликих за площею районах міста* [33, 34] – *методика # 2 (М2)* – може бути реалізована в ЛУГА у найближчій перспективі. Мається на увазі побудова дазиметричної карти, що представляє статистичні дані, зокрема щільність населення, у вигляді поверхні з набором суміжних областей. Варіації всередині кожної області мають бути зведені до мінімуму, а межі областей відображають найстрімкіші зміни цієї поверхні. Саме такий метод картографування, який бере свій початок з ранніх карт хороплет населення, може бути реалізований в рамках **М2** в ГІС-середовищі через ареальну інтерполяцію для оцінки населення за допомогою ДДЗ як джерела первинних даних. Дазиметричне картографування зазвичай включає дезагрегацію даних про населення, представлених у хороплетних картах, використовуючи додаткові просторові дані, такі як карти класів площ або супутникові зображення. Взаємозв'язок між додатковими даними і статистичною поверхнею, що картографується, може бути визначений заздалегідь або оцінений за допомогою різних звичайних статистичних методів.

3. *Застосування Штучних Нейронних Мереж (ШНМ) у картографуванні розподілу населення* [35-37] – *методика # 3 (М3)* – може бути реалізована в ЛУГА у дещо віддаленій перспективі. Привабливість

саме цієї перспективної реалізації полягає у тому, що для урбогеосистемного аналізу детальне розуміння розподілу населення може бути ключовим щодо опису соціально-економічних проблем інтернальної УГС. Проте представлена вище **М2** переважно, як вже підкреслювалося, базується на моделях, створених на варіативному адміністративному рівні, і передбачає оцінку населення на детально-сітчастому рівні, у чому, власно, й полягає сенс того самого дазиметричного картографування. Таким чином, в рамках **М2** виникає розходження у масштабах між навчальними та оцінюваними доменами, що спричиняє значну неоднорідність у розподілі даних, яка, у свою чергу, має наслідками помилки у кінцевих результатах. Одним із декількох можливих рішень, що пропонується для розв'язування цієї проблеми, є метод Штучних Нейронних Мереж, який уникає гетерогенності масштабу, базуючись на ШНМ [37]. Цей метод використовує щільність населення як *незалежну змінну*, а властивості детально-сітчастої структури (зображення дистанційного зондування, цифрові моделі рельєфу, дорожні мережі, контури будівель і типи використання земель) як *залежні змінні*. Зроблені впровадження **М3** демонстрували майже 20% збільшення точності, більш помітні переваги методу на більших переписних одиницях та високу точність попередньо навченої моделі для прямої оцінки населення в інші часові періоди [37]. З усіх геопросторових змінних найважливішою для точного оцінювання населення виявився тип землекористування.

Імплементація **М3** в рамках УГС-аналізу є перспективною за своєю предметною суттю, оскільки ЛУГА: 1) також оперує з осередково-сітчастою структурою урбанізованої території; 2) також надвелике значення має питання масштабування у екстенсі гепростору, де функціонує урбогеосистема; 3) на підставі 1)-2) можна вирішувати різноманітні похідні завдання. Наприклад, визначити протягом певного досліджуваного періоду, чи ставало населення більш сконцентрованим: зокрема, встановити, що середня щільність населення збільшилася, тоді як медіанна щільність населення знизилася.

Два параметричні методи оцінки населення через геометрію та морфологію забудов у рамках методики М1. Методи оцінки чисельності мешканців на основі площі та об'єму будівель (ПММ і ОММ відповідно) використовують геометричні характеристики та показники 3D морфології для визначення кількості людей, що проживають саме у житлових приміщеннях. Таким чином, надважливим є використання шару класу землекористування (КЗК) у будь-яких подальших ГІС-розрахунках. ПМ-метод базується на *площі основи* будівлі (*footprint – англ.*), тоді як ОМ-метод – на морфології забудови, може використовувати отриману через лідарні дані модель *LOD1*, як її найбільш спрощений варіант, і вимагає додаткових даних про кількість поверхів для більш точного обчислення [38]. Обидва методи дозволяють провести оцінку населення на детальному рівні, враховуючи специфічні особливості кожної будівлі.

Перед початком розрахунків потрібно відфільт-

рувати будівлі за типом використання в межах даного КЗК, відокремлюючи житлові будівлі від інших урбанізованих конструкцій. Також слід виключити з розрахунків будівлі з маленькою площею основи, щоб уникнути помилок у визначенні житлових приміщень. Для цього можна використовувати, як ми це робили у випадку користувацького сценарію оцінки енергоспоживання [6], дані з карти глобального покриття *OpenStreetMap* та ГІС-інструменти платформи *QGIS* для фільтрації та підготовки необхідної інформації, а також для інтеграції з даними перепису населення.

Предметний зміст формул для двох ПММ та ОММ параметричних методів виглядає так:

- Для ПММ, кількість мешканців у будівлі i

$$\text{Населення}_{\text{будівля } i} = \frac{\text{Загальна чисельність населення}_{\text{ділянка}}}{\text{Сумарна площа футпрінтів}_{\text{ділянка}}} * \text{Площа футпрінту}_{\text{будівля } i}, \quad (1)$$

де у чисельнику – кількість міського населення даної переписної ділянки, а у знаменнику – сумарна площа футпрінтів будівель в тій самій переписній ділянці. Частка помножена на площу основи даної будівлі.

$$\text{Населення}_{\text{будівля } i} = \frac{\text{Загальна чисельність населення}_{\text{ділянка}}}{\sum_{k=1}^n (\text{Площа футпрінту}_{\text{будівля } k} * \text{Кількість поверхів}_{\text{будівля } k})} * \text{Площа футпрінту}_{\text{будівля } i} * \text{Кількість поверхів}_{\text{будівля } i}, \quad (2)$$

Відповідним чином у формулах (3) і (4) застосовуються сумарна висота й сумарний об'єм будівель у межах переписної ділянки.

Якщо використовуються деталізовані моделі будівель стандартів *LOD2* чи *LOD3* [2], відповідні фо-

$$\text{Населення}_{\text{будівля } i} = \frac{\text{Загальна чисельність населення}_{\text{ділянка}}}{\sum_{k=1}^n (\text{Площа футпрінту}_{\text{будівля } k} * \text{Висота}_{\text{будівля } k})} * \text{Площа футпрінту}_{\text{будівля } i} * \text{Висота}_{\text{будівля } i} \quad (3)$$

По-друге, метод, що використовує *об'єм будівель*, може бути формалізований наступним чином:

$$\text{Населення}_{\text{будівля } i} = \frac{\text{Загальна чисельність населення}_{\text{ділянка}}}{\sum_{k=1}^n \text{Об'єм}_{\text{будівля } k}} * \text{Об'єм}_{\text{будівля } i}. \quad (4)$$

Представлені складові (1)-(4) формалізованого апарату ЛУГА-методики **М1** дозволяють здійснити достатньо точний модельний розподіл чисельності населення, враховуючи різноманітність даної міської забудови та її архітектурної морфології. Вирази (1)-(4) можуть бути адаптовані до різних рівнів деталізації даних про будівлі. Вони забезпечують можливість виконання розрахунків для різних типів моделей, від простих до складних, залежно від наявності та якості даних. Якщо вказані формули переписати за правилами звичайної символічної формалізації, тоді зміст математичного апарату методики **М1** може бути візуалізований наступним чином (рис. 3).

Після виконання розрахунків за (1)-(4), кожному житловому будинку присвоюється унікальне значення чисельності населення, яке базується на його геометричних, морфологічних та семантичних характеристиках. Ці дані дозволяють змодельовати чисельність населення для будь-якої області в даному місті, яка не збігається з межами переписних ділянок, наприклад, для окремих житлових кварталів, мікрорайонів або вулиць [20]. Для цього потрібно підсуму-

розраховується як частка від загальної чисельності населення переписної ділянки, помножена на площу основи цієї будівлі, поділену на сумарну площу основ усіх будівель;

- Для ОММ, кількість мешканців у будівлі i визначається як частка від загальної чисельності населення, помножена на добуток площі основи будівлі та кількості її поверхів, поділену на сумарний добуток площ основ та поверхів усіх будівель.

У такому випадку формалізований апарат ЛУГА-методики **М1** можна подати наступним чином. Для методу оцінки за площею основи будівель – через *геометричні* атрибути моделей *LOD1* (ПММ), формула для визначення кількості мешканців в будівлі може бути представлена:

Для методу оцінки за об'ємом будівель – через *семантичні* атрибути щодо кількості поверхів згідно моделей *LOD1* (ОММ), формула для визначення населення в будівлі виглядає:

рмули мають бути адаптовані для врахування середньої висоти або об'єму відповідних споруд, що подаються деталізованими моделями.

По-перше, метод з використанням *середньої висоти будівель* передбачатиме наступний вираз:

вати чисельність населення в будинках, що входять до обраної області інтересу (ООІ):

$$P_{OOI} = \sum_{j=1}^n P_j \quad (5)$$

де P_{OOI} – змодельована кількість жителів у межах обраної області інтересу, яка належить до даної урбанізованої території; n – кількість житлових будинків у межах цієї області; P_j – кількість мешканців у будівлі j у межах даної області.

При порівнянні двох параметричних методів оцінки чисельності населення в рамках **М1** доцільно відзначити, що для аналізу багатоповерхової міської забудови **ОММ** може вважатися оптимальним, оскільки він забезпечує значно точніші результати, особливо з використанням деталізованих моделей *LOD2* / *LOD3* або високополігональних сутностей [39]. Водночас цей метод потребує більшої кількості змінних, що дещо ускладнює розрахунки. З іншого боку, альтернативне параметричне рішення – **ПММ** – може вважатися більш придатним для аналізу одноповерх-

хової сільської забудови, де площа будівель добре корелює з їх об'ємом, що забезпечує пропорційну точність чисельності населення незалежно від обраної методики. Крім того, для цього методу потрібні лише контури будівель, що дозволяє обчислити чи-

сельність населення ще до створення моделей, а потім просто перенести ці дані в моделі і одразу розпочати ГІС-візуалізацію або в настільному, або у веб-додатку.

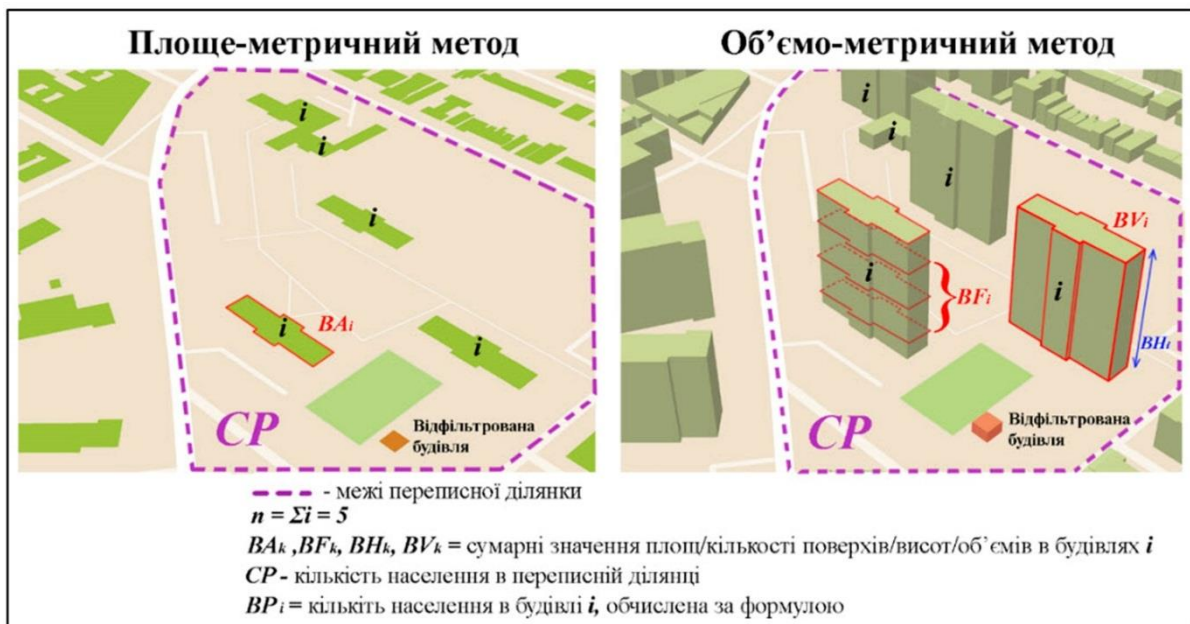


Рис. 3. Візуалізація змісту двох параметричних методів оцінки населення через геометрію та морфологію забудов у рамках методики М1

Fig. 3. Visualization of two parametric methods' content for population estimation through the geometry and morphology of buildings within the M1 technique

Слід окремо зазначити, що вперше методика М1 була нами успішно імплементована при модулюванні урбаністичного середовища агломерації Бостона (США) на хмарній ГІС-платформі *ELIT* [30]. Отримана у тому випадку точність оцінки населення по певній ООІ може бути порівняна з аналогічним високим показником, про який повідомляють автори підходу, оснований на такій самій комбінації засобів «ГІС/ДДЗ», але ж також – із залученням інструментарію ШНМ [37].

Далі запропоновану методику М1 треба відкалібрувати для окремої міської території – згаданої вище найменшої одиниці детально-сітчастої структури УГС, для якої повинні бути два реперних значення чисельності населення за даною переписною ділянкою – $CP1$ і $CP2$. (див. рис. 3). Ці два значення – показники двох переписів для однієї й тієї саме ділянки, між якими зазвичай проходить від 5 до 10 років. Маючи інформацію про зміну характеру забудови та архітектурної морфології в її межах за ці 5-10 років, і враховуючи два зазначених статистичних значення, можна ефективно відкалібрувати модель оцінки, формалізовану через (1)-(5).

Операційна послідовність реалізації методики М1 щодо оцінки розподілу населення. Для впровадження основних обчислювальних процедур в рамках цієї методики ЛУГА користувачеві потрібна будь-яка повнофункціональна ГІС, яка підтримує такі базові формати як *.SHP* і *.CSV* та забезпечує базову функціональність просторової та атрибутивної вибірки з використанням калькулятора полів. Усі

подібні вимоги задовольняє ГІС-платформа вільного розповсюдження *QGIS*.

1. Завантаження і передобробка даних. Для виконання розрахунків у *QGIS* необхідно попередньо узагальнити дані для обраної території з різних джерел та створити базу даних, яка є сукупністю ГІС-шарів і має включати (рис. 4):

- *SHP*-полігони переписних ділянок з відповідними даними перепису населення. Зазвичай такі дані можна отримати від державних або міських статистичних служб у вигляді таблиць з ідентифікаторами для кожної переписної ділянки, які потрібно буде додатково геокодувати, або отримати у вигляді готових *SHP*-файлів.

- *SHP*-полігони КЗК на обраній території разом з окремими типами землекористування в межах цих класів. Подібну інформацію можна завантажити з карти глобального покриття *OpenStreetMap* або з відкритих баз даних геопорталу відповідного міста. Ці дані не потрібні, якщо інформація про типи будівель вже міститься у *SHP*-файлах футпрінтів цих будівель.

- Футпрінти будівель (проекції на площину даних споруд), що містять інформацію про площу основи кожної будівлі, а також, за наявності, дані про кількість поверхів та тип використання кожної будівлі.

Завантаження атрибутивних даних щодо тривимірних моделей будівель є окремою складовою першого етапу операційної послідовності (*передобробка*

даних). Геометричні, морфологічні та просторові характеристики моделей, створених за допомогою інструментів або низько-, або високополігонального моделювання можна отримати з *JSON*-файлів, які генеруються для кожної *OBJ*-моделі будівлі і містять відповідні описові метадані. *JSON*-файли зберігають дані у текстовому форматі у вигляді пар «ключ-значення». Використовуючи простий *Python*-скрипт з бібліотеками *CSV* та *JSON*, можна об'єднати дані всіх *JSON*-файлів для кожної моделі в один *CSV*-файл. У першу чергу, до цього файлу мають бути додані дані за ключами *latitude* (широта), *longitude*

(довгота) та *volume* (об'єм) з відповідними назвами полів, а також поле *name*, значення якого беруться з назв файлів, які задіяні в обчислюваннях. Для обробки *Python*-скриптом потрібно подати директорію, що містить *JSON*-файли всіх моделей щодо цієї території. Після запуску, скрипт обробляє всі наявні *JSON*-файли і екстрагує значення зазначених ключів у спеціальний *CSV*-файл, який служить вихідними даними. Цей файл можна завантажити у ГІС-платформу *QGIS* і інтегрувати до первинної бази даних, яка створюється.

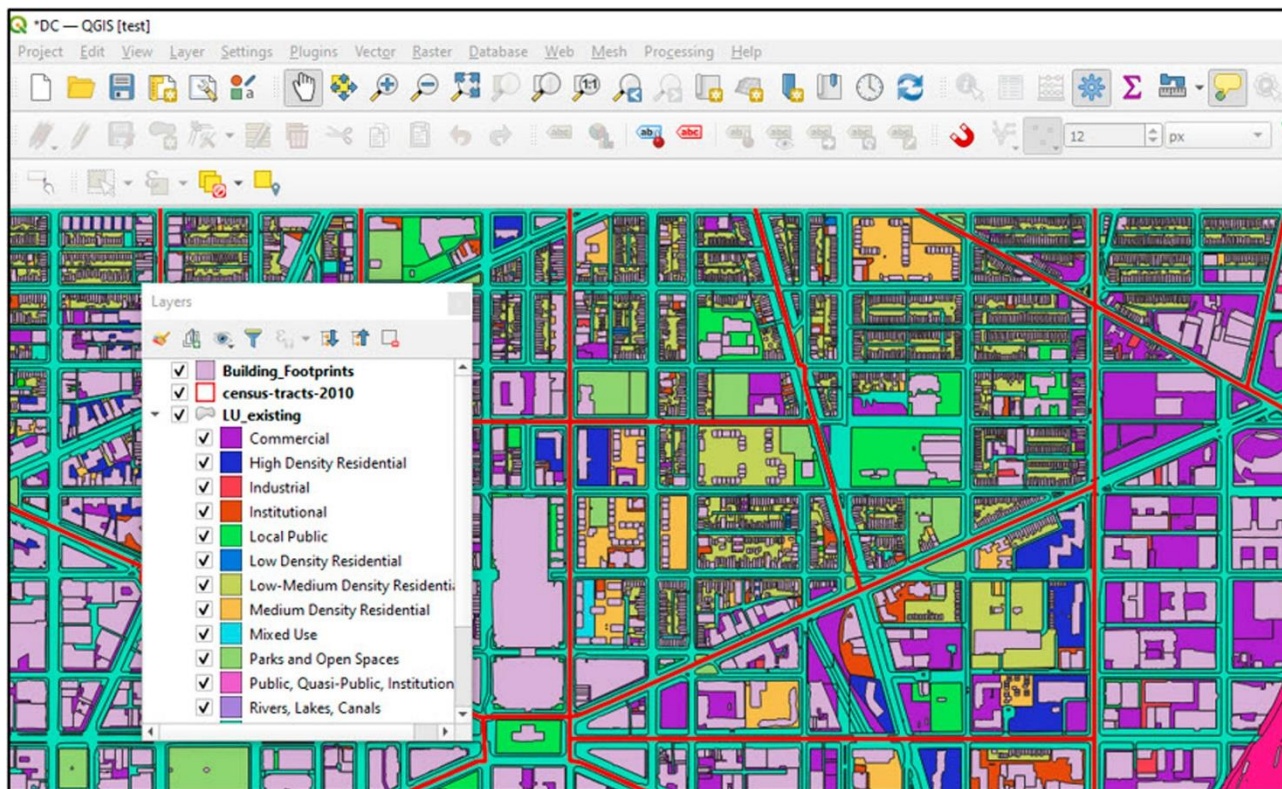


Рис. 4. Подання первинної бази даних – сукупності ГІС-шарів на платформі *QGIS* для оцінки чисельності міського населення

Fig 4. Presentation of the primary database – a set of GIS layers on the *QGIS* platform for urban population estimation

Крім всього, зазначеного у попередньому параграфі, для просторового зіставлення отриманих даних моделей будівель з полігонами переписних ділянок, *CSV*-файл необхідно перетворити на точковий *SHP*-файл, що містить центроїди будівель. Це можна зробити у процесі імпорту *CSV*-файлу в *QGIS*, використовуючи координати з полів *latitude* та *longitude* для визначення розташування кожної будівлі (меню *Layer* -> *Add Layer* -> *Add delimited text layer*). Таким чином, у первинну базу даних додається шар центроїдів футпринтів усіх змодельованих будівель із полем *volume* в атрибутивній таблиці. За потреби, цей шар можна перепроєктувати відповідно до проекції інших шарів у проєкті. Тепер у базі даних зібрана вся необхідна інформація для виконання оцінки чисельності населення через *ОММ* (рис. 5).

Якщо використовується саме розрахунок через *ПММ*, завантаження атрибутивних даних щодо три-

вимірних моделей можна, зрозумілим чином, пропустити.

2. Об'єднання атрибутивних характеристик. Для того щоб відфільтрувати нежитлові будівлі, тобто – виокремити типи в рамках одного КЗК, та розрахувати чисельність населення в житлових будинках, необхідно додати всю необхідну інформацію з інших шарів до таблиці атрибутів шару центроїдів. Це можна зробити за допомогою інструменту *SAGA>Add polygon attributes to points* (додавання атрибутів полігонів до точок). Цей *QGIS*-інструмент з панелі *Processing Toolbox* зіставляє об'єкти вибраного точкового шару з об'єктами вибраного полігонального шару (цільовий шар й шар-джерело), створюючи як результат оновлений шар центроїдів з доданою інформацією з полігонів до атрибутивної таблиці [40]. Процедура додавання атрибутів проводиться двічі: спочатку інформація із шару КЗК пере-

носиться до точкового шару, а потім – із шару переписних ділянок. У результаті всі центроїди будівель, які потрапляють в одну переписну ділянку, матимуть

однакові записи про сумарну чисельність населення в цій ділянці, що також стосується і класів землекористування.

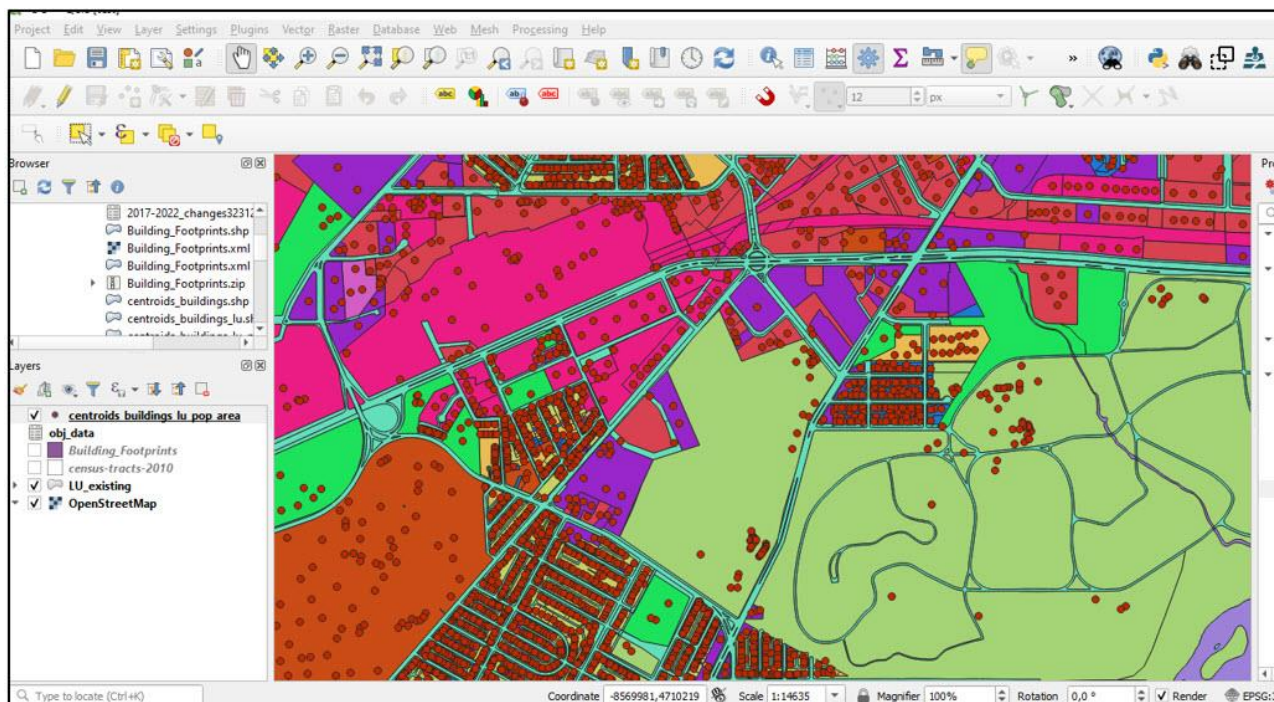


Рис. 5. Візуалізація класів землекористування з точковими об'єктами центроїдів будівель в ГІС-інтерфейсі QGIS

Fig. 5. Depicting the land use classes with point features of building centroids in the QGIS interface

3. Фільтрація житлових будинків – окремого типу в рамках КЗК «Забудови». Для спрощення розрахунків точкові об'єкти шару центроїдів будівель можна на цьому етапі відфільтрувати за критерієм житлового типу землекористування. Для цього можна використати інструмент *Select features by Expression*, ввівши вираз *'landuse is residential'*. Це виділить 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 надалі працювати лише з ними. Аналогічним чином можна відфільтрувати будівлі за їхнім об'ємом, використовуючи вираз *'volume > 100'*. Якщо в розрахунках використовуються центроїди футпрінтів, то фільтрацію можна виконати за значенням їхньої площі (*'area > 30'*).

4. Розрахунок атрибутивної характеристики чисельності мешканців у будинках. На цьому кроці операційної послідовності, коли ми маємо справу виключно з моделями житлових будинків, спершу потрібно визначити сумарний об'єм їх фізичних аналогів для кожного полігону переписних ділянок. Це можна зробити за допомогою QGIS-інструменту *SAGA->Add polygon attributes to points*, який знаходиться на панелі *Processing Toolbox*. У налаштуваннях інструмента слід вказати шар центроїдів та поле *volume* як джерело даних, а шар переписних ділянок – як цільовий шар, і вибрати функцію *sum*. У результаті шар переписних ділянок буде доповнено новим полем – *sum_volume*, що містить сумарний об'єм

житлових будинків у кожній ділянці. Потім отримані дані необхідно знову перенести в шар центроїдів за допомогою того ж інструмента *Add polygon attributes to points*. Для ПММ замість об'єму у всіх обчислювальних процедурах використовується площа (*area*, *sum_area*).

Розрахунок чисельності мешканців у будинках здійснюється для шару точкових центроїдів за допомогою інструменту *Калькулятор полів*. У налаштуваннях інструмента слід вказати назву поля, в яке будуть заноситися розраховані значення населення для будинків – *building_pop*, і його тип – *integer*. У полі для виразу потрібно ввести формулу **ОММ / ПММ**, представивши її так: *'(census_pop / sum_volume) * volume'* (ОММ) або *'(census_pop / sum_area) * area'* (ПММ). Тут *census_pop*, *sum_volume*, *volume*, *sum_area*, *area* – це назви полів шару центроїдів з відповідними значеннями. По виконанню цієї дії до таблиці атрибутів шару центроїдів буде додано нове поле *building_pop* з розрахованою кількістю мешканців по будинках, виходячи з їхньої приналежності до житлового типу КЗК та відповідно розподілу населення у місті за переписними округами.

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

- *name / ID* – назва моделі або ідентифікатор основи будівлі (футпрінту);
- *volume / area* – об'єм або площа фізичного аналогу, приписаного до моделі;

- *landuse* – певний тип у класі землекористування;
- *census_pop* – загальна кількість населення в переписній ділянці;
- *sum_volume/sum_area* – сумарний об'єм або площа житлових будівель у переписній ділянці;
- *building_pop* – обчислене населення певної будівлі.

6. Експорт та інтеграція даних. Для ПММ атрибуту шару центроїдів необхідно передати у зворотній бік – до шару футпрінтів будівель. Це можна зробити за допомогою інструменту *SAGA->Add point attributes to polygons*. Після цього шар футпрінтів експортується у форматі *.SHP (Export > Save Features As)* і використовується в розрахунках низькополігональних моделей разом із хмарами лідарних точок. Розрахована інформація про чисельність населення буде занесена в *JSON*-файли моделей і відображатиметься під час візуалізації остаточних результатів.

У разі обчислення через **ОММ** шар центроїдів експортується у форматі *.CSV*, а потім через *Python*-скрипт дані записуються назад у *JSON*-файли моделей у вигляді пар "ключ-значення". Скрипт проходить кожен рядок *CSV*-таблиці і при збігу поля *name* з назвою *JSON*-файлу заносить відповідну інформацію про чисельність населення, тип землекористування тощо. Усі *JSON*-файли будуть перезаписані і готові до візуалізації.

7. Візуалізація чисельності населення у 3D-сцені. Така візуалізація, як правило, виконується методом градуїзованих символів. Кожній моделі житлової будівлі присвоюється колірна заливка відповідно до її градієнтного інтервалу, розрахованого за значенням поля *building_pop*. Аналогічно можуть бути візуалізовані значення землекористування для кожної моделі методом унікальних символів за даними з поля *landuse*. Ця візуалізація дозволяє аналізувати розподіл населення у міському середовищі як на макрорівні – у межах всього міста, так і на мікрорівні – у великомасштабному зрізі впровадження ЛУГА. Атрибутивну інформацію для кожної моделі можна переглянути у спливаючому вікні, що дозволяє простежити зв'язок між чисельністю населення та іншими геометричними, морфологічними та семантичними характеристиками моделі.

Таким чином, операційна послідовність даного користувацького сценарію застосування ЛУГА виконується у сім процедурних етапів, частина яких є спільною для ПММ / ОММ, і може бути узагальнена у вигляді наступної блок-схеми (рис. 6).

Вище, у вступі до цієї секції статті, ми вже посилалися і коротко аналізували у порівнянні з ЛУГА «стале комплексне рішення залучення ДДЗ та програмного забезпечення ГІС» до оцінки розподілу населення (рис. 1) [22]. Ми розглядали, так би мовити, «проекцію» локалізованого урбогеосистемного аналізу на 11 кроків вказаного «ДДЗ / ГІС» підходу. Однак, при тому випадку предметом порівняння виступала

методологія ЛУГА взагалі. Якщо ж порівняти безпосередньо дві блок-схеми (рис. 1 й рис. 6), то доцільно зауважити наступне:

- побудова архітектурної морфології міста виключно на лідарних даних (ЛУГА), не заохочуючи супутникові зображення (підхід «ДДЗ/ГІС»), за замовченням має передбачати більш високу якість кінцевих результатів дослідження;

- ключовий результат попереднього моделювання у підході «ДДЗ / ГІС» із [22] – континуальний об'єкт у вигляді нормалізованої поверхні (рельєф + споруди, як форми цієї поверхні), тоді як у **М1** ЛУГА – псевдовекторні (3D) дискретні моделі забудов; даний фактор значно покращує точність моделювання чисельності розподілу населення саме через ЛУГА;

- переважно регресійно-статистичний підвід оціночної із [22] (рис. 1) і переважно детерміністська оцінка в **М1** ЛУГА (рис. 6) можуть демонструвати певні переваги і недоліки у залежності від окремого користувацького сценарію і характеру первинних даних, що застосовуються;

- **М1** ЛУГА забезпечує як звичайну візуалізацію кінцевих результатів через 2D карту, так і авангардне подання через наочну 3D сцену, на відміну від підходу «ДДЗ/ГІС», що передбачає лише стандартну картографічну візуалізацію.

Приклад регіональної імплементації ЛУГА щодо користувацького сценарію оцінки розподілу населення. Ми вже посилалися на приклад впровадження методичного попередника ЛУГА щодо моделювання архітектурної морфології і оцінки розподілу населення по агломерації м. Бостон (штат Массачусетс, США) [30]. Тут ми розглядаємо результати схожої оцінки, однак вже в іншому методичному аспекті. В якості первинного джерела використовувалися геопросторові дані вільного розповсюдження [41, 42].

Обидва автори цієї статті приймали участь у розробці Хмарної ГІС-платформи *ELiT Geportal* через, у тому числі, *JS*-бібліотеку *Cesium* та базовий віджет *Cesium Viewer*. Він об'єднує всі стандартні віджети *Cesium* в один пакет, який можна повторно використовувати. Взагалі-то віджет (*widget* – англ.) — це елемент інтерфейсу користувача, який надає певну функціональність або відображає певну інформацію у графічному інтерфейсі веб-застосування. Віджети можуть бути різних типів, таких як кнопки, текстові поля, слайдери, списки, графічні елементи тощо. Вони використовуються для взаємодії користувача з застосуванням і можуть бути налаштовані або розширені для забезпечення додаткових функцій.

Саме *Cesium Viewer* забезпечував інтерфейсну складову реалізації **М1** ЛУГА у форматі *3DTiles*, що зазвичай надає оптимальну візуалізацію надвеликих масивів даних через поєднання високоякісної сітчастої текстуризації із зображенням високої роздільної здатності. Приклад такої візуалізації в рамках регіональної імплементації **М1** ЛУГА по агломерації м. Бостон наводиться на наступній ілюстрації інтерфейсу Хмарної платформи *ELiT Geportal* (рис. 7).

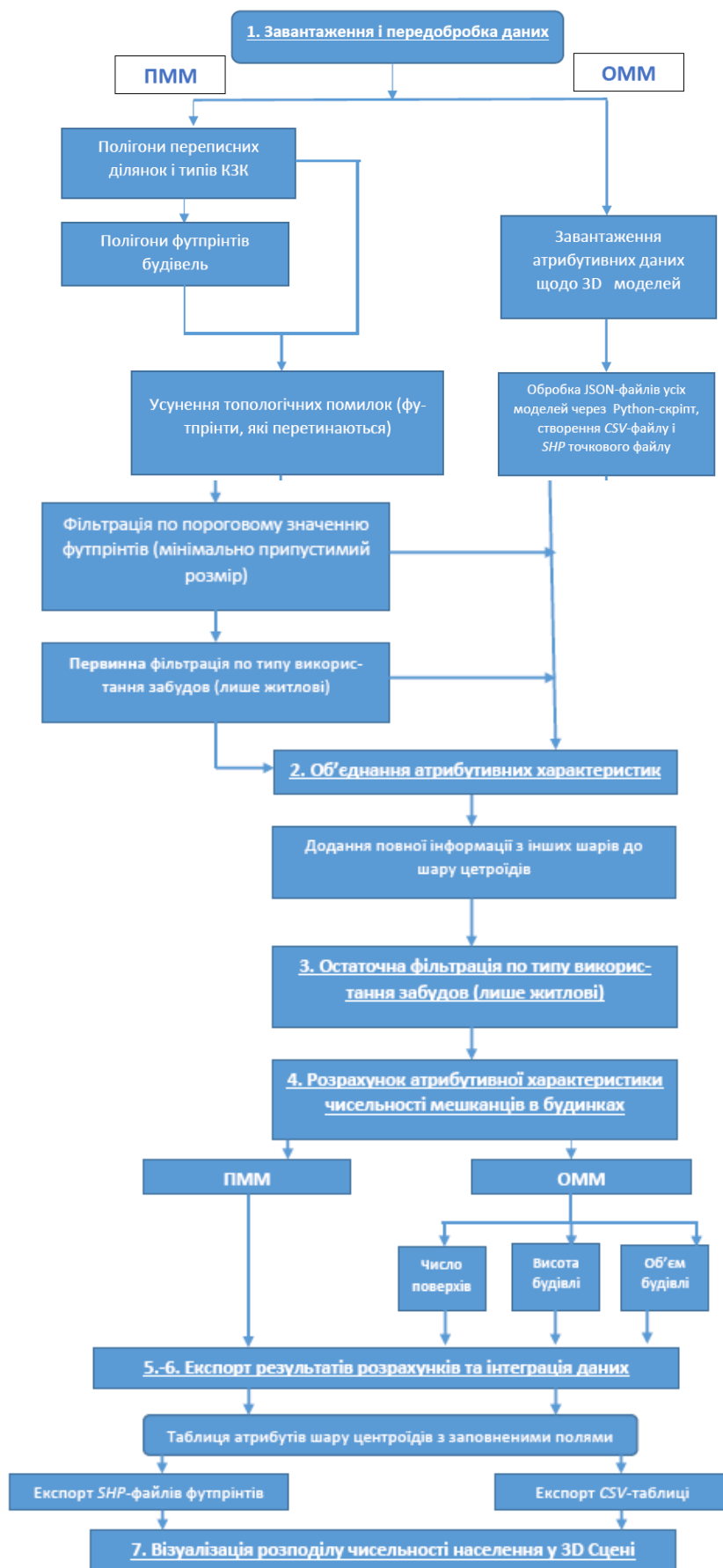


Рис. 6. Операційна послідовність реалізації методики M1 ЛУГА
 Fig. 6. Operational sequence of implementing M1-technique of LUGA

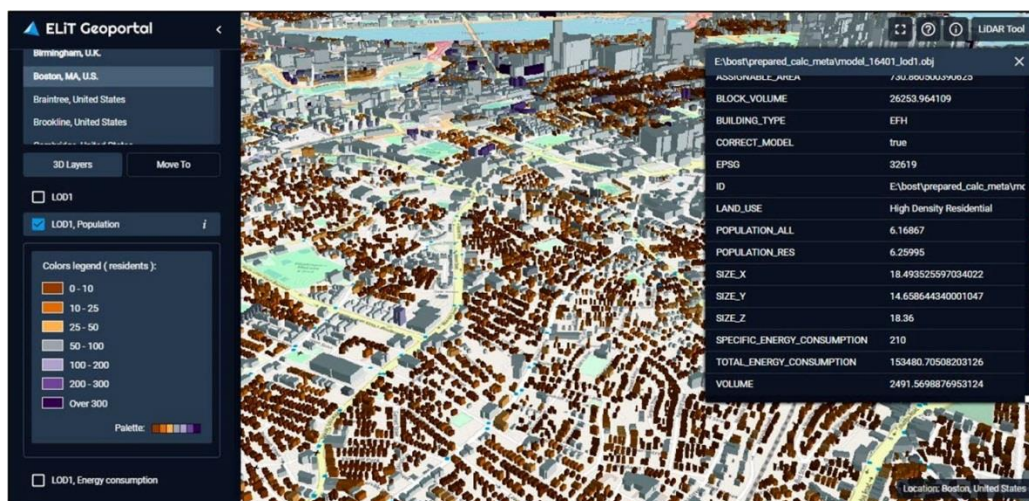


Рис. 7. Реалізація методики М1 ЛУГА по агломерації м. Бостон в інтерфейсі користувача ELiT Geoportal
 Fig. 7. Implementation of M1 LUGA technique through the agglomeration of Boston in the ELiT Geoportal user's interface

Через використання тривимірної моделі забудови міста Бостон, що охоплює понад 350 тисяч будівельних моделей, можна виконувати урбогеосистемний аналіз на рівні ЛУГА в будь-якому масштабі. Моделі забудов рівня деталізації *LOD1* були створені за допомогою авторського програмного забезпечення для низькополігонального моделювання на основі лідарних даних. Після цього до моделей була додана інформація про чисельність населення, розрахована за **ОММ**. Візуалізація результатів проведена у інтерфейсі *ELiT Geoportal* через базовий віджет *Cesium Viewer* і у форматі *3DTiles*.

Треба окремо підкреслити, що у місті Бостон, яке займає площу 232 км² і налічує понад 650 тисяч мешканців, населення рівномірно розташоване переважно в малоповерхових житлових районах [41]. Вже ця особливість розселення достатньо чітко відображається в тривимірній візуалізації забудови (рис. 7). Представлене результативне подання фактично є двопредметним: по-перше, це є наочним виходом результатів моделювання архітектурної морфології даної частини міста (хоча й зрозуміло – лише у спрощеному *LOD1* варіанті); по-друге – досягненням кінцевої мети впровадження даного користувацького сценарію – визначення розподілу міського населення.

Як впливає із ілюстрації вище, за **ОММ** оцінкою, найпоширенішим типом будівель є будинки, які вміщують від 0 до 10 мешканців. Це можуть бути як одноповерхові, так і двоповерхові поодинокі споруди, житлова площа яких розрахована саме на таку кількість мешканців, тому оцінка чисельності населення у даному випадку цілком відповідає актуальним показникам. Житлові будівлі розташовані дещо хаотично, перемежуючись з будинками іншого типу користування. Щоб переглянути інформацію про тип будівлі, можна натиснути на відповідну модель – у вікні *3D* Сцени інтерфейсу Хмарної платформи з'явиться спливаюче вікно з різноманітною атрибутивною інформацією щодо вибраної моделі. У цьому вікні також вказується точна кількість розрахованого населення для кожного житлового будинку.

Подальше застосування, наприклад, різноманітних інструментів просторової статистики та вже згаданих на початку цієї рубрики статті регресійних моделей з вагами за геолокацією [25] дозволить визначати різноманітні територіальні патерни розподілу населення, однак це вже, певним чином, виходить за рамки методики **М1**.

Слід окремо підкреслити, що однією з ключових переваг візуалізації забудови в інтерфейсі *ELiT Geoportal* є можливість зміни масштабу перегляду та швидкого перемикання між різними просторовими закладками даної *3D* сцени, що характеризують різні житлові райони та переписні ділянки міста Бостон. Саме на такій підставі користувач може перейти до визначеного найменшого осередку – структурної одиниці детально-сітчастого подання цифрового урбаністичного середовища, що, як вже пояснювалося вище, є великомасштабним зрізом УГС. Як один із випадків, вказаною ЛУГА-ареною можна обирати переписну ділянку, а візуалізацію сцени виконувати у її межах (рис. 8).

Незважаючи на велику кількість моделей у геопросторовому екстенсі всього міста, *ELiT Geoportal* через формат *3DTiles* дозволяє користувачеві швидко перемикатися між вказаними осередками та візуалізувати моделі без надмірного навантаження на корпоративний сервер. Подібна візуалізація не може бути здійснена через настільне застосування.

Саме перейшовши до закладки певної переписної ділянки, користувач починає діяти власно у масштабі впровадження методики **М1** – на мікропросторовому рівні даного урбанізованого геопростору і отримує можливість детально проаналізувати відповідні особливості розподілу населення в цьому осередку детально-сітчастої структури УГС. Наступним кроком буде виявлення ступеня диференціації класів будівель за даним тематичним показником (рис. 8). У даному конкретному випадку найбільш поширеним класом можуть бути будинки з населенням від 0 до 10 мешканців, хоча також зустрічаються значні групи будівель, розраховані на 10-25 мешканців, а також окремі будівлі, що вміщують до 25-50 мешкан-

ців і навіть 100-200 мешканців. Цей район є щільно урбанізованим, він розташований поряд з діловим центром міста (*downtown* - англ.). Навіть в умовах щільної забудови розрахована оцінка чисельності населення виявилася достатньо логічною та співставною з морфологічними особливостями відповідних забудов. Наприклад, для виділеного будинку кількість оціненого населення становить 162 особи. Виходячи з морфології цієї будівлі та порівнюючи її з

навколишніми житловими будинками, можна припустити, що вона складається з 4-5 поверхів і має 3-4 під'їзди, які разом можуть вміщати до 60 апартаментів (припускаючи, що кожен поверх у кожному під'їзді має по 3 апартаменти). Якщо розділити розраховану кількість населення на кількість апартаментів (162 / 60), то отримаємо 2.7 особи на одні апартаменти, що є цілком реалістичним показником.



Рис. 8. Тривимірні візуалізація ЛУГА-арени – структурної одиниці детально-сітчастого подання цифрового урбаністичного середовища (на прикладі м. Бостон). Для обраного будинку (синім кольором) виведено вікно атрибутівних характеристик

Fig. 8. Three-dimensional visualization of the LUGA-arena – a structural detailed grid component of the digital urban environment (a case study of Boston). There is a window of attributes for a selected building model (in blue)

Висновки і перспективи подальших досліджень. У сучасному міському середовищі, яке швидко перетворюється на складну ієрархічну систему з комплексними взаємозв'язками між інфраструктурними об'єктами різної власності, просторовий розподіл чисельності мешканців стає домінуючим фактором сталого функціонування цієї системи. Локалізований урбогеосистемний аналіз може виступати одним із небагатьох наявних інструментів, який дозволить ефективно контролювати функціонування та розвиток системи міста особам, що приймають рішення.

Запропоновану методику **М1** можна застосовувати для територій, що не збігаються з межами переписних ділянок, або на основі цієї методики можна оновлювати чисельність населення в межах таких ділянок через кілька років після проведення перепису, враховуючи архітектурно-морфологічні зміни міської забудови на цій території. Обидва ці рішення мають бути дуже затребуваними, оскільки у них немає очевидної альтернативи, окрім оновлення переписних даних традиційними дорогими методами.

На основі ЛУГА можна оптимізувати мережу покриття стільникового зв'язку, оскільки будуть

доступні дані про територіальний розподіл мешканців міста в будь-якій конфігурації меж областей інтересу. Маючи такі дані, можна досить легко оптимізувати покриття стільникового сигналу так, щоб він був доступний більшій кількості абонентів.

Практичні застосування ЛУГА очевидні в галузі реагування на надзвичайні ситуації та інциденти, зокрема на мілітарні впливи на жителів міста. Наприклад, оцінка чисельності населення, яке може бути піддане ризику у разі ворожих обстрілів або несприятливих екзогенних явищ, спричинених війною. Така оцінка дозволить визначити маршрути та обсяги доставки першої необхідної допомоги, а також обсяги необхідних евакуаційних заходів. В цьому ж контексті варто зазначити, що розміщення пунктів незламності – центрів розподілу їжі та тимчасових сховищ очевидно потребує знання патернів територіального розподілу населення.

Вже у сфері міського та муніципального планування, на основі впровадження такого користувачького сценарію можна кількісно визначити, скільки саме жителів міста отримають вигоду від будівництва громадських закладів і підприємств у певних місцях, таких як автостанції, залізничні вокзали, лікарні, зупинки громадського транспорту тощо.

Список використаної літератури:

1. Kostrikov S. Geoinformation approach to the urban geographic system research (case studies of Kharkiv region) [Текст] / S. Kostrikov, L. Niemets, K. Sehida [and other] // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія". Вип. 49. Харків: ХНУ, 2018. С. 107-124.

- <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09>
2. Kostrikov S., Pudlo R., Kostrikova A., Bubnov D. Studying of urban features by the multifunctional approach to LiDAR data processing [Текст] // Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), Vannes, France, 2019. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2019.8809063>
 3. Kostrikov S. Urban Remote Sensing with LiDAR for the Smart City concept implementation [Текст] // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія". Вип. 50. Харків: ХНУ, 2019. С. 101-124. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-08>
 4. Костріков С. Веб-застосування ELiT – програмне забезпечення для моделювання і аналізу міського середовища [Текст] / С. Костріков, Д. Бубнов, А. Кострікова, Р. Пудло // Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «ГІС-Форум»-2018». Харків, 2018. С. 56-59.
 5. Сergygin D.S., Kostrikov S.V. До питання виокремлення урбаністичних геоситуацій [Текст] / Д.С. Сergygin, С.В. Костріков // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2022. Вип. 58. С. 241-256. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-19>
 6. Сergygin D.S., Kostrikov S.V. Просторова оцінка енергоспоживання забудов на підставі тривимірного моделювання міського середовища [Текст] // Часопис соціально-економічної географії, 2023. Вип. 34. С. 27-41. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-01>
 7. Костріков С., Сergygin Д., Бережний В. Візуальний аналіз урбаністичного середовища як складова урбогео-системного підходу [Текст] / С. Костріков, Д. Сergygin, В. Бережний // Часопис соціально-економічної географії. 2021. Вип.3 0(1). С. 7-23. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01>
 8. Sampath A., Shan J. Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial LIDAR point clouds [Текст] // IEEE T. Geosci. Remote. 2010. Vol. 3. P. 1554-1567. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030180>
 9. Lozić E. Application of airborne LiDAR data to the archaeology of agrarian land use: the case study of the early medieval microregion of Bled (Slovenia) [Текст] // Remote Sens. 2021. Vol 13. P. 3228. <https://doi.org/10.3390/rs13163228>.
 10. Morar C., Lukic T., Valjarevic A., Niemets L., Kostrikov S., Sehida K., Tebilenieva I., Kluchko L., Kobylin P., Kravchenko K. Spatiotemporal analysis of urban green areas using change detection: a case study of Kharkiv, Ukraine [Текст] // Front. Environ. Sci. 2022. Vol. 10. P. 823129. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.823129>
 11. Loh H., James D., Ioki K., Wong W., Tsuyuki S., Phua M.-H. Estimating aboveground biomass changes in a human-modified tropical montane forest of Borneo using multi-temporal airborne LiDAR data [Текст] // Remote Sens. Appl.: Soc. Environ. 2021. Vol. 28, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100821>
 12. Desthieux G., Carneiro C., Camponovo R., Ineichen P., Morello E., Boulmier, A., Abdennadher N., Dervey S., Ellert C. Solar Energy Potential Assessment on Rooftops and Facades in Large Built Environments Based on LiDAR [Текст] // Data, Image Processing, and Cloud Computing. Methodological Background, Application, and Validation in Geneva (Solar Cadaster) // Front. Built Environ. 2018. Vol. 4. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00014>
 13. Bakula K., Pilarska M., Ostrowski W., Nowicki A., Kurczyński Z. UAV LiDAR data processing: influence of flight height on geometric accuracy, radio-metric information and parameter setting in DTM production [Text] // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2020. Vol. XLIII-B1-2020. P. 21-26. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-21-2020>
 14. Massoud A., Fahmy A., Iqbal U., Givigi S., Noureldin A. Real-time safe landing zone identification based on Airborne LiDAR [Text] // Sensors. 2023. Vol. 23, no 7. P. 3491. <https://doi.org/10.3390/s23073491>
 15. Maas H., Vosselman G. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data [Text] // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 1999. Vol. 54. P. 153-163. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00004-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00004-0)
 16. Kim K., Shan J. Building footprints extraction of dense residential areas from LiDAR data [Text] // Ann. Conf. Am. Soc. Photogram. Remote Sens. 2011. Vol. WI. P. 193-198.
 17. Maltezos E., Ioannidis, C. Automatic extraction of building roofs from Airborne LiDAR data applying and extended 3D randomized Hough transform // ISPRS Annals. 2016. Vol. III-3. P. 209-216. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-209-2016>
 18. Kada M. 3D reconstruction of simple buildings from point clouds using neural networks with continuous convolutions (convpoint) // Int. Arch. Photo-gramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2022. Vol. XLVIII-4/W4-2022. P. 61-66. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-61-2022>
 19. Yanga B., Haalab N., Donga Z. Progress and perspectives of point cloud intelligence [Текст] // Geo-spatial information science. 2023. Vol. 26, no. 2. P. 189-205. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2175478>
 20. Kostrikov S., Sergygin D. Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. Urban Agglomeration [Text] / Edited by A. Battisti and S. Baiani. London – Milan – Zagreb: INTECH Open. 2022. P. 251-273. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102482>
 21. Harvey J.T. Population estimation models based on individual TM pixels // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing [Текст]. 2002. Vol. 68. P. 1181-1192.
 22. Dong P., Ramesh S., Nepali A. Evaluation of small area population estimation using LiDAR, Landsat TM and parcel data [Текст] // International Journal of Remote Sensing, 2010. Vol. 31. P. 5571-5586. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2010.496804>
 23. Smith S.K., Mandell M. A comparison of population estimation methods: housing unit versus component II, ratio correlation and administrative records [Текст] // Journal of American Statistical Association. 1984. Vol. 79.

- P. 282-289. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1984.10478042>
24. Lwin K., Murayama Y. A GIS approach to estimation of building population for micro-spatial analysis // *Transaction in GIS*. 2009 [Текст]. Vol. 13, n. 4. P. 401-414. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01171.x>
 25. Lo C.P. Population estimation using geographically weighted regression // *Journal of GIScience and Remote Sensing*. 2008. Vol. 45. P. 131-148. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.2.131>
 26. 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) [Текст] // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*. Вип. 59. Харків: ХНУ, 2023. С. 27-41. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-11>.
 27. Mashhoodi B., Stead D., van Timmeren A. Spatial homogeneity and heterogeneity of energy poverty: a neglected dimension [Текст] // *Annals of GIS*. 2019. Vol. 25, no. 1. P. 19-31. <https://doi.org/10.1080/19475683.2018.1557253>
 28. Noppachai W., Wongsai S., Apiradee L., McNeil D., Huete A.R. Impacts of spatial heterogeneity patterns on long-term trends of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) land surface temperature time series [Text] // *Journal of applied remote sensing*. 2020. Vol. 14, no 1. P. 014513. <https://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.14.014513>
 29. Qui F., Woller K.L. Modeling urban population growth from remotely sensed imagery and TIGER GIS Road Data [Текст] // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2003. Vol. 69. P. 1031-1042. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.69.9.1031>
 30. Kostrikov S. ELiT, multifunctional web-software for feature extraction from 3D LiDAR point clouds [Текст] / S. Kostrikov, R. Pudlo, D. Bubnov, V. Vasiliev // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9. No.11. P. 650-885. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi9110650>
 31. D.C. Open Source Data on Amazon S3. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://aws.amazon.com/ru/blogs/publicsector/lidar-data-for-washington-dc-is-available-as-an-aws-public-dataset/>
 32. Dobson J.E. In harm's way: estimating populations at risk. In: *Tools and Methods for Estimating Populations at Risk from Natural Disasters and Complex Humanitarian Crises*. Edited by: National Research Council, Washington, DC, USA, The National Academies Press. 2007. P. 183-191.
 33. Eicher C.L., Brewer C.A. Dasymetric Mapping and Areal Interpolation: Implementation and Evaluation [Текст] // *Cartography and Geographic Information Science*. 2013. Vol. 28(2), 125138. <https://doi.org/10.1559/152304001782173727>
 34. Menis J. Dasymetric mapping for estimating population in small areas [Текст] // *Geography Compass*. 2009. Vol. 3, no. 2. P. 727-745. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00220.x>
 35. Robinson C., Hohman F., Dilkina B. A deep learning approach for population estimation from satellite imagery [Текст] // *Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL Workshop on Geospatial Humanities, GeoHumanities'17*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2017. P. 47-54. <https://dx.doi.org/10.1145/3149858.3149863>
 36. Zhuang H., Liu X., Yan Y., Ou J., He J., Wu C. Mapping multi-temporal population distribution in China from 1985 to 2010 using Landsat images via deep learning [Текст] // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. P. 3533. <https://doi.org/10.3390/rs13173533>
 37. Lu W., Weng Q. An ANN-based method for population Dasymetric mapping to avoid the scale heterogeneity: A case study in Hong Kong, 2016-2021 [Текст] // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2024. Vol. 108. P. 102072. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2024.102072>
 38. Wu S., Qiu X., Wang L. Population estimation methods in GIS and remote sensing: A review [Текст] // *GIScience and Remote Sensing*. 2005. Vol. 42. P. 80-96. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.42.1.80>
 39. Biljecki F., Arroyo Ohori K., Ledoux H., Peters R., Stoter J. Population Estimation Using a 3D City Model: A Multi-Scale Country-Wide Study in the Netherlands [Текст] // *PLOS ONE*. 2016. Vol. 11(6): e015688. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156808>
 40. Костріков С.В. 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 / С.В. Костріков, Д.С. Серьогін, К.О. Кравченко. – Харків, 2023. – 460 с.
 41. MassGIS Data: 2010 U.S. Census. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mass.gov/info-details/massgis-data-2010-us-census>
 42. USGS Data. [Електронний ресурс] – Режим доступу: ftp://rockyftp.cr.usgs.gov/vdelivery/Datasets/Staged/Elevation/LPC/Projects/USGS_LPC_MA_Sndy_CMPG_2013_LAS_2015/laz/

Sergiy Kostrikov

DSc (Geography), Professor, Kostyantyn Niemets Department of Human Geography and Regional Studies, V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine
 e-mail: sergiy.kostrikov@karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4236-8474>

Denys Serohin

PhD Student, Kostyantyn Niemets Department of Human Geography and Regional Studies, V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine
 e-mail: denys.serohin@student.karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0169-4468>

LOCALIZED URBOGEOSYSTEMIC ANALYSIS THROUGH LiDAR DATA FOR FORMALIZED URBAN POPULATION ESTIMATION

Our paper makes focus on the further research of the urban geosystem approach potential in the domain of social-geographical research through the combined application of GIS tools and the results of urban remote sensing (URS). The challenges of urban studies demand innovative methods for estimating population, which can be based on the building geometry and the architectural morphology of the city reconstructed on the URS base.

Proceeding from this, the aim of the paper is to represent localized urban geosystem analysis (LUGA), which is implemented on the largest geospatial scale of the given UGS. LUGA includes the use of area-metric (AMM) and volume-metric methods (VMM) for calculating the population in urban buildings and, thus, in a certain parcel of urbanized geospace. The latter can be considered the smallest structural unit of the detailed-grid representation of the digital urbanized environment (UE).

This study corresponds to one of the main postulates of urban geosystem analysis, according to which the formalization of UGS attributive characteristics occurs in various geolocations of the UE. The existing theoretical prerequisites of LUGA have been considered. Based on previous research experience, a thesis description of three alternative methods for assessing urban population distribution based on the "RS⇌GIS" paradigm has been proposed. Regarding the M1 LUGA technique, which is a further development of "micro-spatial GIS analysis," and its two parametric methods (AMM and VMM), a detailed description of their operational sequence and formalized apparatus have been provided. A block diagram of the step-by-step implementation of both methods is presented with detailed explanations of each stage. An example of LUGA implementation concerning a user scenario for assessing the distribution of urban population in the Boston agglomeration (Massachusetts, USA) has been provided. Pictures of the Cloud GIS-platform sample interface have been presented.

Keywords: *urban population distribution assessment, localized urban geosystem analysis, lidar data, cloud GIS platform, three-dimensional scene, urbanized environment.*

References:

1. Kostrikov, S., Niemets, L., Sehida, K. [and other]. (2018). Geoinformation approach to the urban geographic system research (case studies of Kharkiv region). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 49, 107-124. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09>
2. Kostrikov, S., Pudlo, R., Kostrikova, A., & Bubnov, D. (2019). Studying of urban features by the multifunctional approach to LiDAR data processing. *Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, Vannes, France. 1-4. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2019.8809063>
3. Kostrikov, S. (2019). Urban remote sensing with LIDAR for the Smart City concept implementation. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 50, 101-124. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-08>
4. Kostrikov, S., Bubnov, D., Kostrikova, A., & Pudlo, R. (2018). ELiT web-application – the software for urban environment modeling and analysis. *GIS Forum – 2018*, 55-59.
5. Serohin, D., & Kostrikov, S. (2023). Towards urbanistic geosituation delineation. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 58, 241-256. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-19> [in Ukrainian].
6. Serohin, D., & Kostrikov, S. (2023). Spatial assessment of buildings energy consumption based on three-dimensional modeling of the urban environment. *Human Geography Journal*, 34, 27-41. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-01>
7. Kostrikov, S., Serohin, D., & Berezhnoy, V. (2021). Visibility analysis of the urbanistic environment as a constituent of the urboecosystems approach. *Human Geography Journal*, 30(1), 7-23. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01> [in Ukrainian].
8. Sampath, A., & Shan, J. (2010). Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial LIDAR point clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 48(3), 1554-1567. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030180>
9. Lozić, E. (2021). Application of airborne LiDAR data to the archaeology of agrarian land use: the case study of the early medieval microregion of Bled (Slovenia). *Remote Sens*, 13, 3228. <https://doi.org/10.3390/rs13163228>
10. Morar, C., Lukic, T., Valjarevic, A., Niemets, L., Kostrikov, S., Sehida, K., Telebienieva, I., Kluchko, L., Kobylina, P., & Kravchenko, K. (2022). Spatiotemporal Analysis of Urban Green Areas Using Change Detection: A Case Study of Kharkiv, Ukraine. *Front. Environ. Sci*, 10, 823129. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.823129>
11. Loh, H., James, D., Ioki, K., Wong, W., Tsuyuki, S., & Phua, M.H. (2021). Estimating above-ground biomass changes in a human-modified tropical montane forest of Borneo using multi-temporal airborne LiDAR data. *Remote Sens. Appl.: Soc. Environ*, 28, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100821>
12. Desthieux, G., Carneiro, C., Camponovo, R., Ineichen, P., Morello, E., Boulmier, A., Abdennadher, N., Dervev, S., & Ellert C. (2018). Solar Energy Potential Assessment on Rooftops and Facades in Large Built Environments Based on LiDAR. Data, Image Processing, and Cloud Computing. Methodological Back-ground, Application, and Validation in Geneva (Solar Cadaster). *Front. Built Environ*, 4. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00014>
13. Bakula, K., Pilarska, M., Ostrowski, W., Nowicki, A., & Kurczyński, Z. (2020). UAV LiDAR data processing: influence of flight height on geometric accuracy, radiometric information and parameter setting in DTM production. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XLIII-B1, 21-26. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-21-2020>
14. Massoud, A., Fahmy, A., Iqbal, U., Givigi, S., & Noureldin, A. (2023). Real-time safe landing zone identification based on Airborne LiDAR. *Sensors*, 23(7), 3491. <https://doi.org/10.3390/s23073491>
15. Maas, H., & Vosselman, G. (1999). Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*, 54, 153-163. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00004-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00004-0)
16. Kim, K., & Shan, J. (2011). Building footprints extraction of dense residential areas from LiDAR data. *Ann. Conf. Am. Soc. Photogram. Remote Sens*, WI, 193-198.
17. Maltezos, E., & Ioannidis, C. (2016). Automatic extraction of building roofs from Airborne LiDAR data applying and extend-

- ed 3D randomized Hough transform. *ISPRS Annals*, III-3, 209-216. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-209-2016>
18. Kada, M. (2022). 3D reconstruction of simple buildings from point clouds using neural networks with continuous convolutions (convpoint). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XLVIII-4/W4-2022, 61-66. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-61-2022>
 19. Yanga, B., Haalab, N., & Donga, Z. (2023). Progress and perspectives of point cloud intelligence. *Geospatial information science*, 26(2), 189-205. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2175478>
 20. Kostrikov, S., & Seryogin, D. (2022). Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. *Urban Agglomeration*. Edited by A. Battisti and S. Baiani: Intech Open, London, Milan, Zagreb. 251-273. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102482>
 21. Harvey, J.T. (2002). Population estimation models based on individual TM pixels. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 1181-1192.
 22. Dong, P., Ramesh, S., & Nepali, A. (2010). Evaluation of small area population estimation using LiDAR, Landsat TM and parcel data. *International Journal of Remote Sensing*, 31, 5571-5586. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2010.496804>
 23. Smith, S.K., & Mandell, M. (1984). A comparison of population estimation methods: housing unit versus component II, ratio correlation and administrative records. *Journal of American Statistical Association*, 79, 282-289. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1984.10478042>
 24. Lwin, K., & Murayama, Y. (2009). A GIS approach to estimation of building population for micro-spatial analysis. *Transaction in GIS*, 13(4), 401-414. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9671.2009.01171.x>
 25. Lo, C.P. (2008). Population estimation using geographically weighted regression. *Journal of GIScience and Remote Sensing*, 45, 131-148. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.2.131>
 26. Kostrikov, S., Kravchenko, K., Serohin, D., Bilianska, S., & Savchenko, A. (2023). The performance of the digital city projects in urban studies of the megalopolises (the case studies of Kharkiv and Dnipro cities). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 59, 140-165. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-11>
 27. Mashhoodi, B., Stead, D., & van Timmeren A. (2019). Spatial homogeneity and heterogeneity of energy poverty: a neglected dimension. *Annals of GIS*, 25(1), 19-31. <https://doi.org/10.1080/19475683.2018.1557253>
 28. Noppachai, W., Wongsai, S., Apiradee, L., McNeil, D., & Huete A.R. (2020). Impacts of spatial heterogeneity patterns on long-term trends of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) land surface temperature time series. *Journal of applied remote sensing*, 14(1), 014513. <https://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.14.014513>
 29. Qui, F., & Woller, K.L. (2003). Modeling urban population growth from remotely sensed imagery and TIGER GIS Road Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 1031-1042. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.69.9.1031>
 30. Kostrikov, S., Pudlo, R., Bubnov, D., & Vasiliev, V. (2020). ELiT, multifunctional web-software for feature extraction from 3D LiDAR point clouds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 650-885. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi9110650>
 31. D.C. Open Source Data on Amazon S3. Retrieved from <https://aws.amazon.com/ru/blogs/publicsector/lidar-data-for-washington-dc-is-available-as-an-aws-public-dataset/>
 32. Dobson, J.E. (2007). In harm's way: estimating populations at risk. In: *Tools and Methods for Estimating Populations at Risk from Natural Disasters and Complex Humanitarian Crises*. Edited by: National Research Council, Washington, DC, USA, *The National Academies Press*, 183-191.
 33. Eicher, C.L., & Brewer, C.A. (2013). Dasymeric Mapping and Areal Interpolation: Implementation and Evaluation. *Cartography and Geographic In-formation Science*, 28(2), 125-138. <https://doi.org/10.1559/152304001782173727>
 34. Menis, J. (2009). Dasymeric mapping for estimating population in small areas. *Geography Compass*, 3(2), 727-745. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00220.x>
 35. Robinson, C., Hohman, F., & Dilkina B. (2017). A deep learning approach for population estimation from satellite imagery. *Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL Workshop on Geospatial Humanities, GeoHumanities '17*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 47-54. <https://dx.doi.org/10.1145/3149858.3149863>
 36. Zhuang, H., Liu, X., Yan, Y., Ou, J., He, J., & Wu, C. (2021). Mapping multi-temporal population distribution in China from 1985 to 2010 using Landsat im-ages via deep learning. *Remote Sensing*, 13, 3533. <https://doi.org/10.3390/rs13173533>
 37. Lu, W., & Weng, Q. (2024). An ANN-based method for population Dasymeric mapping to avoid the scale heterogeneity: A case study in Hong Kong, 2016–2021. *Computers, Environment and Urban Systems*, 108, 102072. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2024.102072>
 38. Wu, S., Qiu, X., & Wang L. (2005). Population estimation methods in GIS and remote sensing: A review. *GIScience and Remote Sensing*, 42, 80-96. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.42.1.80>
 39. Biljecki, F., Arroyo Ohori, K., Ledoux, H., Peters, R., & Stoter, J. (2016). Population Estimation Using a 3D City Model: A Multi-Scale Country-Wide Study in the Netherlands. *PLOS ONE*, 11(6), e015688. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156808>
 40. Kostrikov, S.V., Serohin, D.S., & Kravchenko, K.O. (2023). Workshop on creating GIS maps, spatial analysis and geoprocessing on full-format GIS platforms (using the example of ArcGIS 10.2 and QGIS 3.16): Educational and methodological manual for university students. Kharkiv, 499 [in Ukrainian].
 41. MassGIS Data: 2010 U.S. Census. (2012). Mass.gov. Retrieved from <https://www.mass.gov/info-details/massgis-data-2010-us-census>
 42. USGS Data. Retrieved from ftp://rockyftp.cr.usgs.gov/vdelivery/Datasets/Staged/Elevation/LPC/Projects/USGS_LPC_MA_Sndy_CMPG_2013_LAS_2015/laz/

Received 15 March 2024

Accepted 28 April 2024