

**Денис Серьогін**

аспірант кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства,  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна,  
e-mail: [den.seryogin@gmail.com](mailto:den.seryogin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0169-4468>

**Сергій Костріков**

д. геогр. н., професор кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства,  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна,  
e-mail: [sergiy.kostrikov@gmail.com](mailto:sergiy.kostrikov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4236-8474>

**ПРОСТОРОВА ОЦІНКА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЗАБУДОВ НА ПІДСТАВІ  
ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА**

У статті подається підхід до застосування просторової оцінки енергоспоживання (ЕС) міських забудов та урбогеосистемного аналізу отриманих результатів. Оцінка ЕС будівель передбачає встановлення кореляційної залежності між їх енерговитратами та відповідними геометричними характеристиками, зокрема висотою та об'ємом забудови. Для автоматизованого виокремлення з високою точністю цих характеристик будівель авторами пропонується використання даних дистанційного лазерного сканування (лідарних даних). Наведено оригінальний підхід до обробки та аналізу лідарних даних інструментами авторського веб-ГІС додатку з метою виокремлення та моделювання будівель. Побудовані моделі будівель зберігають у якості атрибутів їх точні геометричні характеристики та узагальнені архітектурні властивості. Подається методика розрахунку ЕС будівель, в якій використовується їх геометрична інформація, та інформація щодо їх віку й типу, які також є кореляційно залежними з енерговитратами будівель.

За отриманою з лідарних даних геометрією будівель визначається показник їх корисної площі (призначеної для опалення). Для оцінки ЕС приймаються дані щодо енергоспоживання будівель з реальних показників лічильників, які екстраполюються на розрахований показник корисної площі будівель. Побудовано семантичну таблицю, яка корелює розрахований показник ЕС будівлі, в залежності від її віку й типу, та визначає остаточний клас енергоефективності будівлі. За наведеними методиками побудовано та візуалізовано тривимірні моделі забудов для міст Амстердам та Ейндховен, із застосованою кольоровою гамою до будівель, що відображає класи їх енергоефективності. Розкрито сутність урбогеосистемного аналізу міського середовища у контексті дослідження міського ЕС. На підставі отриманої візуалізації просторового розподілу міського ЕС виокремлено певні закономірності такого розподілу між окремими міськими забудовами та визначено фактори, що впливають на рівень даного показника.

**Ключові слова:** оцінка енергоспоживання будівель, урбогеосистема, лідарні дані, просторовий аналіз, тривимірне моделювання будівель, ГІС.

**Як цитувати:** Серьогін, Д., Костріков, С. (2023). Просторова оцінка енергоспоживання забудов на підставі тривимірного моделювання міського середовища. *Часопис соціально-економічної географії*, 34, 27-41. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-03>

**In cites:** 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 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-03>

**Постановка проблеми.** Разом зі стрімкою урбанізацією та зростанням чисельності міського населення у сучасних містах зростає енергоспоживання (ЕС) будівель, що призводить до збільшення викидів парникових газів та негативно впливає на навколишнє середовище. Причому серед будівель, як правило, найбільш масштабними споживачами енергії є житлові забудови. Наприклад, лише в Німеччині згідно з деякими джерелами це значення досягає 20%, і з них до 75% загального обсягу енергоспоживання витрачається на опалення житла [8]. Ця проблема може бути частково вирішена шляхом реконструкції окремих будівель з метою підвищення їхньої енергоефективності, а також розміщення місцевих альтернативних джерел енергії, наприклад сонячних генераторів. Однак, для цього потрібне чітке відстеження рівня ЕС тієї чи іншої будівлі протягом року, та розуміння

того, які саме будівлі та міські райони потребують вжиття вказаних реабілітаційних заходів.

Відстеження просторового розподілу рівня ЕС по урбанізованих територіях у середовищі геоінформаційної системи (ГІС) може суттєво сприяти вирішенню даного питання, а саме: полегшити виявлення міських районів та окремих типів забудови з надмірним рівнем ЕС, відстежити фактори, що впливають на зростання ЕС у тій чи іншій ділянці, розробити рішення щодо оптимізації поточної ситуації з надмірним ЕС, а також запобігти подібним проблемам при майбутньому міському плануванні. Однак, для картографування рівня ЕС на ГІС-платформі необхідна певна методика автоматизованого розрахунку (оцінки) цього показника і приведення його у якості атрибутивної характеристики до просторової одиниці

міста, що картографується, наприклад – до окремої будівлі.

У якості такої методики, може бути розглянутий 3D-просторовий підхід до оцінки енергоспоживання будівель, який передбачає наявність високої кореляції цього показника з об'ємом будівель та деяку його залежність від додаткових семантичних характеристик будівель – віку та типу будівлі. В одній із статей нами вже задіявся аналогічний підхід для оцінки чисельності населення в житлових забудовах, який передбачав пропорційний розподіл переписного населення за будинками залежно від їхнього об'єму [18]. Інформація про об'єм будівель була вилучена з даних лідарної зйомки (*LiDAR, Light Detection and Ranging* – англ.), яка можливо є найефективнішим джерелом геометричних даних про міську забудову, оскільки підлягає автоматизованому 3D-моделюванню міського середовища в спеціальних ГІС-додатках, а також фіксує високоточні геометричні характеристики будівель, у тому числі і об'єм. З урахуванням вищесказаного, доцільним буде адаптувати існуючі напрацювання з аналізу та обробки лідарних даних для просторової оцінки енергоспоживання будівель у даній статті.

Крім того, у низці наших попередніх публікацій застосування (імплементация) лідарних даних у міських дослідженнях нами виконувалося через впровадження урбогеосистемного підходу [1, 3, 17]. У даному підході міста розуміються як урбогеосистеми, які моделюють у ГІС урбанізовані території у вигляді сукупності точкових, лінійних та полігональних ГІС-примітивів у двовимірному просторі та псевдовекторних 3D-примітивів у тривимірному просторі. При цьому, така дискретна (квазівекторна) модель протиставляється континуальній (квазірастровій) моделі урбаністичного середовища, як формалізованої моделі реально існуючого міського середовища. Зазначений підхід до моделювання міста дозволяє виконувати його урбогеосистемний аналіз у ГІС-середовищі, що полягає в визначенні певних властивостей міста і його окремих компонентів, які можуть бути виокремлені лише через його ГІС-моделювання та аналіз. В якості окремого структурного інваріанту урбогеосистеми нами також визначалася категорія урбаністичної геоситуації, яка характеризує окремі, локалізовані, урбогеосистемні властивості та підкреслює їх динамічний характер й залежність від впливу навколишнього міського довкілля [3].

Повертаючись до дослідження просторового розподілу рівня ЕС у міському середовищі, зазначимо, що саме впровадження урбогеосистемного підходу може стати ефективним шляхом для відстеження проблем надмірного ЕС забудов, та пошуку рішень щодо оптимізації поточної ситуації. Таким чином, з урахуванням вищезазначеного, **метою** даної статті є впровадження урбогеосистемного підходу у його окремі предметні площини просторового аналізу й оцінки енергоспоживання забудов на підставі ГІС-моделювання та аналізу результатів обробки даних лідарної зйомки.

**Аналіз попередніх досліджень.** Використання геометричних характеристик будівель як орієнтовно-

го показника їхнього потенційного енергоспоживання розглядалося раніше в багатьох дослідженнях. У ряді публікацій наголошується на використанні *CityGML* стандартів для отримання топологічно цілісних моделей будівель [11, 14]. Залежно від рівня деталізації, такі моделі можуть містити інформацію про площу, висоту, об'єм, не тільки цілих будівель, а й окремих кімнат будівель, що суттєво уточнює потенційні розрахунки енергоспоживання. У розрахунках ЕС будівель можуть використовуватися досить складні моделі, що передбачають, як, наприклад, втрати тепла як через зовнішню оболонку будівлі [25, 27], так і такі, які навіть враховують загальний енергетичний баланс будівлі [14]. У підходах, що описуються, важливим аспектом було визначення сегментів моделі будівлі, що є відповідно внутрішніми / зовнішніми стінами, дахом і підлогою. З урахуванням цих параметрів генерувалися структуровані моделі, для яких застосовувалися дві моделі розрахунку ЕС: модель 1 – розрахунок ЕС на опалення, враховуючи лише втрати через зовнішню оболонку оточення будівлі та розрахунок, який враховує вже повний енергетичний баланс будівлі, у тому числі втрати при транспортуванні енергії для опалення, втрати у вентиляційній мережі, а також пряме нагрівання будівлі від сонця [27]. Порівняння розрахунків із реальними показниками лічильників показав цілком чітку кореляцію, де модель 2 виявилася помилковою лише меншою ніж 10%.

У низці публікацій також досліджувалась залежність рівня енергоспоживання будівлі від її віку [9, 27]. Наприклад, вказується, що оскільки в Німеччині переважна частина житлових забудов старше 30 років, то значна частина енергії, яка йде на опалення, може бути зекономлена, оскільки існує чітка закономірність – чим старша будівля, тим більше енергії витрачається на її опалення за інших рівних умов. Так, в одній із публікацій наводиться таблиця порівняння енергоспоживання в  $kWh/m^2a$  – значення варіюють від 250-280 одиниць для будинків, збудованих наприкінці 19 століття, до 70-90 одиниць для будинків, збудованих після 1995 року.

В іншому дослідженні, крім віку будівлі, також розглядалися й інші індикатори визначення рівня ЕС у будинках [19]. Зокрема, одним із найважливіших індикаторів виділено тип будівлі – як раніше вже зазначалося, житлові будинки в середньому демонструють більший рівень ЕС, порівняно з іншими типами забудови, але навіть у межах житлового типу виділяється низка підтипів із власним середнім рівнем ЕС, який виділяє їх від інших підтипів. Так, в одному дослідженні, на підставі реальних показників лічильників, сформовано таблицю середнього ЕС для різних типів будівель: одиночні будинки, стрічкова забудова, невеликі будинки на кілька сімей, великі будинки на кілька сімей [7, 20]. Кожен із перелічених підтипів забудови показав стійкий середній показник ЕС, який надалі можна екстраполувати на інші території зі схожою забудовою.

У ще одному дослідженні, для оцінки ЕС будівель бралися до уваги також геометричні та морфологічні характеристики самого міського середовища,

в якому знаходилися будинки. Зокрема, бралися до уваги показник затінення міського середовища, ефективність міської системи ЕС для опалення та поведінка людей, які мешкають у досліджуваних районах. Значним чином, на думку авторів, на розподіл ЕС також впливає співвідношення загальної поверхні забудов до їх загального об'єму, визначене за *DEM/DSM*. Загальна закономірність полягає в тому, що чим менше відношення поверхні забудов до їх об'єму, тим менше втрати тепла при ЕС будівель та споруд [23].

Достатньо відомий підхід у просторовому моделюванні міського ЕС – моделювання, засноване на Агентах (*Agent Based Modeling* – англ.), яке використовується разом із 3D морфологічним аналізом для побудови т.зв. «Смарт-Гридів» розподілених енергетичних систем [6]. Кожна модель будівлі, яка виступає «агентом моделювання», окрім параметрів геометричної та просторової семантики (об'єм, форма, орієнтація тощо), інтегрує у собі також «агенти опалення». Останні містять інформацію про температуру всередині будівлі та споживаної енергії та зв'язуються безпосередньо з шаром ліній електропередач та теплотрас через *ArcGIS – Agent Analyst*. Тобто цей підхід дозволяє не просто змоделювати ЕС будівель, а й простежити зв'язність поточної обстановки з існуючою міською інфраструктурою енергопостачання.

Ще один цікавий підхід полягає у застосуванні фізичних моделей ЕС та втрат тепла будівель. В одному з досліджень, зокрема, йдеться про три методи побудови фізичних моделей: вузловий метод, де весь об'єм будівлі розглядається як однорідний простір; зональний метод, що розглядає будівлю як різномірний простір із різними зонами (поверхами, кімнатами), що мають власні характеристики фізичних моделей; *CFD*-метод (*Computational Fluid Dynamic* – англ.), що розбиває будівлі на безліч осередків – контрольних зон із власними параметрами фізичних моделей [10]. Таким чином, чим більше подрібнюється будівля на зони, тим більш детальним виходить аналіз ЕС, включаючи навіть локальні перепади температур у межах однієї кімнати. Тут також застосовуються *CityGML*-моделі, від *LOD1* для вузлового методу, до *LOD4* для *CFD*.

Наступний наведений нами приклад дослідження ЕС полягає в автоматичному розрахунку ЕС будівель за однозональними *CityGML* моделям на певну область інтересу, що є найближчим зразком до нашого власного підходу. Для побудови моделей будівель тут також використовувалися дані лідарної зйомки, а додаткові семантичні характеристики постачалися муніципалітетом та експортувалися з семантичних бібліотек [10, 20, 29]. У рамках такого прикладу в першу чергу збираються необхідні семантичні дані (функціональне призначення будівлі, будівництво тощо). Далі виконується морфологічний аналіз будівель в контексті міського доквілля, у якому вони знаходяться (морфологічні особливості окремої будівлі, топологічні особливості сукупності забудов - експозиція їх фасадів, ефект затінення і т.д.). Оцінка ЕП будівель в рамках цього спрощеного підходу здійснювалася розчином повного теплового балансу,

в якому негативна компонента передбачає визначення втрат на передачу тепла і втрати через вентиляційну систему, а позитивна – надходження тепла від джерел обігріву і від сонячної радіації.

У найпростішому випадку в рамках цього прикладу розглядалося до 17 тис. будівель і приймалося, що будівлі з моменту побудови не піддавалися капітальному ремонту для підвищення свого енергозбереження. Таким чином, головною особливістю даного підходу є врахування інформації про реконструкцію будівель з метою підвищення ефективності їхнього енергозбереження. За результатами моделювання було встановлено середню величину ЕС в  $30 \text{ kWh/m}^2.\text{yr}$  для будівель, які у нещодавні роки було реконструйовано для підвищення енергоефективності. Також було змодельовано середнє значення  $200 \text{ kWh/m}^2.\text{yr}$  для будівель, які не піддавалися такій реконструкції. Приклад інтерфейсу візуалізації наведеної методики був однією із складових, що бралися нами за основу при імplementації можливих рішень відповідного користувацького сценарію із застосуванням веб-інструментів геопорталу, у створенні якого автори приймали безпосередню участь:

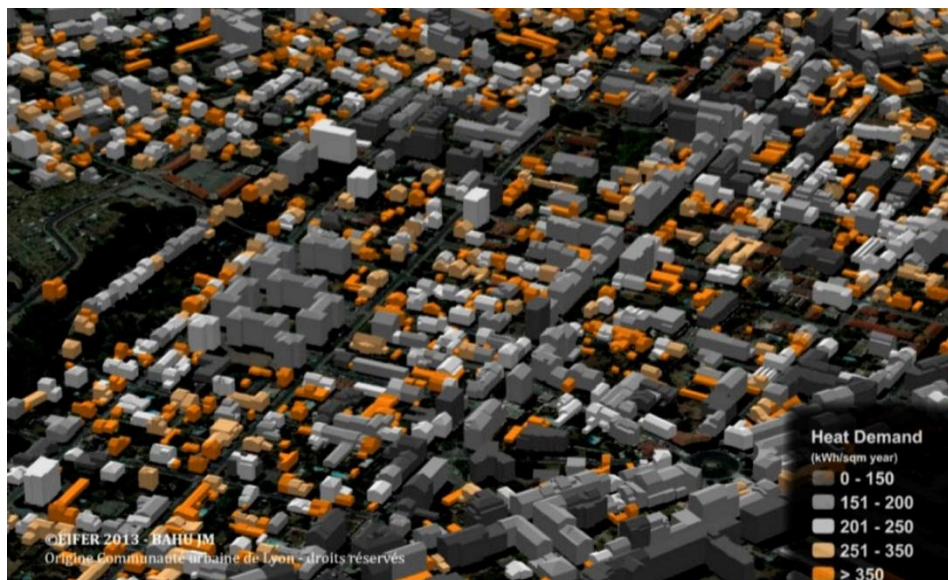
Запропонований нами відповідний предметний підхід включає деякі напрацювання і спостереження, зазначені в наведених вище дослідженнях. Зокрема, для розрахунків беруться до уваги спостереження по залежності рівня енергоспоживання будівель від віку та типу будівель. Включивши ці характеристики в якості атрибутів моделей будівель, ми зможемо певним чином відкалібрувати рівень ЕС будівлі, розрахований спочатку від її об'єму. У якості моделей будівель нами приймаються розраховані за власною методикою моделі, що відповідають стандарту *CityGML (LOD1 і LOD2)*. Такі моделі хоч і є «однозональними», можуть бути розбиті на окремі блоки із застосуванням інформації про кількість поверхів у будівлі, отриманої із зовнішніх джерел. Таким чином, наша оцінка ЕС спирається на відомості про співвідношення віку та типу будівель з ЕС, отриманих в результаті реальних вимірювань лічильниками, а також на інформацію про об'єм будинків, що опалюється, виокремлену з даних лідарних зйомки й уточнену інформацією про кількість поверхів у будівлі.

**Виклад основного матеріалу. Низькополігональне моделювання будівель для подальшого розрахунку енергоспоживання.** Базовим шаром для виконання просторової оцінки енергоспоживання забудов є набір низькополігональних моделей будівель, виокремлених в результаті обробки та аналізу лідарних даних. Зазначені процедури нами виконуються за допомогою інструменту *Building Extraction Rural Area (BERA)* в авторській веб-ГІС *EOS LiDAR Tool* [16]. Функціональність даного інструменту полягає в складних алгоритмах сегментації мари точок шляхом виокремлення та кластеризації точок, які належать певній площині. Даний підхід до моделювання будівель зосереджено на узагальненні архітектурних властивостей будівель із збереженням їх ключових геометричних характеристик. Таке спрощене моделювання, у свою чергу, дозволяє за відносно короткі терміни обробляти великі масиви лідар-

них даних та генерувати в результаті значну кількість моделей, що суттєво полегшує оцінку енергоспоживання для територій великих високоурбанізованих міст [15].

Для моделювання набору будівель інструмент *BERA* приймає на вхід два типи даних: *LAS*-файли, які, власне, містять хмару точок, що описує тривимірний відбиток земної поверхні, відсканованої під час

лідарної зйомки; та *SHP*-файли, які містять футпринти будівель (векторні 2D-контури будівель), що входять до екстенду поданих *LAS*-файлів. Футпринти тут є допоміжними об'єктами, які дозволяють відфільтрувати і витягти з хмари точок лише ті її фрагменти, які відносяться до будівель. Далі саме за цими фрагментами виконуються процедури моделювання архітектури будівель, зокрема моделювання дахів.



**Рис. 1. Інтерфейс візуалізації результатів ЕС забудов на підставі однозонального моделювання за стандартами CityGML [6, с. 38]**

**Fig. 1. Interface for visualizing the results of buildings EC based on single-zone modeling according to CityGML standards [6, p. 38]**

Загалом існує декілька підходів до низькополігонального моделювання будівель, кожен з яких налаштований або на геометричну точність виокремлених моделей, або на топологічну коректність форми будівель, або ж на швидкість обробки даних [12, 24, 29, 31]. Найбільш ж загально відомі підходи, що знаходяться також й в рамках модельних методів із [12, 24, 29, 31], можна розділити на *підходи, що ґрунтуються на моделях* (model-driven – *англ.*) й *підходи, що ґрунтуються на даних* (data-driven – *англ.*).

На підставі власних знань щодо даної предметної галузі, автори вважають що існує два категорійних підходи до реконструкції будівель та їх дахів - *геометричний*: побудова геометрії даху по точках з даної Хмари; або *топологічний*: визначення яка фігура з гіпотетичного каталогу примітивів (бібліотеки) краще за всіх наближає дану хмару точок. Зрозуміло, що в даному випадку мова йде про *Single Cloud* (*англ.*) – одна Хмара точок = одна модельна сутність.

В іншій статті [30] підкреслюється наявність різних алгоритмів, серед яких найвідомішими називаються алгоритми *RANSAC* (*RANdom Sample Consensus* – *англ.*) та сімейство алгоритмів Перетворення Хафа (Hough – *англ.*) (SHT, RHT), яке отримало подальший розвиток у декілька наступних років [21]. Безумовно, треба мати на увазі існування підходів, що поєднують в собі різні методи. Треба окремо підкреслити, що ані *RANSAC*, ані *SHT* не можуть бути застосовні до *city block scope* (моделювання у

масштабі усього міста) в силу низької швидкості, однак алгоритм *RHT* покликаний вирішити цю проблему. Особливістю цього алгоритму є те, що він є однопрохідним. Треба окремо зауважити, що автори статті [21] використовували *RANSAC* як метод для порівняльного аналізу результатів зі своїми інноваційними підходами (новий, ґрунтуючись лише на обмеженому наборі ключових (на їх думку) параметрів: максимумі кутової девіації між площинами двох граней даху, максимальний технічний допуск та ін. Для порівняльного аналізу двох методів (*RANSAC* та інноваційний *RHT*) ці автори використовували класифікацію неповних площин (*inaccurate planes* – *англ.*) за оригінальним методом: виділялися несегментовані площини, недостатньо сегментовані, надмірно сегментовані і помилкові площини. Певним недоліком зазначеної статті [21], на нашу думку, є занадто вже непряме посилання на перший досвід комбінованого використання алгоритмічних методів *RANSAC* і Трансформації Хафа для реконструкції будівель з *LiDAR PC* [28].

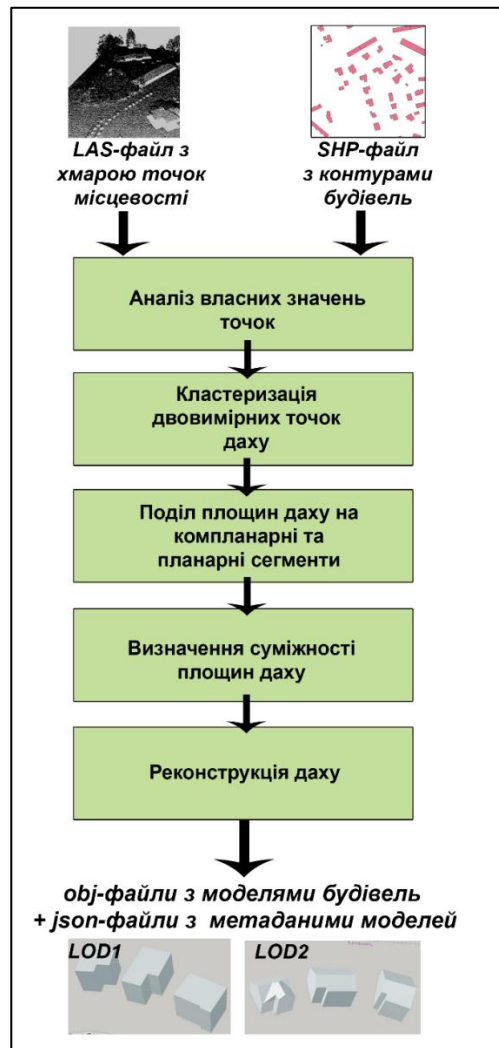
В якості узагальнення цього стисло оглядового вступу до викладення основного матеріалу нашої статті зробимо висновок про те, що в переважній більшості як теоретичних вишукувань, так і практичних прикладів якісь окремі «алгоритми реконструкції дахів» розроблялися лише в окремих випадках. Найчастіше дахи реконструювалися як окремий компонент в рамках лінії шляху виконання загального

алгоритму екстракції будівель.

При розробці інструменту *BERA* нами впроваджувалися оновлення й оптимізація деяких із вказаних підходів до моделювання будівель, один з яких буде частково описано далі.

Оскільки до моделювання приймаються фрагменти хмари точок, які вже обрізані по реальному контуру будівлі, процедури моделювання, що залишилися, зводяться лише до моделювання даху будівлі по поданому фрагменту хмари точок. Суть цього моделювання полягає у знаходженні у хмарі точок площин дахів, їх сегментації та об'єднанні у топологічно коректну форму даху. Певні складності в моделюванні полягають у тому, що вихідна хмара точок може мати низьку щільність точок, що ускладнює виявлення площин дахів, або ж у хмарі можуть міс-

титися точки, що не відносяться до будівлі (наприклад, дерева, що покривають футпринт будівлі), які перешкоджають коректному визначенню форми даху. Все це може призвести до помилкового моделювання форми будівлі і відповідно до помилкового визначення його об'єму та висоти, тому для регулювання таких проблем в алгоритм привносяться певні оптимізаційні рішення. Наш підхід ґрунтується на аналізі власних значень точок для визначення їх відношення до реальних площин даху та подальшої їх кластеризації та сегментації за виявленими площинами. Весь процес моделювання проходить через 5 умовних процедур: аналіз власних значень точок, кластеризація двовимірних точок, поділ площин даху на компланарні та планарні сегменти, визначення суміжності площин даху, реконструкція даху (рис. 2).



**Рис. 2. Операційна послідовність низькополігонального моделювання будівель на підставі обробки лідарних даних**

**Fig. 2. Operational sequence of low-polygon modeling of buildings based on LiDAR data processing**

Аналіз власних значень, передбачає побудову полігонів Вороного за всіма точками вказаного даху. Кожен такий полігон замикає область навколо кожної точки хмари таким чином, що кожна точка в межах цієї області ближче до цієї точки хмари, ніж будь-якої іншої точки хмари. Якщо точка з таким полігоном оточена точками з такими ж полігонами –

значить вона відноситься до площини даху, інакше ж ця точка відноситься до будь-яких неплосинних елементів хмари точок, наприклад, до ребрів між площинами даху, певних шумових точок або дерев [24]. У результаті всі точки поділяються на дві умовні групи: двовимірні точки (що належать до площин) і тривимірні (що не належать до площин).

Наступним етапом є кластеризація двовимірних точок, яка полягає в розбитті всіх отриманих раніше двовимірних точок на кластери, кожен з яких характеризує окрему площину даху. Для цього застосовується метод *k-means*, який враховує відстань усіх точок до центрів кластерів, а також їхню топологічну вагу (розмірність), розраховану раніше за допомогою полігонів Вороного. В результаті, залежно від густини точок, виділяється та чи інша кількість площин даху.

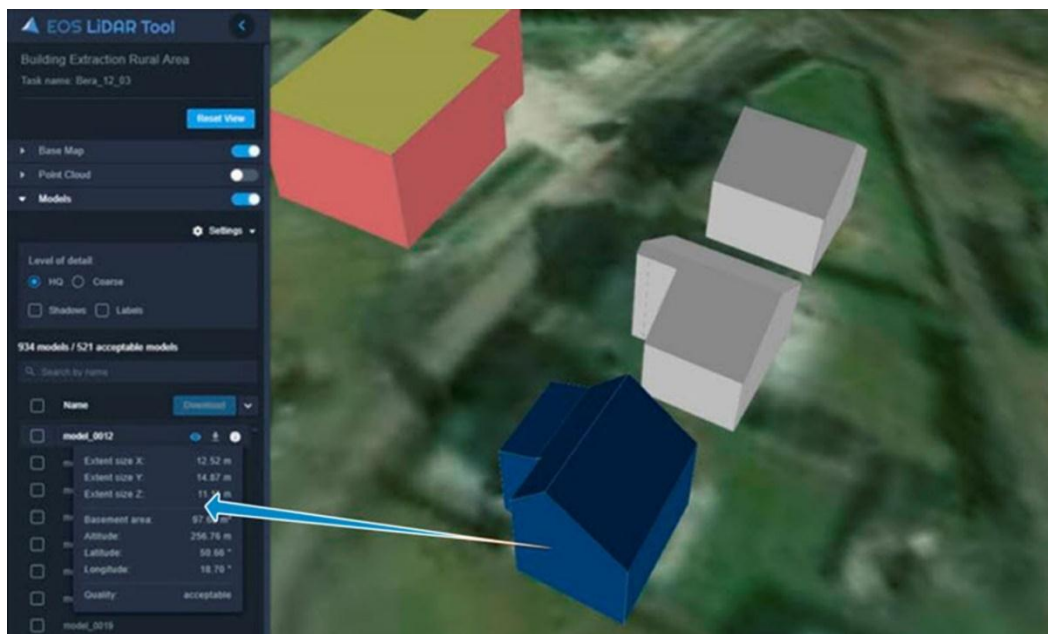
Далі виконується поділ отриманих площин на окремі компланарні та планарні сегменти за допомогою аналізу зв'язності. Для цього з отриманих тривимірних точок створюються лінійні об'єкти, які розмежують і замикають площини даху. В результаті генеруються паралельні та компланарні сегменти, які є конструктивними елементами будівлі, що моделюється.

Для подальшого з'єднання отриманих площин у топологічно коректну форму даху виконується процедура визначення суміжності площин. Даний етап полягає у визначенні суміжних точок з двох сусідніх площин, за якими ці площини будуть з'єднуватися. Для цього за наявними точками знову будуються

полігони Вороного, за якими у якості суміжних точок беруться тільки ті точки, полігони яких матимуть спільні ребра. Таким чином, якщо ж точки не мають спільних ребер – це означає, що їх сегменти не приликають один до одного. Ця процедура дозволяє успішно обробляти різні проблемні фрагменти хмари точок, наприклад, з низькою щільністю, або з різними перешкодами, або прогалинами.

Кінцевим етапом є безпосередньо реконструкція даху зі сформованих раніше сегментів та визначеної суміжності між ними. Зовнішні стіни моделі будівлі визначаються його футпринтом, витягуються до передбачуваної висоти будівлі, витягнута з відповідного фрагмента хмари точок, і замикаються з даховими площинами, формуючи кінцеву *LOD2* модель будівлі. На випадок, якщо алгоритму не вдалося успішно обробити фрагмент хмари точок і витягти з нього топологічно коректний багатосхилий дах, кінцева модель генерується з призматичним дахом, витягуючи футпринт будівлі по висоті фрагмента хмари точок, і генеруючи тим самим *LOD1* модель.

В результаті генерується набір моделей реальних будівель, точкові хмари яких були відскановані за допомогою лідарної зйомки (рис. 3).



**Рис. 3.** Низько-полігональні моделі забудови передмістя, візуалізовані у середовищі веб-ГІС EOS LiDAR Tool геопортал. Модель будівлі з плоским дахом – неуспішна. По обраній будівлі (темно-синя) візуалізуються її просторові й геометричні атрибути

**Fig. 3.** Low polygon models of suburban buildings visualized in the EOS LiDAR Tool geoportals web-GIS environment. The model of a flat-roofed house is unsuccessful. The selected house (dark blue) visualizes its spatial and geometric attributes

Залежно від складності архітектури будівлі, а також від успішності виконання алгоритму моделювання моделі можуть мати різний рівень деталізації (*LOD1* або *LOD2*) або бути згенерованою у вигляді неуспішної модельної сутності, яка взагалі-то відповідатиме тому саме *LOD1* (рис. 3). При цьому переважання моделей *LOD1* далеко не завжди буде вказувати на невдало виконане моделювання – часто через специфіку міської забудови самі будівлі мо-

жуть дійсно мати призматичну форму даху, а значить і моделі матимуть примітивну форму, що відповідає *LOD1*.

До побудованих моделей у форматі *obj* додається *json*-файл, який містить різні метадані про моделі, включаючи координати, площу, висоту та об'єм, які надалі використовуються для розрахунку ЕС будівлі

Узагальнення змісту алгоритму, який знаходиться в основі *BERA*-функціональності, можна зро-

бити наступним чином. Кожна імплементація цього алгоритму вилучення моделей складатиметься з наступних етапів:

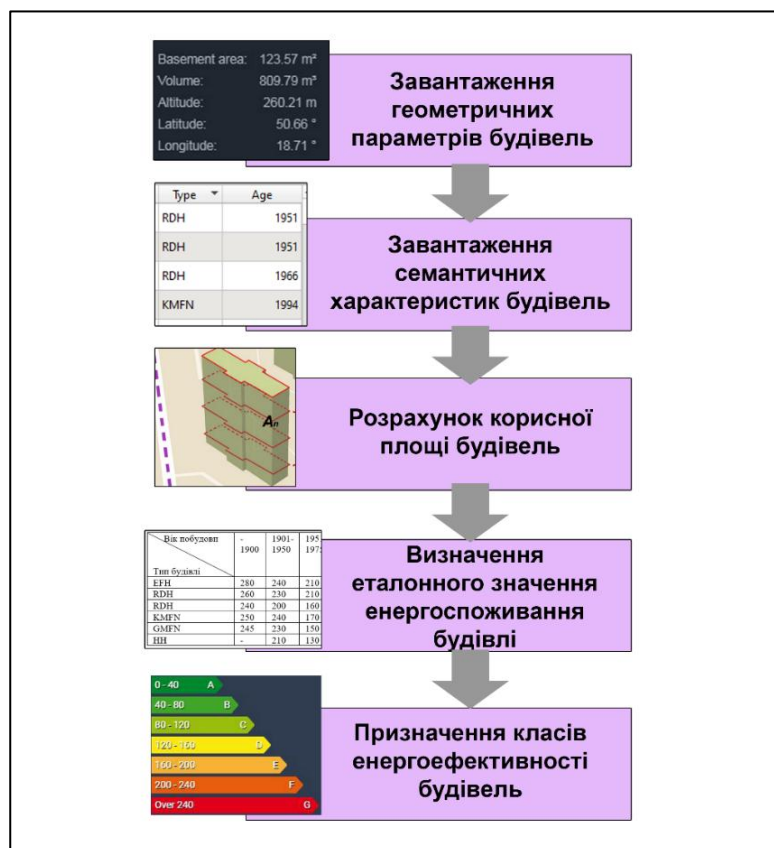
1. *Передпроцесінг – підготовка даних.* Сюди входить попереднє очищення вихідної хмари точок від рослинності та інших «шумів» і поділ її на безліч хмар, що містять по одній будівлі кожна.

2. *Сегментація хмари точок* - поділ точок будівлі на *планарні* кластери точок. Сюди входить вибір точок, побудова площин, поділ *копланарних* ділянок.

3. *Створення підсумкової низько-полігональної моделі.* Сюди входить побудова матриць суміжності, визначення опорних точок і ребер, додавання стін, експорт в загальноприйнятий формат для подальшого просторового аналізу.

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

Розрахунок енергоспоживання будівель може бути виконаний у настільному ГІС-середовищі, наприклад, *QGIS*, із завантаженням у нього всіх геометричних характеристик будівель, отриманих в результаті тривимірного моделювання даних лідарної зйомки, та семантичних характеристик, завантажених у шар будівель із сторонніх джерел. Таким чином, базовим просторовим шаром, необхідним для розрахунку енергоспоживання будівель, є, власне, квазі-векторний шар будівель (3D об'єкти не є векторними у звичайному розумінні цього терміну). Це може бути або набір футпринтів будівель, що використовуються насамперед для їхнього тривимірного моделювання, або набір центроїдів цих будівель. Розрахунок оцінки ЕС, за умови наявності всіх вищезазначених даних, може бути виконаний через 5 послідовних етапів (рис. 4).



**Рис. 4. Послідовність процедур для виконання оцінки ЕС будівель на підставі їх геометричної та семантичної інформації**

**Fig. 4. A sequence of procedures for performing assessment buildings EC based on their geometric and semantic information**

*Завантаження геометричних параметрів будівель.* Дані про висоту, площу та об'єм будівель, отримані в результаті обробки лідарних даних, були занесені в *json*-файли, що додаються до кожної моделі. У цих текстових файлах дані зберігаються у форматі ключ-значення (наприклад, "volume": 200), список яких може бути винесений з усіх *json*-файлів до єдиного *csv*-файлу за допомогою елементарного *python*-скрипту. Так як у *json*-файлах, серед іншого, містяться XY-координати кожної моделі, ми можемо згодом перетворити *csv*-файл у *QGIS*, зробивши його

шаром центроїдів будівель з прив'язаною до них геометричною інформацією (рис. 5).

У *QGIS* дана процедура виконується за допомогою інструменту *Add delimited text layer* – він екстрагує з *csv*-файлу поля з координатами і на їх основі генерує шар центроїдів з атрибутами, що витягнуті з інших колонок *csv*-файлу [2]. Далі, при необхідності, записи з центроїдів можуть бути перенесені у шар футпринтів будівель за допомогою інструменту *Add point attributes to polygons*.

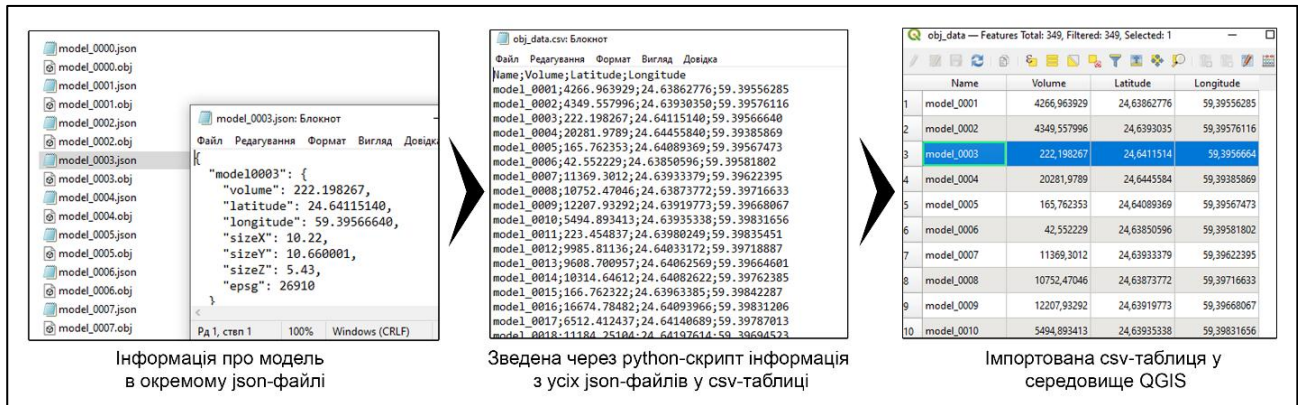


Рис. 5. Перетворення даних з json-файлу в атрибутивну таблицю у середовищі QGIS  
Fig. 5. Converting data from a json-file to an attribute table in QGIS

Завантаження семантичних характеристик. Окрім інформації про об'єм будівель для оцінки енергоспоживання ми використовуємо також інформацію про вік будівель та їх тип. Ці характеристики також впливають на рівень енергоспоживання тієї чи іншої будівлі, що було підтверджено у низці досліджень, розглянутих раніше у оглядовій частині статті. Так, середньорічне ЕС за класом житлової забудови за інших рівних факторів може бути на 15-30 % вище, ніж за класом комерційних (нежитлових) будівель [8, 13, 20, 26]. Що ж до віку будівлі, то тут зовсім простежується чітка і цілком зрозуміла закономірність підвищення середньорічного ЕС будівлі разом із підвищенням віку будівлі [8, 14].

Дані про тип будівель можуть бути завантажені з *OpenStreetMap*, а потім адаптовані під типологічну класифікацію будівель, яка застосовується до будівель у тих німецьких вимірах енергоспоживання, на які спираються наші розрахунки енергоспоживання [7]. Усього, згідно з такою класифікацією, ми можемо виділити 5 класів житлової забудови: *EFH* – приватний будинок на одну сім'ю, *RDH* – ряд об'єднаних малоповерхових будинків (стрічкова забудова), *KMFN* – невеликий багатоквартирний будинок (від 2 до 6 квартир); *GMFN* – великий багатоквартирний будинок (до кількох сотень квартир); *HN* – багатоповерховий багатоквартирний будинок, (більше сотні квартир); і окремий клас комерційної забудови *RDH*.

Дані про вік будівель можуть бути завантажені з різних відкритих комерційних чи державних, муніципальних баз даних та геопорталів. Наприклад, дані про вік будівель у Нідерландах можуть бути отримані з веб-ресурсу *3DBAG* [4].

Тип та вік будівлі заносяться до атрибутивної таблиці шару будівель у якості окремих атрибутів. Далі вони використовуватимуться у розрахунках ЕС як параметри, які коригуватимуть розрахований на основі об'єму будівлі очікуваний рівень ЕС.

Додатково до таблиці атрибутів може бути завантажена інформація про кількість поверхів у будівлі, якщо вона доступна для даної локації в *OpenStreetMap*, або в будь-якому іншому джерелі даних. В іншому випадку очікувана кількість поверхів у будинках може бути обчислена з об'єму та висоти будівлі.

Розрахунок корисної площі будівлі. Ключовим параметром для оцінки ЕС за тривимірними моделями будівель є корисна площа будівлі (призначена для опалення площа). Цей показник використовується в стандартах економії ЕС *EnergieEinspar Verordnung, EnEV*, і бере участь безпосередньо в розрахунку ЕС будівель в  $\text{kWh/m}^2\text{a}$  (кіловат-годин спожитої енергії на одиницю корисної площі на рік). Показник корисної площі для окремої будівлі може бути розрахований за такою формулою (з позначень *EnEV* [7]):

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

де,  $A_N$  – це корисна площа будівлі,  $V_e$  – загальний об'єм будівлі, отриманий на основі лідарних даних,  $h_G$  – середня висота поверхів у даній будівлі, отримана шляхом поділу висоти будівлі на кількість поверхів у ньому,  $m$  – одиниця метри. Значення 0.04 – еталонний коефіцієнт теплоопору огорожувальних конструкцій будівлі (*R-value*). Середня висота поверхів у будівлі для даної формули розраховується наступним чином:

$$h_G = \frac{h_B}{n}$$

де,  $h_G$  – середня висота поверху в будівлі,  $h_B$  – висота будівлі, вилучена з 3D-моделі будівлі,  $n$  – кількість поверхів у будівлі. Якщо показник  $n$  невідомий, можна з додаткових джерел визначити приблизну середню висоту поверхів у будівлях даної локації, і зворотнім чином визначити кількість поверхів, поділивши висоту будівлі на середню кількість поверхів.

Всі ці розрахунки можуть бути виконані прямо в середовищі *QGIS* за допомогою калькулятора полів, з подальшим внесенням отриманих значень у відповідні поля атрибутів для кожної будівлі.

Визначення еталонного значення енергоспоживання будівлі. Для оцінки енергоспоживання будинками нами приймаються реальні показники теплоізоляційників будинків (загальний обсяг спожитого тепла на будинок на рік) у  $\text{kWh/m}^2\text{a}$ , зібрані у Німеччині [7]. Ці показники були розраховані для безлічі будинків різного віку та типів, що дозволило сформувати таблицю усереднених еталонних значень ЕП у співвідношенні віку та типу будівель (таблиця 1). Хоча



ця таблиця була сформована на основі вимірювань електроспоживання в Німеччині, в цілому вона може бути застосована і для інших країн ЄС, зі схожим кліматом і міською забудовою.

У згаданих німецьких дослідженнях питома значення енергоспоживання будинком розраховується шляхом розподілу цієї величини на корисну площу будівлі. Нами ж виконується зворотнє завдання –

за розрахованою з моделей будівель корисної площі та наведеними у таблиці шаблонними показниками  $kWh/m^2$  розраховується загальний обсяг енергоспоживання будівлі. Інформація про тип та вік будівель, занесена раніше до таблиці атрибутів, використовується для визначення цього шаблонного показника для тієї чи іншої моделі.

Таблиця 1

**Еталонні значення енергоспоживання будівель відносно їх типу та віку (складено за даними [7, 8, 20])**  
**Reference values of buildings EC in relation to their type and age (compiled from [7, 8, 20])**

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 забудова)	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

**Призначення класу енергоефективності.** На основі розрахованого рівня енергоспоживання кожній будівлі призначається один із семи стандартизованих класів енергоефективності, які використовуються фактично у всіх країнах ЄС у єдиній колірній гамі [7]. Попередня візуалізація результатів просторової оцінки енергоспоживання може бути виконана у QGIS (у 2D форматі). Для тривимірної візуалізації, розрахований рівень енергоспоживання передається назад в json-файли розрахованих моделей за допомогою спеціального python-скрипта. Крім показника EC, до json-файлів можуть бути передані й інші характеристики будівель, що беруть участь у розрахунках, для кращого розуміння залежності цих характеристик та рівня EC.

Після того, як усі розраховані дані передаються моделям будівель, виконується перетворення моделей формату *obj* у формат *glTF*, а потім у формат *b3dm* для оптимізованої візуалізації результатів у 3D-сцені веб-ГІС *ELiT Geoportal*, реалізованої на базі JavaScript-бібліотеки *Cesium* (рис. 6). У середовищі *ELiT Geoportal* моделі спільно відображаються як у *LOD1*, так і в *LOD2* форматі, а також у кольоровій гамі відповідних класів енергоефективності. До кожної моделі у спеціальному спливаючому вікні також додається вся атрибутивна інформація, передана через json-файл. Отримавши таку візуалізацію просторового розподілу енергоспоживання, ми можемо розпочати змістовний урбогеосистемний аналіз даного міста в контексті дослідження проблем енергоспоживання його забудовами.

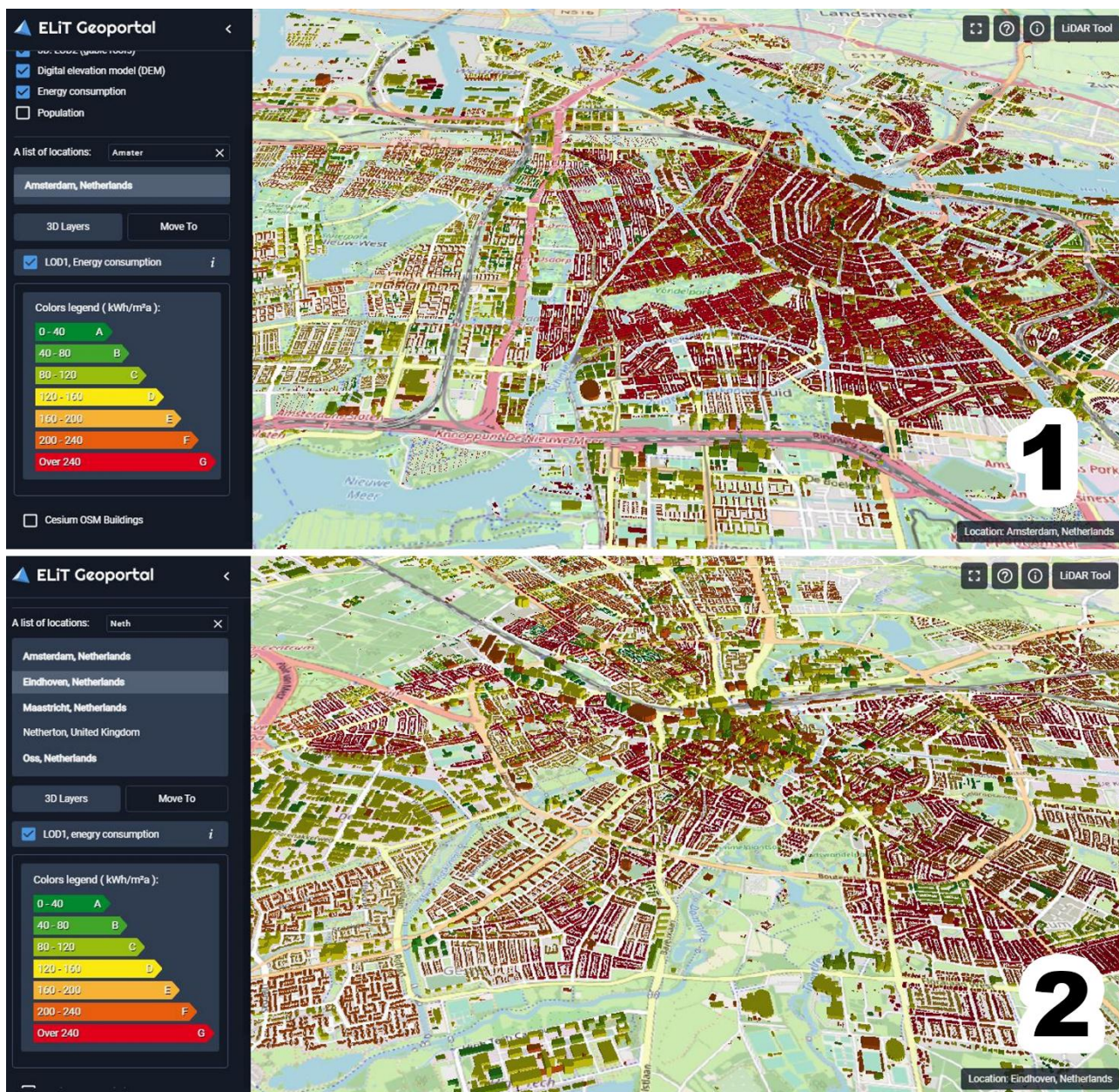
**Урбогеосистемний аналіз результатів просторової оцінки енергоспоживання.** На основі викладених раніше методик низькополігонального моделювання будівель та оцінки EC будівель за геометрією розрахованих моделей, нами були побудовані та візуалізовані тривимірні моделі забудови для двох міст у Нідерландах – Амстердам та Ейндховен.

До карт було застосовано колірну гамму, що відображає рівень енергоефективності кожної будівлі. Для міст Ейндховен та Амстердам сумарно було розраховано близько 330 тис. моделей будівель, що повністю покривають урбанізовані частини цих міст. Лідарні дані для моделювання були завантажені з веб-ресурсу *Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)* [5], а атрибутивні дані зі згаданого раніше *3DBAG* та *OpenStreetMap* [4, 22]. Крім самих моделей будівель, на карту також завантажена підкладка *OpenStreetMap*, що відображає різні міські об'єкти у 2D-форматі.

Урбогеосистемний аналіз у даному випадку полягатиме у детальному вивченні даної візуалізації з наступними цілями:

- 1) виокремлення різних просторових та мікропросторових закономірностей у розподілі рівня енергоспоживання по всій території міста;
- 2) вилучення урбаністичних геоситуацій – різних обмежених ділянок міського середовища, які за певними параметрами виділяються із навколишнього середовища;
- 3) відстеження просторових залежностей між окремими будинками та геоситуаціями з навколишнім середовищем з метою з'ясування можливих причин поточної ситуації.
- 4) відстеження залежностей між формою та розмірами будівель з рівнем їх енергоспоживання.

Перевагою такої детальної візуалізації, при якій кожна будівля відображає атрибутивну характеристику, є можливість проведення як повномасштабного просторового аналізу, з виокремленням загальних закономірностей розподілу енергоспоживання між цілими міськими районами та функціональними зонами, так і мікропросторового аналізу, з виокремленням локальних закономірностей на рівні окремих геоситуацій.



**Рис. 6. Тривимірна візуалізація результатів оцінки енергоспоживання забудов у середовищі ELiT Geoportal для міст Амстердам (1) та Ейндховен (2)**

**Fig.6. Three-dimensional visualization of the results of the assessment buildings energy consumption in the ELiT Geoportal environment for the cities of Amsterdam (1) and Eindhoven (2)**

Якщо розглядати модель міста в повному масштабі, то насамперед можна відзначити тенденцію до зниження середнього рівня ЕС від центру міста до периферії, що обумовлюється зниженням віку забудови при віддаленні від історичного центру в ході природного міського розширення (рис. 7, 1). Молодші будівлі є більш модернізованими та енергоефективними і відповідно демонструють менший рівень споживаної енергії. При цьому у центральній частині міста спостерігаються кластери забудови з найвищим рівнем енергоспоживання – такі ділянки відповідають районам, забудованим старими, історичними будинками, яким властива низька енергоефективність (рис. 7, 6).

Загалом у такому масштабі спостерігаються цілі райони забудови, що мають переважно спільний

рівень ЕС – такі райони можуть мати спільне функціональне призначення (наприклад, комерційні, індустріальні зони), мати спільні особливості планування, або спільний період забудови (рис. 7, 2). При цьому, дослідивши перепади в середньому ЕС між окремими районами, ми можемо винести певні припущення щодо того, який тип забудови є найбільш енергоефективним у межах цього міста, а який є найбільш проблемним і потребує заходів щодо можливої реконструкції.

Якщо виконати масштабування на окремі міські райони та геоситуації, то можна буде простежити цікаві мікропросторові закономірності та спостереження. Наприклад, у самому центрі ми спостерігаємо поєднання нової та старої забудови, а також багатоповерхової та малоповерхової забудови (рис. 7, 5).

Нова багатоповерхова забудова споживає помітно менше енергії в порівнянні з розташованою впритул старою, проте вона може негативно впливати на

стару забудову, створюючи для неї постійне затінення і перешкоджаючи тим самим природному утепленню будинків від надходження сонячного світла.



**Рис. 7. Особливості просторового розподілу енергоспоживання у м. Амстердам та Ендховен.  
Fig. 7. Features of the spatial distribution of EC in Amsterdam and Eindhoven.**

Ще одним спостереженням на рівні окремих геоситуацій є чергування у межах одного району будинків із високим (клас *F*) і низьким (клас *C*) рівнем ЕС (рис. 7, 3). При цьому така мінливість рівня ЕС є чітко синхронізованою з мінливістю архітектурних особливостей будівлі, які простежуються навіть за *LODO* моделями. Ця мінливість насамперед зумовлена різним попитом на енергію тієї чи іншої будівлі в межах району, залежно від функціонального призначення будівлі та кількості мешканців, яка в ній може

проживати. Так, з огляду на особливості планування, в межах одного району по черзі розміщуються будинки з різною місткістю мешканців, крім того, серед житлової забудови систематично розміщуються різні комерційні та державні заклади, які орієнтуються на обслуговування місцевих мешканців. Іноді різний рівень ЕС зустрічається навіть у кількох корпусів однієї і тієї ж будівлі. Зокрема, спостерігаються ситуації, де будівля з високим рівнем ЕС має прибудову, що відрізняється більшою енергоефективністю,

порівняно з основною будівлею.

Якщо поглянути на забудову індустріальних зон, то тут також можна виявити деякі мікропросторові закономірності, а саме – суттєве розкидання показників ЕС між різними корпусами в межах однієї індустріальної зони (рис. 7, 4).

Так значення ЕС між двома сусідніми будинками розбігаються від класу А до класу G. З можливих причин такого перепаду можна висунути різне призначення того чи іншого корпусу та різну специфіку виробничих процесів, що відбуваються в цих корпусах, і мають різну потребу споживання енергії. Одна будівля може бути відведена під склад і споживати мало енергії, інша – під виробничі верстати і, таким чином, споживати багато енергії.

На мікропросторовому рівні також помітна різниця в тому, як розподіляються показники електроенергії за *LOD1* та *LOD2* моделями. Другі мають більшу різноманітність форм і конфігурацій будівель і демонструють значну диференціацію оцінки ЕС. Тоді як *LOD1* моделі є більш уніфікованими, через що в результаті розрахунку підпадають під спільний клас ЕС. Крім того, моделі *LOD2* дозволяють краще візуально ідентифікувати тип будівлі, адже відображають більшу кількість параметрів будівель.

Детальний розбір результатів моделювання, наведений у цьому розділі дозволяє не просто описати та оцінити поточну обстановку в місті, але й розробити певні оптимізаційні рішення, які можуть бути використані в прикладній площині. Наприклад, державні органи можуть використовувати результати такого аналізу для розвантаження міської енергосистеми, планування реновації старих будівель з метою підвищення їхньої енергоефективності, планування розміщення зелених насаджень, розміщення сонячних електростанцій. Різні будівельні компанії можуть орієнтуватися на результати оцінки при проектуванні нових, більш енергоефективних будівель та районів. Розрахований показник ЕС будівлі також може стати важливим фактором при купівлі чи оренді нерухомості, а повномасштабна тривимірна візуалізація розподілу цього показника може показати найперспективніший район міста для проживання, бізнесу та виробництва. В цілому, така систематизація та картографування розподілу міського ЕП може стати однією з базових потреб міст, що розвиваються, і фактично необхідною складовою міст, які претендують на статус «Розумних міст», у яких важливу роль відіграє постійний моніторинг міського стану.

**Висновки.** В умовах стрімкого розростання урбанізованих територій, повсюдного зростання залежності людини від постачання електрики, збільшення попиту на альтернативні джерела енергії, а також розширення енергоемності сучасних технологій,

питання контролю рівня міського енергоспоживання є безумовно актуальним. Розглянута у статті методика оцінки та аналізу енергоспоживання міською забудовою може стати важливим кроком у цьому напрямі, а також до розуміння існуючої проблематики нерівномірного споживання енергії між окремими міськими складовими.

Отримані в ході нашого дослідження результати, хоча і не претендують на надвисоку точність, все одно здатні передати загальну просторову картину міського ЕС та наочно відобразити ті явні слабкості в енергоефективності міського середовища в цілому, які можуть бути виявлені лише у їхньому просторовому розподілі. Окрім того, описана методика є лише проміжним варіантом методики оцінки ЕС, які надалі можуть удосконалюватися шляхом збільшення вибірки зібраних даних з реальних показників лічильників та прийняття у розрахунках все більшої кількості коригуючих змінних. Наприклад, коригувально оцінки сприятимуть дані про локальні кліматичні зони міста, більш деталізовані дані про типи будівель, дані про наявність ремонту, про теплопровідність будівельних конструкцій, тощо.

Безумовною перевагою запропонованого підходу до оцінки ЕС є можливість автоматизувати основні процедури обробки, розрахунків та візуалізації даних, минаючи при цьому трудомісткий процес збирання таких даних із показників лічильників кожної окремої будівлі. Спираючись на одноразово зібрані дані лічильників, ми можемо багаторазово екстраполювати ці дані на безліч локацій зі схожим кліматом, рівнем розвитку та міською забудовою, а потім, у разі виникнення певних питань, можна вже звернутися до реальних лічильників у конкретних міських локаціях для уточнення та підтвердження виконаної оцінки.

Нарешті, окрім безпосереднього обчислення характеристик ЕС та їх просторової візуалізації, важлива також їх правильна інтерпретація та аналіз, що було зроблено нами через урбогеосистемний підхід. Урбогеосистемна модель міста дозволяє нашвидку оцінити візуалізовану міську обстановку з погляду системних властивостей урбанізованої території та динаміки міського розвитку. Розуміючи предметний зміст цих аспектів, ми можемо на підставі просторових закономірностей і тенденцій простежувати їх зв'язок з навколишнім міським середовищем і шукати причини їх виникнення в емерджентних властивостях урбогеосистеми міста. Окремі аспекти впливу останніх у тому числі і на просторовий розподіл ЕС міської забудови були нами виокремлені для міст Амстердам та Ейндховен у заключному пункті цієї статті.

#### Список використаної літератури:

1. Костріков С., Сergyogin Д., Бережний В. Візуальний аналіз урбаністичного середовища як складова урбогеосистемного підходу // Часопис соціально-економічної географії. 2021. Вип. 30(1). С. 7-23. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01>
2. 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. Сergyogin, К.О. Кравченко. Харків, 2022. 499 с.

3. Сergyogin D.S., Kostrikov S.V. До питання виокремлення урбаністичних геоситуацій [Текст] // 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>
4. 3D geoinformation at TU Delft. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3d.bk.tudelft.nl/>
5. ArcGIS web application. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>
6. Bahu J.M. Towards a 3D spatial urban energy modelling approach [Текст] / J.-M. Bahu, A. Koch, E. Kremers, S.M. Murshed // International journal of 3-D information modeling. 2014. Vol. 3, no. 3. P. 1-16. <https://doi.org/10.4018/ij3dim.2014070101>
7. Bundesrepublik Deutschland (BRD). Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung- EnEV). Bundesgesetzblatt, 2007. vol. 282/07. 170 p. URL: [https://enevonline.net/enev\\_2007/enev2007\\_070425\\_bundesregierung\\_beschlossen.pdf](https://enevonline.net/enev_2007/enev2007_070425_bundesregierung_beschlossen.pdf)
8. Carrión D., Lorenz A., Kolbe T.H. Estimation of the energetic state of buildings for the city of Berlin using a model represented in 3D city CityGML [Текст] // International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2010. Vol. XXXVIII-4, no. 15. P. 31-35.
9. Döllner J. The virtual 3D city model of Berlin - Managing, Integrating and communicating complex urban information / J. Döllner J., T. Kolbe, F. Liecke et al // In Proceedings of the 25th International Symposium on Urban DataManagement UDMS, Aalborg, Denmark, 15-17 May 2006.
10. Fouquier A. et al. State of the art in building modelling and energy performances prediction: a review [Текст] / A. Fouquier, S. Robert, F. Suard, L. Stephan, A. Jay Renewable and sustainable energy reviews. 2013. Vol. 23. P. 272-288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.004>
11. Gröger, G., Kolbe, T., Czerwinski, A., Nagel, C. OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 1.0.0, International OGC Standard [Текст]. Open Geospatial Consortium, Doc. 2008. No. 08-007r1
12. Henn A. Model driven reconstruction of roofs from sparse LiDAR point clouds [Текст] / A. Henn, G. Groger, V. Stroh, L. Pliimer // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 76. P. 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.004>
13. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze. Darmstadt, Germany. 2003. 10 p. URL: [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2003\\_IWU\\_Deutsche-Geb%C3%A4udetypologie-Systematik-und-Datens%C3%A4tze.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2003_IWU_Deutsche-Geb%C3%A4udetypologie-Systematik-und-Datens%C3%A4tze.pdf)
14. Jaffal I., Inard C., Ghiaus C. Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments [Текст] / I. Jaffal, C. Inard, C. Ghiaus // Energy and buildings. 2009. Vol. 41, no. 6. P. 669-677. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.01.006>
15. Kostrikov S. Automated Extraction of Heavyweight and Lightweight Models of Urban Features from LiDAR Point Clouds by Specialized Web-Software [Текст] / R. Pudlo, D. Bubnov, V. Vasiliev, Y. Fedayay //Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. 2020. Vol. 5. No. 6. P. 72-95. <http://dx.doi.org/10.25046/aj050609>
16. 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>
17. Kostrikov S. Urban remote sensing with LIDAR for the Smart City concept implementation [Текст] / S. Kostrikov // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія". 2019. Вип. 50. С. 101-124. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-08>
18. Kostrikov S., Seryogin D. Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. Urban Agglomeration [Текст] / Edited by A. Battisti and S. Baiani.- London – Milan – Zagreb: INTECH Open. 2022. P. 1-23. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102482>
19. Krüger, A., Kolbe, T.H. A Framework for the DataDriven Analysis, Interpretation, and Transformation of Geospatial Information Models [Текст] // Proceedings of the Joint Scientific Conference of the German Society for Photogrammetry, Remote Sensing & Geoinformation (DGPF), the Austrian Society for Surveying (OVG), and the Swiss Society for Photogrammetry and Remote Sensing (SGPF), Vienna 2010. – P. 309-324.
20. Loga T., Stein B., Diefenbach N., Born R. Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Deutsche Wohngebäudetypologie. 2016. 281 p. URL: <https://www.iwu.de/1/publications/research-information/gebaeudetypologie/>
21. Maltezos E. Automatic extraction of building roof planes from airborne lidar data applying an extended 3d randomized hough transform [Text] / E. Maltezos, C. Ioannidis // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol.III-3. P. 209-216. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-209-2016>
22. OpenStreetMap. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.openstreetmap.org/>
23. Ratti C., Baker N., Steemers K. Energy consumption and urban texture [Текст] / C. Ratti, N. Baker, K. Steemers // Energy and buildings. 2005. Vol. 37, no. 7. P. 762-776. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>
24. Sampath A. Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial LIDAR point clouds [Text] / A. Sampath, J. Sham // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol.48. No.3. P. 1554-1567. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030180>

25. Sarak H. The degree-day method to estimate the residential heating natural gas consumption in Turkey: a case study [Текст] // *Energy*. 2003. Vol. 28, no. 9. P. 929-939. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(03\)00035-5](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(03)00035-5)
26. Stadt Dortmund Umweltamt. Dortmundener Gebäudetypologie - Neuauflage der Hausdatenblätter. Dortmund, Germany. 2005.
27. Strzalka A. Schumacher, J. 3D City modeling for urban scale heating energy demand forecasting [Текст] / A. Strzalka, U. Eicker, V. Coors // *HVAC&R research*. 2011. Vol. 17, no. 4. P. 526-539. <https://doi.org/10.1080/10789669.2011.582920>
28. Tarsha-Kurdi F. Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from Lidar data [Текст] / F. Tarsha-Kurdi, T. Landes, P. Grussenmeyer // *IAPRSSIS*. 2007. Vol. XXXVI-3/W52. P. 407-412.
29. Yan J., Jiang W., Shan J. A global solution to topological reconstruction of building roof models from airborne LiDAR point clouds [Текст] // *ISPRS Ann. Photogram., Remote Sens.* 2016. Vol. 3. P. 379-386. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsannals-III-3-379-2016>
30. Yan J. Quality analysis on RANSAC-based roof facets extraction from airborne LIDAR data [Текст] / J. Yan, W. Jiang, J. Shan // *IAPRSSIS*. 2012. Vol. XXXIX-B3. P. 367-372.
31. Yu D., Fang C. Urban remote sensing with spatial big data: a review and renewed perspective of urban studies in recent decades [Текст] // *Remote Sens.* 2023. Vol. 15. 1307-1341. <https://doi.org/10.3390/rs15051307>

### **Denys Serohin**

*PhD Student of the Department of Human Geography and Regional Studies,  
V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine,  
e-mail: [den.seryogin@gmail.com](mailto:den.seryogin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0169-4468>*

### **Sergiy Kostrikov**

*DSc (Geography), Professor of the Department of Human Geography and Regional Studies,  
V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine,  
e-mail: [sergiy.kostrikov@gmail.com](mailto:sergiy.kostrikov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4236-8474>*

## **SPATIAL ASSESSMENT OF BUILDINGS ENERGY CONSUMPTION BASED ON THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE URBAN ENVIRONMENT**

The article deals with the application of spatial assessment of urban buildings energy consumption (EC) and analyzing the results based on the urbogeosystems approach. Assessment of buildings EC involves establishing a correlation between their EC and the relevant geometric characteristics, in particular, the buildings height and volume. The authors propose the use of remote laser scanning data (LiDAR data) for the automated extraction of these characteristics of buildings with high accuracy.

An original approach to processing and analyzing LiDAR data using the tools of the author's web-based GIS application for the purpose of buildings extraction and modeling is presented. The extracted building models contain their exact geometric characteristics and generalized architectural properties as attributes.

The article presents a methodology for calculating the EC of buildings, which uses their geometric information, as well as information on their age and type, which are also correlated with the buildings EC. Based on the buildings geometry obtained from LiDAR data, the indicator of their usable area (intended for heating) is determined. To estimate EC, data on the buildings EC are taken from real meter readings, which are extrapolated to the calculated indicator of the buildings usable area. A semantic table is created that corrects the calculated building EC, depending on its age and type, and determines the final energy efficiency class of the building.

According to the above methods, three-dimensional models of buildings for the cities of Amsterdam and Eindhoven were extracted and visualized, with the color scheme applied to the buildings reflecting their energy efficiency classes. The essence of the urbogeosystemic analysis of the urban environment in the context of the urban EC study is revealed. On the basis of the obtained visualization of the spatial distribution of urban EC, certain regularities of such distribution between individual urban buildings are identified and the factors influencing the level of this indicator are determined.

**Keywords:** *assessment of buildings energy consumption, urbogeosystem, LiDAR data, spatial analysis, GIS, three-dimensional building modeling, GIS.*

### **References:**

1. Kostrikov, S., Serohin, D., & Berezhnoy, V. (2021). Visibility analysis of the urbanistic environment as a constituent of the urbogeosystems approach. *Human Geography Journal*, 30(1), 7-23. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01> [in Ukrainian].
2. Kostrikov, S.V., Serohin, D.S., & Kravchenko, K.O. (2022). 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].
3. 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].
4. 3D geoinformation at TU Delft. Retrieved from <https://3d.bk.tudelft.nl>
5. ArcGIS web application. Retrieved from <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>
6. Bahu, J.-M., Koch, A., Kremers, E., & Murshed, S.M. (2014). Towards a 3D spatial urban energy modelling approach. *International journal of 3-D information modeling*, 3(3), 1-16. <https://doi.org/10.4018/ij3dim.2014070101>

7. Bundesrepublik Deutschland (BRD). (2007). Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung-EnEV). *Bundesgesetzblatt*, 282/07, 170 Retrieved from [https://enevonline.net/enev2007/enev2007\\_070425\\_bundesregierung\\_beschlossen.pdf](https://enevonline.net/enev2007/enev2007_070425_bundesregierung_beschlossen.pdf)
8. Carrión, D., Lorenz, A., & Kolbe, T.H. (2010). Estimation of the energetic state of buildings for the city of Berlin using a model represented in 3D city CityGML. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, XXXVIII-4(15), 31-35.
9. Döllner, J., Kolbe, T., Liecke, F. et al. (2006). 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*.
10. Fouquier, A., Robert, S., Suard, F., Stéphan, L., & Jay, A. (2013). State of the art in building modelling and energy performances prediction: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 23, 272-288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.004>
11. Gröger, G., Kolbe, T.H., Czerwinski, A., & Nagel, C. (2008). OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 1.0.0.
12. Henn, A., Gröger, G., Stroh, V., & P. Lutz. (2013). Model driven reconstruction of roofs from sparse LIDAR point clouds. *International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.004>
13. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). (2003). Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze. Darmstadt, Germany, 10. Retrieved from [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2003\\_IWU\\_Deutsche-Geb%C3%A4udetypologie-Systematik-und-Datens%C3%A4tze.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2003_IWU_Deutsche-Geb%C3%A4udetypologie-Systematik-und-Datens%C3%A4tze.pdf)
14. Jaffal, I., Inard, C., & Ghiaus, C. (2009). Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments. *Energy and buildings*, 41(6), 669-677. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.01.006>
15. Kostrikov, S., Pudlo, R., Bubnov, D., Vasiliev, V., & Feday, Y. (2020). Automated Extraction of Heavyweight and Lightweight Models of Urban Features from LiDAR Point Clouds by Specialized Web-Software. *Technology and Engineering Systems Journal*, 5(6), 72-95. <http://dx.doi.org/10.25046/aj050609>
16. 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>
17. Kostrikov, S. (2019). Urban remote sensing with LIDAR for the Smart City concept implementation. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series in Geology, Geography, and Ecology*, 50, 101-124. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-08>
18. Kostrikov, S., & Seryogin, D. (2022). Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. *Urban Agglomeration: INTECH Open*. 1-23. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102482>
19. Krüger, A., & Kolbe, T.H. (2010). A Framework for the DataDriven Analysis, Interpretation, and Transformation of Geospatial Information Models. *Proceedings of the Joint Scientific Conference of the German Society for Photogrammetry, Remote Sensing & Geoinformation (DGPF), the Austrian Society for Surveying (OVG), and the Swiss Society for Photogrammetry and Remote Sensing (SGPF)*, 309-324.
20. Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N., & Born, R. (2016). Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. *Deutsche Wohngebäudetypologie*, 281. Retrieved from <https://www.iwu.de/1/publications/research-information/gebaeudetypologie/>
21. Maltezos, E., & Ioannidis, C. (2016). 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*. III-3, 209-216. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-209-2016>
22. OpenStreetMap. Retrieved from <https://www.openstreetmap.org/>
23. Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and buildings*, 37(7), 762-776. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>
24. 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>
25. Sarak, H. (2003). The degree-day method to estimate the residential heating natural gas consumption in Turkey: a case study. *Energy*, 28(9), 929-939. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(03\)00035-5](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(03)00035-5)
26. Stadt Dortmund Umweltamt (2005). Dortmunder Gebäudetypologie – Neuaufgabe der Hausdatenblätter. Dortmund, Germany.
27. Strzalka, A., Bogdahn, J., Coors, V., & Eicker, U. (2011). 3D City modeling for urban scale heating energy demand forecasting. *HVAC&R research*, 17(4), 526-539. <https://doi.org/10.1080/10789669.2011.582920>
28. Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2007). Hough-transform and extended RANSAC algorithms for auto-matic detection of 3d building roof planes from Lidar data. *IAPRSSIS*. XXXVI-3/W52, 407-412.
29. Yan, J., Jiang, W., & Shan, J. (2016). A global solution to topological reconstruction of building roof models from airborne LiDAR point clouds. *ISPRS Ann. Photogram., Remote Sens*, 3, 379-386. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsannals-III-3-379-2016>
30. Yan, J., Jiang, W., & Shan, J. (2012). Quality analysis on RANSAC-based roof facets extraction from airborne LIDAR data. *IAPRSSIS*. XXXIX-B3, 367-372. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-367-2012>
31. Yu, D., & Fang, C. (2023). Urban remote sensing with spatial big data: a review and renewed perspective of urban studies in recent decades. *Remote Sens*, 15(5), 1307-1341. <https://doi.org/10.3390/rs15051307>

Received 15 April 2023

Accepted 18 May 2023