

Принципи обробки та тривимірного моделювання через лідарні дані для прикладних досліджень міського середовища

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, <https://orcid.org/0000-0002-0169-4468>

У статті розглядається один із видів дистанційного зондування Землі – лідарна зйомка, як спосіб дослідження міського середовища. Подається огляд методик, спрямованих на обробку лідарних даних та вилучення з них інформації про об'єкти міської місцевості. Коротко характеризується принцип роботи та особливості даних лідарного зондування, заснованих на отриманні інформації про віддалені об'єкти за допомогою лазерного сканування місцевості. Розкривається роль тривимірного моделювання через лідарні дані для різнопредметних міських досліджень. Описуються різні підходи до виокремлення будівель з наборів лідарних даних за допомогою фільтрації точок та сегментації дахів. Виокремлення тривимірних моделей будівель за певний часовий відрізок дозволяє також відстежити зміни у забудові місцевості за допомогою обробки у середовищі геоінформаційних систем (ГІС) цифрових моделей місцевості. У роботі наводиться приклад автоматизованої оцінки пошкоджень будівель з використанням лідарних даних та ГІС-засобів. Наводяться оптимізовані автором алгоритми вилучення доріг та ліній електропередавання за допомогою аналізу та фільтрації цифрових моделей поверхні. Відфільтровані цифрові моделі також можуть бути використані для моделювання ризиків міських повеней – у роботі коротко описуються дослідження на цю тему. Наводиться приклад застосування лідарних даних для оцінок чисельності населення та сонячної радіації за допомогою аналізу об'єму, площі будівель та будови дахів. Таке застосування можливе завдяки тому, що лідарні дані забезпечують надвисоку геометричну точність та архітектурну відповідність моделей будинків реальним об'єктам. У висновку, автором наголошується, що використання лідарної інформації істотно сприяє урбаністичним дослідженням та відкриває нові можливості. Також пропонується подальше застосування лідарних даних з метою виокремлення та аналізу урбогеосистемних властивостей міської забудови.

Ключові слова: лідар, ГІС, обробка лідарних даних, тривимірне моделювання, дистанційне зондування міського середовища, автоматизоване виокремлення будівель, урбогеосистема, урбаністичні дослідження.

Як цитувати: Серьогін Денис. Принципи обробки та тривимірного моделювання через лідарні дані для прикладних досліджень міського середовища / Денис Серьогін // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2022. – Вип. 57. – С. 218-233. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-17>

In cites: Serohin Denys (2022). Principles of processing and three-dimensional modelling through lidar data for applied research of the urban environment. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (57), 218-233. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-17> [in Ukrainian]

Вступ. У сучасних дослідженнях міст дедалі більше використовуються дані дистанційного зондування землі. Ефективність таких даних вже неодноразово була доведена у багатьох дослідженнях, пов'язаних з моніторингом міських змін, аналізом міської щільності, класифікацією міських ландшафтів, дослідженням фізико-хімічного складу міського середовища та багатьох інших. Багато в чому дані дистанційного зондування користуються популярністю завдяки можливості їх завантаження у геоінформаційні системи (ГІС) та автоматизації окремих процесів їх обробки та візуалізації, що суттєво прискорює та полегшує дослідження міста.

Одним із напрямків дистанційного зондування землі є зйомка земної поверхні за допомогою технології *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*). Ця технологія заснована на отриманні та обробці інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища поглинання і розсіювання світла в прозорих і напівпрозорих середовищах [9]. Сама

зйомка виконується за допомогою активного оптичного сенсора - лідара, який кріпиться до певного транспортного засобу та випускає лазерні промені на земну поверхню під час руху за спеціальними знімальними маршрутами. Відбивання лазера від поверхні об'єктів приймається і аналізується сенсорним пристроєм, в результаті чого фіксуються дані про відстань між сенсором та об'єктом, а також інформація про внутрішнє і зовнішнє позиціонування (*GPS i INS*), в сукупності з якою дані про відстані перетворюються в тривимірні точки, що відображають (імітують) поверхню відбивання лазерних імпульсів, тобто, формують тривимірну модель місцевості.

Отримана в результаті лідарної зйомки тривимірною моделлю міської місцевості є первинним набором даних, який піддається додатковій обробці за допомогою різних методик аналізу та отримання інформації про земні об'єкти. Результатом такої обробки вже є безпосередньо тривимірною моделлю забудови місцевості або цифровою моделлю рельєфу, які можуть бути проаналізовані і

візуалізовані в ГІС в рамках дослідження різних властивостей урбогеосистем [46]. Ряд методик аналізу лідарних даних, а також відомі способи їхнього прикладного застосування будуть розглянуті в даній статті.

Метою публікації є огляд методик аналізу даних лідарної зйомки в урбаністичних дослідженнях і подання окремих елементів авторської оптимізації цих методик. Стаття спрямована на опис можливостей використання лідарних даних для конкретних прикладних застосувань з виявленням їх переваг та недоліків.

Попередні дослідження. Дослідження міського середовища на підставі обробки лідарних даних розглядалося у ряді публікацій, в яких, перш за все, пропонуються різні алгоритми вилучення об'єктів з наборів лідарних даних та подальше їх моделювання [13, 25, 29, 30, 34, 35, 36, 41, 43].

Важливий внесок у дослідження міст з використанням засобів дистанційного зондування в цілому зробили автори роботи, присвяченої огляду розроблених додатків дистанційного зондування [40]. В даній роботі детально розглядаються додатки спрямовані на розрахунок морфологічного індексу будівель, обробку стереофонічних зображень, виявлення локальних кліматичних зон, розрахунок різницевого індексу рослинності та температури земної поверхні, обробку аеротеплових інфрачервоних зображень, та багато інших. Так само використання лідарних даних в безлічі додатках, а також технологічні аспекти лідарної зйомки розглядаються у наступному літературному джерелі [6].

Використання лідарних даних для дослідження урбогеосистем та виокремлення їх властивостей розглядалося у публікаціях С.В. Кострікова [19-22, 44, 45]. В даних роботах також пропонується залучення веб-ГІС додатків для обробки лідарних даних та їх подальшої візуалізації у вигляді тривимірних моделей забудови в стандартному ГІС-інтерфейсі. Також у публікації С.В. Кострікова пропонується використання лідарних даних у рамках концепції розумного міста [21]. Нарешті, застосування результатів обробки лідарних даних вже розглядалося для цілей візуального аналізу урбаністичного середовища автором даної публікації у співавторстві з вищезазначеним автором [44].

Виклад основного матеріалу. Методика лідарної зйомки в останні два десятиліття поступово стає домінуючою як в локальному, так і в регіональному масштабі, що пояснюється значною доступністю різних апаратних засобів сканування та наявністю програмного забезпечення для обробки похідних даних у вигляді хмара точок [21]. Скануючі лідарні засоби в системах машинного зору формують двовимірну або тривимірну кар-

тину навколишнього простору, що вдало корегується із можливостями ГІС-платформ надавати тривимірну візуалізацію у вигляді тривимірної сцени.

Тривимірне моделювання на основі лідарних даних є дуже корисним інструментом для різних міських досліджень, серед яких виділяються дослідження морфології міста і аналіз зелені, моделювання ризику міських повеней, картографування ліній електропередачі, моделювання перешкод сигналам *GPS* / аеропорту і оцінка сонячної радіації [43]. Крім того, існує безліч інших прикладних застосувань лідарних даних при аналізі міського середовища, серед яких виокремлення та моделювання будівель, картування непроникних поверхонь, оцінка чисельності населення, виявлення змін, оцінка пошкоджень будівель, оцінка блокування доріг, тощо. Деякі з перерахованих прикладів будуть докладніше розглянуті в даному розділі.

Виокремлення будівель з даних лідарної зйомки стало важливою областю досліджень. Існує безліч різних підходів до виявлення та вилучення будівель з хмари лідарних точок, які можуть призвести до різних результатів залежно від пріоритету до швидкості обробки даних або якості одержуваних моделей.

Один із найпростіших підходів полягає у вилученні будівель із цифрових моделей рельєфу (ЦМР), які побудовані на суміщенні моделей наземних і не наземних точок. У цьому підході з високою точністю класифікуються об'єкти земної поверхні, визначаючи їх контури, за якими надалі виконується вилучення будівель. Однак зі зменшенням щільності точок знижуватиметься і точність класифікації. Також у наборах даних по місцевості з високою рослинністю контури об'єктів будівель будуть неточними, оскільки їм перешкоджатимуть дерева. Таким чином, такий підхід ефективний лише при задоволенні ряду додаткових умов [24].

Інший підхід передбачає виявлення та вилучення з хмари точок спрямлених ліній, як шаблонів, що визначають форму дахів будівель. Точки із класу не наземних об'єктів перевіряються на близькість та відповідність лінійним примітивам. Ті точки хмари, які задовольняють критерію близькості, використовуються для моделювання площин дахів та реконструкції всього даху окремої будівлі [3]. Використання шаблонів параметрів дахів суттєво полегшує вилучення будівель та прискорює процес генерації моделей, однак такий підхід робить низку припущень щодо відповідності моделей архітектурі реальних будівель [27].

Для більш ефективного використання лідарних даних при моделюванні будівель необхідна реалізація різних додаткових алгоритмічних рі-

шень, які допомагають з високою точністю розрізняти будівельні конструкції та міську рослинність без втрати в якості моделей. Було запропоновано безліч алгоритмів для вилучення будівель, серед яких слід виділити роботу, в якій описувалася *модель суміші Гаусса* для сегментації даху будівлі [41]. Розподіл Гаусса широко використовується в природознавстві як проста модель для опису складних явищ з безліччю розподілів ймовірностей, а тривимірний гауссовий розподіл може бути використаний для обчислення розподілу лідарних точок в межах плоскої ділянки. Через обмежену точність, та наявність перешкод у хмарах точок будівель, утворених сторонніми об'єктами, виокремлення будівель може бути ускладнено – хмари точок плоских дахів не точно лежать на математичній площині, а розсіюються з незначними відхиленнями біля даху – таке відхилення точок від площини відповідає гауссовому розподілу з центром у нулі. Таким чином, окрема будівля з багатоплощинним дахом може бути представлена тривимірною гауссовою моделлю суміші, яка складається з наблизених та усереднених значень розподілу точок біля даху.

Гауссова модель ефективно застосовується при наявності незначних перешкод біля дахів, які не завдають суттєвих відхилень від математичної площини даху. Але при великій кількості перешкод і надто хаотичному розкиданню точок площина даху буде обчислена зі значним відхиленням від її реального положення – в такому випадку можна виконати фільтрацію точок перешкод та змодельовати гауссову модель повторно, але тоді кількість точок навколо даху може бути недостатньою для коректного моделювання.

У даній моделі сегментації даху будівель також застосовується метод *RANSAC* – метод оцінки параметрів моделі на основі випадкових вибірок, запропонований Фішлером і Боллесом [10]. На рис. 1 можна побачити, як для будівлі 1 (рис. 1А) модель суміші Гаусса виявляє два перетини площини даху (рис. 1Б), тоді як *RANSAC* виявляє тільки дві площини даху і не може виявити перетини площини даху (рис. 1В). Для будівлі 2 (рис. 1Г) модель суміші Гаусса успішно виявляє три перетини даху і площини (рис. 1Д), тоді як метод *RANSAC* виявляє тільки один перетин даху і площини (рис. 1Е).

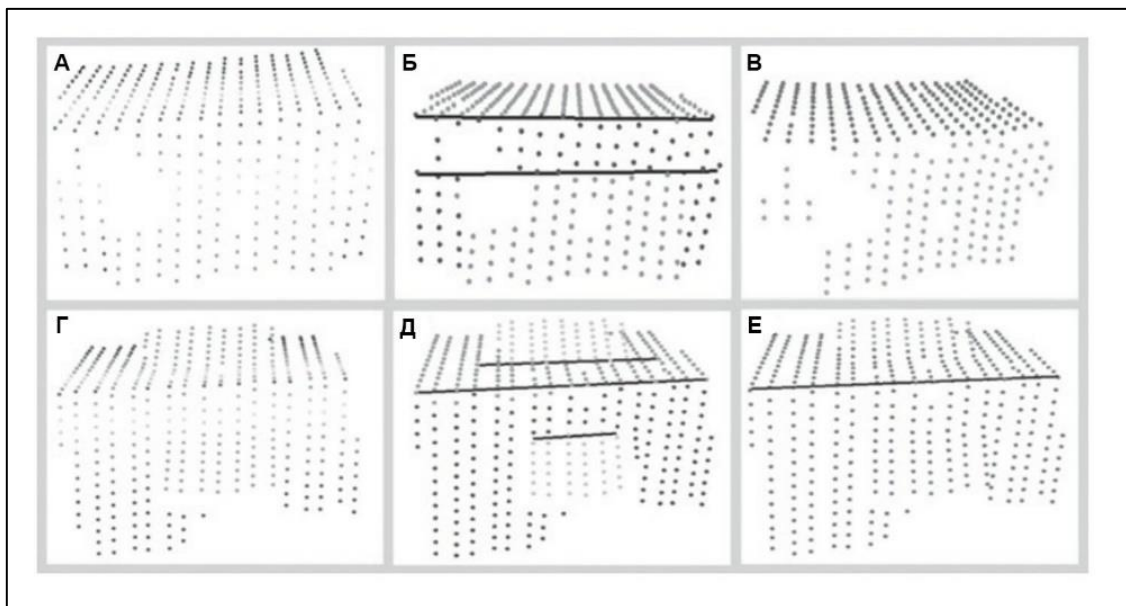


Рис. 1. Порівняння площин дахів, витягнутих за допомогою моделі суміші Гаусса та методу *RANSAC*. А – необроблені лідарні точки; Б – площини даху, витягнуті з А за допомогою моделі суміші Гаусса; В – площини даху, витягнуті з А за допомогою методу *RANSAC*; Г – необроблені лідарні точки для будівлі 2; Д – площини даху, витягнуті з Г за допомогою моделі суміші Гаусса; Е – площини даху, витягнуті з Г за допомогою методу *RANSAC* [6, с. 153] /

Fig. 1. Comparison of roof planes extracted using the Gaussian mixture model and the *RANSAC* method.

A – unprocessed lidar points; Б - roof planes extruded from A using a Gaussian mixture model; В – roof planes extracted from A using the *RANSAC* method; Г – unprocessed lidar points for building 2; Д – roof planes extruded from Г using a Gaussian mixture model; Е – roof planes extracted from Г using the *RANSAC* method [6, p. 153]

Вилучення будівель методом *RANSAC* було доповнено алгоритмом *PolyFit*, заснованим на пошуку відповідних комбінацій площин, які форму-

ють багатокутну модель. При такому підході під час аналізу фрагмента хмари точок генерується певний набір граней-кандидатів, які можуть в

різних конфігураціях моделювати один і той же фрагмент хмари точок [31]. Далі алгоритм підбирає найбільш оптимальну підмножину таких граней, за допомогою яких з мінімізацією топологічних помилок може бути сформована безмежна і водонепроникна модель. Даний підхід показує високий рівень якості моделей, але при цьому швидкість виконання алгоритму може істотно сповільнитися за рахунок включених процедур оптимізації.

В одному з досліджень метод *RANSAC* також порівнювався з алгоритмами стандартної та рандомізованої *трансформації Хафа*, заснованими на параметричній ідентифікації геометричних елементів [28]. У порівняльному аналізі використовувалася класифікація неповних площин моделей, у результаті якої виділялися чотири типи площин: несегментовані площини, недостатньо сегментовані, надмірно сегментовані і несправжні площини [42]. Дослідження показало, що алгоритм рандомізованої *трансформації Хафа* при додатковому уточненні значною мірою задовольняє компроміс між точністю моделей та часом обчислень. Хоча метод *трансформації Хафа* зазвичай використовується для двовимірних наборів даних, були докладно розглянуті безліч способів використання методу для виявлення площин у тривимірних хмарах точок та запропоновані різні оптимізаційні рішення для такого застосування *трансформації* [4].

Відомо також комбіноване використання алгоритмів *RANSAC* та *Трансформації Хафа* для реконструкції будівель за наборами лідарних даних [36]. Зокрема, було розширено алгоритм *RANSAC* з урахуванням переваг *трансформації Хафа* – запропоноване рішення оптимізувало математичний аспект алгоритму з геометрією даху, за рахунок чого вдалося уникнути помилкового фіксування сторонніх площин будівлі як площин дахів.

Частина з описаних раніше підходів до вилучення будівель відносяться до параметричних підходів, які засновані на створенні певної бібліотеки шаблонів дахів будівель – їх топологічних примітивів. При аналізі хмари точок для кожної будівлі обирається той шаблон даху, який найкраще відповідає його фрагменту хмари точок [14]. У такому разі навіть за невисокої якості лідарних даних очікується прийнятна якість моделей з коректними формами дахів. Однак, при такому підході неможливо врахувати всі можливі форми дахів і знайти для них відповідні шаблони, тому часто побудована модель може суттєво спростувати архітектуру реальної будівлі або зовсім її ігнорувати [35]. По суті, для простоти візуального сприйняття моделей забудови втрачається деталізація окремих моделей і достовірність їх форм [16].

Більшість параметричних підходів ґрунтуються на припущенні, що будівля є багатогранним об'єктом [11]. Моделювання будівель виконується у кілька етапів: 1) виконується фільтрація точок, які не належать до класу будівель; 2) з точок, що залишилися, витягуються лінійні об'єкти; 3) виконується продовження похідних ліній у ділянках з недостатньою щільністю точок за справжніми контурами будівлі (тут можуть бути задіяні двовимірні контури); 4) об'єднання первинних ліній з похідними та формування повної моделі будівлі; 5) суміщення моделі з відповідним шаблоном. Під лінійними об'єктами в даному випадку маються на увазі межі між сегментами. Внутрішні межі визначаються між суміжними сегментами, зовнішні – визначаються на основі положення козирків дахів [33].

Процедура відновлення частини будівлі шляхом продовження похідних ліній відноситься до узагальнених підходів, за яких генерується очікувана модель на основі наявних даних [23]. Алгоритми фіксують у хмарі точок площини, лінії, опорні точки, а потім за цими даними генерують очікувану модель. Відповідно, чим більше вдається зафіксувати таких даних, тим більш достовірною виходить підсумкова модель. Іноді аналіз даних виконується у кілька ітерацій задля забезпечення всієї повноти зібраних точок, які відносяться до будівлі [2].

До категорії таких підходів також можна віднести алгоритм, у якому спочатку для кожної точки виконується аналіз власних значень з подальшим визначенням розмірності точок і обчисленням полігонів Вороного для точок з найбільшою вагою. Такі точки формують двовимірні площини даху і є основою для подальшого сегментування, яке виконується через поступову кластеризацію точок, яка ґрунтується на геометричних відстанях до центрів кластерів, а також на топологічній вазі – розмірності точок (рис.2). Кластеризація відбувається в кілька етапів, тим самим регулюючи та уточнюючи просторове положення та напрямок окремих площин даху. Надалі межі між обчисленими площинами визначаються точками переривання – це точки ребер дахів, які були відкинуті на етапі аналізу розмірності точок. Однак визначення таких точок може бути ускладнене через наявність різних перешкод у хмарі точок.

У разі, якщо алгоритм не здатен виокремити складні архітектурні особливості будівлі, такі підходи все одно можуть бути корисними для побудови узагальнених моделей забудови та встановлення їх просторового екстенду, ґрунтуючись лише на надмірній інформаційній щільності у тих фрагментах хмари точок, які класифіковані як будівлі [17]. Так, у деяких дослідженнях відфільтровані точки будівель використовувалися для вилучення

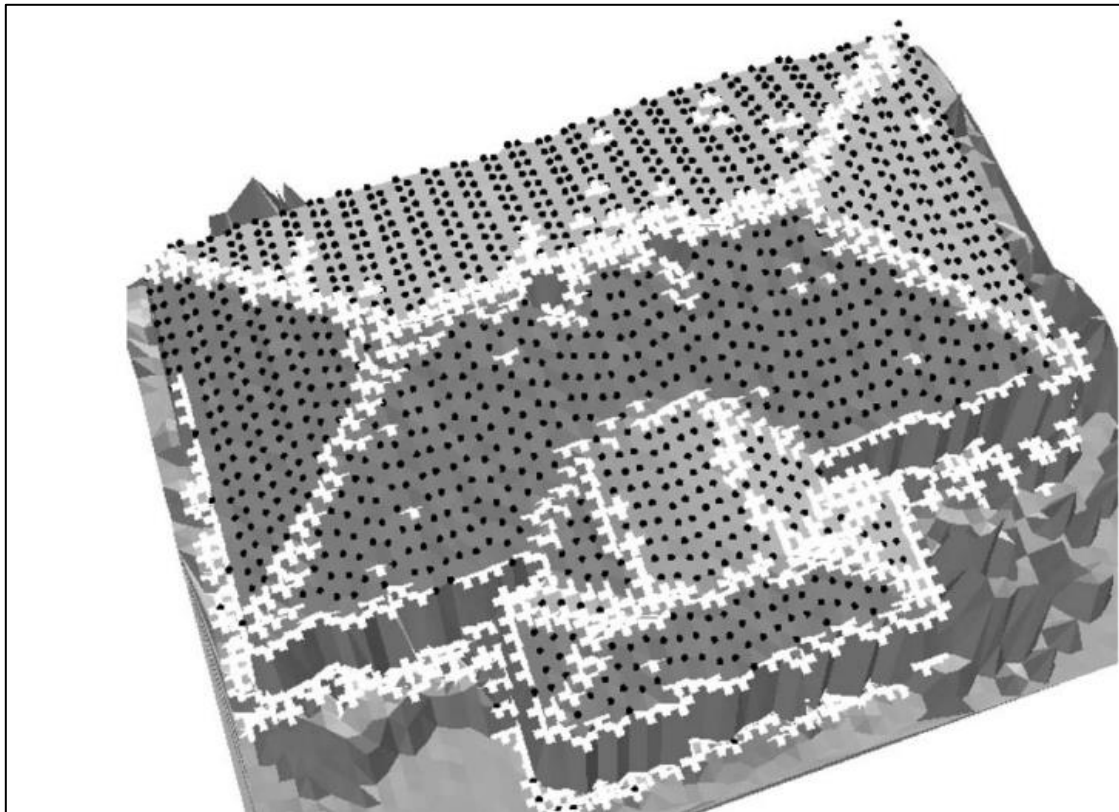


Рис. 2. Точки двовимірних площин даху (чорні точки) та точки переривання (білі хрестики) [35, с. 1557] /
Fig. 2. Points of 2D roof planes (black dots) and breakpoints (white crosses) [35, p. 1557]

чення їх двовимірних контурів, в межах яких потім витягувалася висота кластера точок, що відповідає певній площині будівлі [32, 34]. В результаті по витягнутій висоті і позначеним контурам будівлі генерується узагальнена модель. При такому підході з високою швидкістю може бути згенерована велика кількість моделей, але його недоліком є те, що в деяких випадках у межі контуру будівлі можуть потрапити кластери точок, що належать до сторонніх об'єктів і саме такі помилкові кластери можуть послужити для отримання помилкової висоти та площин будівлі [9].

Таким чином, в залежності від сформованого запиту обраний підхід до автоматичного вилучення будівель може варіюватися між пріоритетом до якості отриманих моделей, їх архітектурно-морфологічної точності та пріоритетом до обсягу вилучених моделей та швидкості обробки даних. Питання оптимізації вилучення будівель щодо таких запитів досі є актуальним.

Із зростанням використання даних лідарної зйомки, важливою темою для міських досліджень стало тривимірне виявлення змін горизонтального і вертикального розростання міст. Тривимірні моделі, сформовані лідарними даними можуть бути ефективно використані для такого запиту.

Один із методів виявлення змін в будівлях на підставі земельних ділянок запропонований для підтримки таких додатків, як міське планування і

управління земельними ресурсами [5]. У методі використовуються цифрові моделі місцевості (ЦММ), цифрові моделі поверхні (ЦМП), цифрові моделі висоти (ЦМВ = ЦМП - ЦММ) і різниці цифрові моделі поверхні (рЦМП). Після серії етапів обробки в ГІС пропонується метод створює вихідну карту будівель, на якій показані чотири типи будівель (рис. 3):

- Тип I (нові будівлі, побудовані після видалення середньої / високої рослинності);
- Тип II (нові будівлі, побудовані на голій землі або з низькою рослинністю, або поверх існуючих будівель);
- Тип III (знесені або пошкоджені будівлі);
- Тип IV (існуючі будівлі, в яких мало змін чи вони відсутні).

В даному методі виявлення змін будівлі на основі ділянок відбувається в кілька етапів:

1. Використання зональної статистики а також статистики околиць, щоб визначити правильний поріг ухилу, що розділяє дахи і середню або високу рослинність.

2. Обчислення середнього зонального ухилу S_i з растра ухилу, використовуючи полігони контурів будівель пізнього періоду в якості зон.

3. Позначення зміни обсягу V_{ij} як об'ємної зміни наземних об'єктів (будівель, дерев, поверхонь землі, тощо.) з раннього по пізній період, після чого обчислюється V_{ij} з рЦМП, з використан-

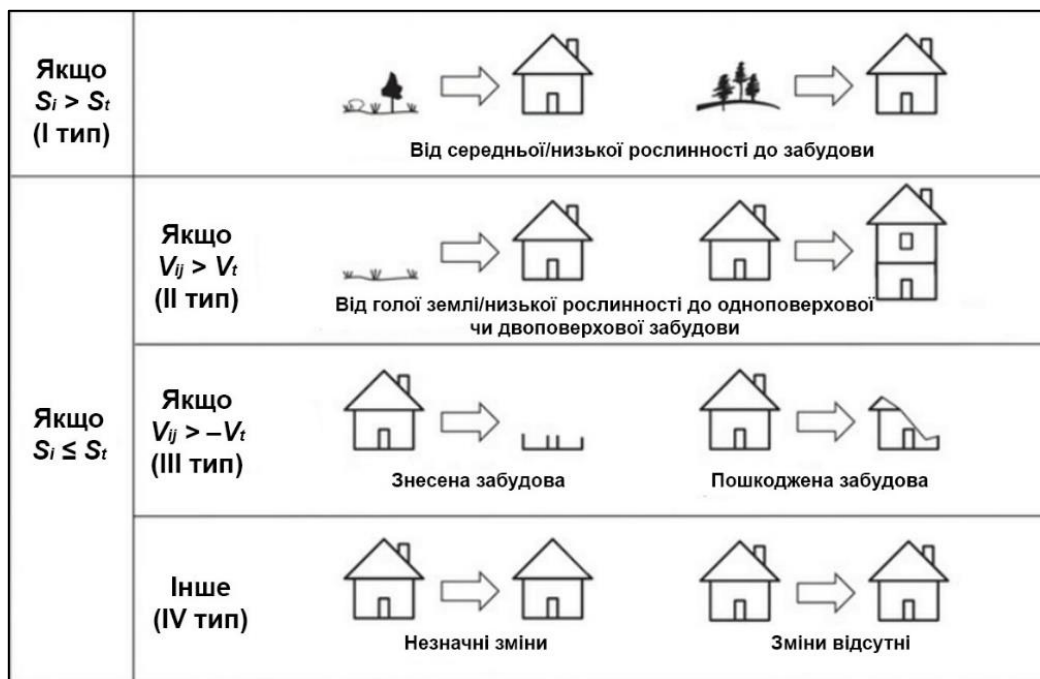


Рис. 3. Визначення чотирьох типів змін забудови з використанням середнього зонального ухилу даху (S_i), порогового значення ухилу (S_t), зональної зміни об'єму (V_{ij}) і порогового значення об'єму (V_t) [5, с. 9] / Fig. 3. Determination of four types of building changes using the average zonal roof slope (S_i), slope threshold (S_t), zonal volume change (V_{ij}) and volume threshold (V_t) [5, p. 9]

ням зональної суми осередків рЦМП в кожному з полігонів контуру будівлі пізнього періоду.

4. Встановлення S_i і V_{ij} для кожного полігону контуру будівлі пізнього періоду. У цьому процесі використовується порогове значення об'єму V_t , встановлене на основі стандарту будівництва і безпеки будинку.

Відстеження змін на основі лідарних даних також може використовуватися для швидкої оцінки пошкоджень будівель та інфраструктури, викликаних різними стихійними лихами, наприклад, землетрусами.

Щоб оцінити потенційне застосування лідарних даних для оцінки пошкоджень будівель після руйнувань, можна змодельовати обвалення м'яких поверхів та інші типи великих пошкоджень будівель з плоскими, двохсхилими, і шатровими дахами [7]. *Триангульовані нерегулярні мережі (TIN)* змодельованих лідарних точок були створені за допомогою триангуляції Делоне. Визначення пошкоджень виконується за рахунок створення випадкових точок на стінах і поверхнях будівель, які формують спрощені контури будівель. Випадкові точки дозволяють порівнювати контури тривимірних форм моделей будівель для виявлення пошкоджених будівель. Цей приклад показує, що основні зміни в тривимірних формах будівель можуть бути виявлені за допомогою контурів тривимірних форм, отриманих з лідарних даних. Також, якщо відомі ознаки тривимірної форми будівлі до руйнування, можна виявити серйозне пошкод-

ження або обвалення будівлі, порівнявши його тривимірні контури форми до руйнування з тривимірними контурами форми після руйнування, отриманими з лідарних даних.

На підставі огляду літератури та нових результатів в оцінці пошкоджень будівель з використанням лідарних даних, створена блок-схема з чотирма основними компонентами для автоматизованої оцінки пошкоджень будівель після руйнування з використанням лідарних даних і ГІС (рис. 4) [7].

Окрім відстеження руйнувань, технологія виявлення зміни застосовна також для моніторингу міського та приміського середовища на наявність незаконних будівель. Відомий приклад такого дослідження з використанням цифрових моделей поверхні [12]. Було запропоновано систему моніторингу місцевості спрямовану негайне виявлення неформальної забудови ще до її закінчення.

Оброблені лідарні дані також знайшли застосування в оцінці населення. Один із методів оновлення та оцінки даних про чисельність населення (метод кореляції) полягає у співставленні змін чисельності населення зі змінами кількості зайнятих житлових одиниць. Такий метод ефективно впроваджується з використанням лідарних даних, супутникових знімків *Landsat TM* і даних з переписних ділянок. В рамках даного методу в ГІС будуються звичайні моделі найменших квадратів, а також моделі географічно зваженої регресії на основі вибіркових блоків перепису населен-

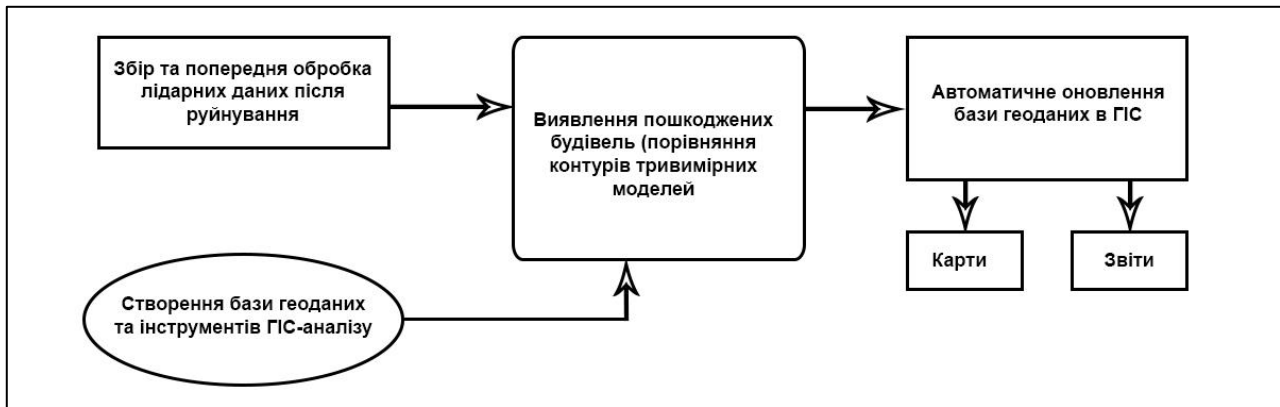


Рис. 4. Схема автоматизованої оцінки пошкоджень будівель після землетрусу з використанням лідарних даних та ГІС /

Fig. 4. Scheme of automated assessment of damage to buildings after an earthquake using lidar data and GIS

ня. При цьому використовуються три типи даних:

- чисельність населення в порівнянні з кількістю будівель;
- чисельність населення в порівнянні з площею забудови;
- чисельність населення в порівнянні з об'ємом будівлі.

В одному з таких досліджень, використовувалися дані про кількість населення з 91 випадково вибраної ділянки перепису в якості залежної змінної, і дані про кількість, площу та об'єм будівель отриманих в результаті лідарної зйомки в якості незалежної, були створені моделі лінійної регресії і географічно зваженої регресії для оцінки населення [8]. Результати показали, що кількість населення сильно корелює з кількістю, площею і об'ємом житлових будинків, отриманими з тривимірних моделей. Проблема даного дослідження полягає в тому, що вихідні лідарні дані були повторно дискретизовані до відстані між точками 3-5 м, що впливає на точне представлення будівель. Більш точні результати можна було б отримати, якби були доступні лідарні дані з більш високою щільністю точок.

В іншому дослідженні використовувалися чотири моделі регресії (проста та множинна лінійна регресія, а також дерево регресії з однією та безліччю змінних) для зіставлення переписної чисельності населення з показниками площі та обсягу будівель, отриманих з лідарних даних. Модель дерева регресії з безліччю змінних на основі обсягу будівель дала найточнішу оцінку населення [26].

У проєкті *EOS LiDAR Tool (ELiT)*, у розробці якого брав участь автор цієї статті, проводилося дослідження чисельності населення місті Бостон, штат Массачусетс, США з урахуванням тривимірної моделі забудови даного міста отриманої з допомогою узагальненого моделювання лідарних даних. Для оцінки населення використовувався

просторово-метричний метод, спрямований на обчислення населення на основі геометричних показників будівлі та топологічних параметрів міського простору. В результаті було змодельовано урбаністичне середовище міста Бостон з візуалізацією розподілу розрахованого населення по кожній будівлі. Хоча для деяких моделей чисельність населення була оцінена не точно через помилкове віднесення великих комерційних будівель до житлових зон землекористування, все одно цей підхід продемонстрував значну ефективність для оцінки населення в житлових районах [22]. Особливо такий підхід може активно застосовуватися для міст із публічною недостатністю реальних показників чисельності населення [26].

Можливість побудови дискретних тривимірних моделей будівель на основі обробки лідарних даних дозволяє задати певну атрибутивну інформацію кожній окремій будівлі у ГІС-середовищі. У тому числі, може бути занесена інформація про чисельність населення будівель, розрахована за описаними раніше методами. Така інформація може бути візуалізована для тривимірних моделей у ГІС-середовищі за допомогою тематичного картографування і заданого методу класифікації даних (рис. 5).

Також у багатьох дослідженнях лідарні дані використовуються для вилучення доріг. Повністю автоматизоване вилучення доріг в міських районах може бути ускладнене через складність міських особливостей, в той час як оцифровка доріг вручну із зображень може зайняти багато часу. Доцільним є використання напівавтоматичного підходу до вилучення доріг для підвищення ефективності, точності і рентабельності діяльності по розробці даних [6].

Об'єкти земної поверхні, такі як водойми і асфальтове покриття, зазвичай мають дуже низькі значення інтенсивності лазерного імпульсу, також, як і дахи деяких будинків. Отже, поєднання

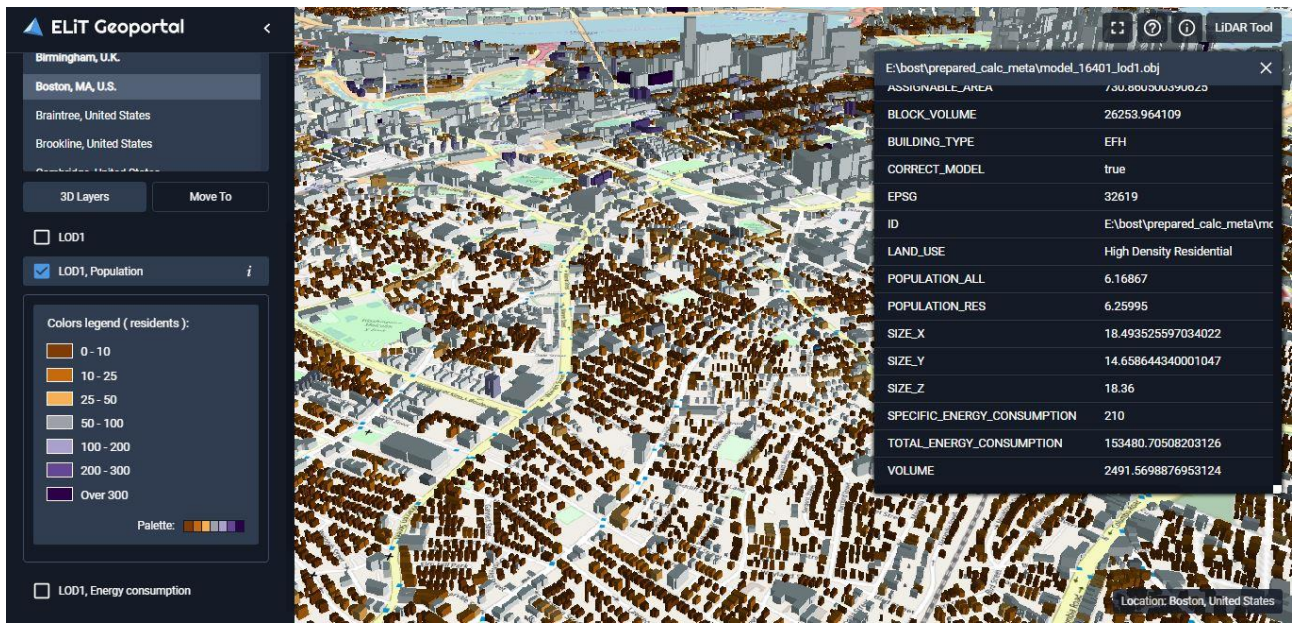


Рис. 5. Тривимірна візуалізація розподілу населення по будівлях в середовищі веб-ГІС ELiT / Fig. 5. 3D visualization of the building population distribution in the ELiT web-GIS environment

лідарних даних інтенсивності і ЦМП або ЦМВ може використовуватися для виокремлення доріг. По-перше, створюється зображення інтенсивності з хмар точок з використанням просторової інтерполяції; потім з наземних точок будується ЦМП. Після злиття зображення інтенсивності і ЦМП об'єднане зображення може бути сегментоване з використанням порогу. Отримане двійкове

зображення може бути додатково оброблене з використанням математичних морфологічних операторів. Після векторизації витягнуті дороги можна виправити за допомогою інтерактивного редагування (рис. 6).

Схожі методи фільтрації лідарних даних зйоми можуть використовуватися для виокремлення та картування ліній електропередач. В од-

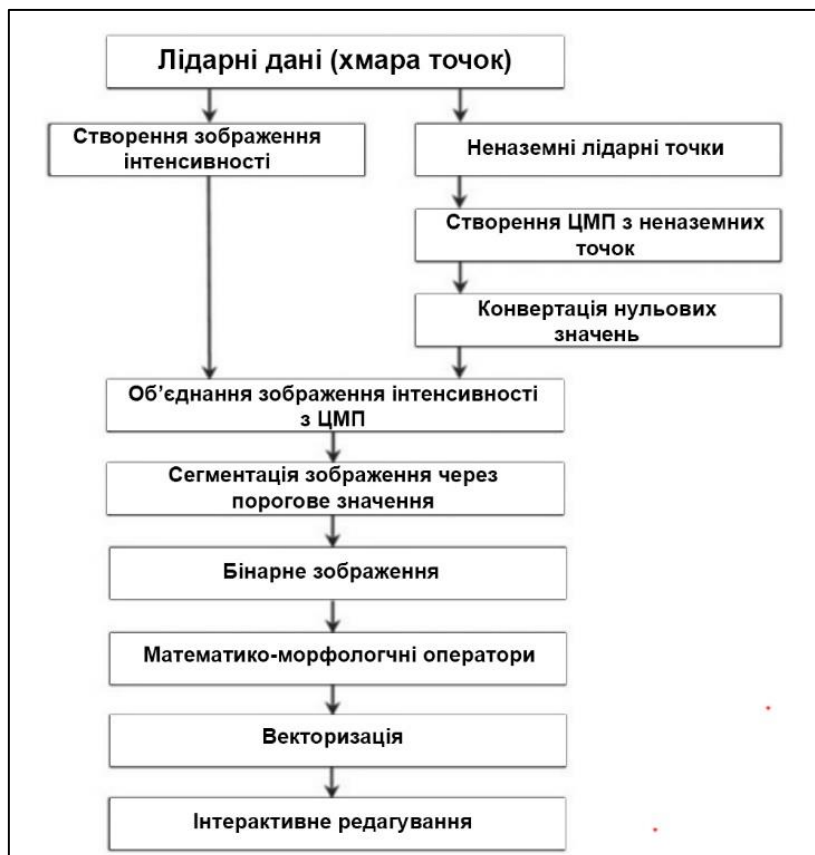


Рис. 6. Схема вилучення доріг з лідарних даних / Fig. 6. Scheme for extracting roads from lidar data

ному з досліджень застосовується двоетапний алгоритм для вилучення ліній електропередачі з даних лідарної зйомки з початковою класифікацією наземних об'єктів і подальшим вилученням ділянок ліній електропередачі [30]. Даний метод правильно визначив 86,9% точок лідарних даних, прокладених на лініях передачі, і вилучив 72,1% ділянок лінії передачі. Для виокремлення ліній електропередач також розроблений список рекомендацій, заснований на температурі провідника, швидкості вітру, сонячної радіації, електричної навантаженні для точного моделювання ліній електропередачі з використанням лідарної зйомки [25]. Також в одному з досліджень була запропонована модель контактної кривої, при якій спочатку визначаються передбачувані лідарні точки на лінії електропередачі, які потім помножуються та поширюються за очікуваною траєкторією для моделювання всієї лінії електропередачі. Експеримент продемонстрував задовільний рівень успіху 96% при точності 3D-моделювання лінії електропередачі менше 5,2 см [15]. Таке моделювання може бути ефективним навіть при наявності даних з невисокою щільністю точок, проте у таких даних має бути мінімальна кількість перешкод навколо ліній електропередач.

Якщо для набору лідарних даних виконується класифікація точок, вилучення таких об'єктів як дороги і лінії електропередач може бути спрощено за умови коректно виконаної класифікації. У LAS-файлах (формат лідарних даних) точки дорожнього покриття мають відповідний код класифікації – 11, точки дровів – 14, опора ліній електропередач – 15. За цими кодами з наборів лідарних даних можна вилучати точки за допомогою спеціального програмного забезпечення. Автор для таких цілей використовував інструмент

Las2Las із набору інструментів вільного доступу *LasTools*. За допомогою командного запиту інструмент дозволяє фільтрувати з хмари точок лише ті точки, які закодовані під відповідним класом. Цей інструмент також дозволяє вирізати необхідні ділянки хмари точок для оптимізації її подальшої обробки та моделювання.

Можливість фільтрації лідарних даних для поділу наземних і неназемних об'єктів дала підстави для застосування лідарних даних з метою моделювання ризиків міських повеней. На підставі даних фільтрації та інтенсивності можна отримати ЦМР для імітаційного моделювання повеней в прибережних міських районах, викликаних штормовими нагонами [29]. За рахунок такого моделювання можна відстежити найбільш небезпечні ділянки, до яких слід вжити заходи щодо мінімізації ризиків. Отримана за допомогою лідарних даних ЦМР дає найменшу середньо-квадратичну помилку з точки зору точності висоти і передбачуваних площ затоплення (рис. 7). У деяких дослідженнях лідарні дані використовувалися для створення неструктурованої сітки, яка представляє складний міський ландшафт, і оцінки глибини води, при побудові різних моделей затоплення [37]. Також цифрова модель поверхні використовувалася з метою оцінки просторового розподілу передбачуваного ризику затоплення міських районів. Оціночні значення ризику використовувалися для порівняння різних заходів із модернізації будівель та міського простору. У дослідженні також задіялися дані з переписних ділянок з метою оцінки потенційних втрат з погляду офіційного доходу душу населення [1].

Оскільки лідарні дані дозволяють точно моделювати міське середовище, отримані дані можна використовувати для оцінки потенційної со-



Рис. 7. ЦМР, побудована в середовищі веб-ГІС ELiT, для оцінки ризиків повеней /
Fig. 7. DEM built in the ELiT web-GIS environment for flood risk assessment

нячної радіації, що може сприяти розвитку значних поновлюваних джерел енергії. ЦМП, побудовані за допомогою лідарної зйомки можна використовувати для визначення розміру, нахилу та експозиції площини даху окремої будівлі, а також потенціалу сонячної енергії, що потрапляє на дах [38]. Проте, складні конструкції даху з об'єктами (слухові вікна, вікна, димарі, антен, тощо.) можуть стати перешкодами при вилученні правильної площини даху за допомогою ЦМП. Тому повідомлялося про деякі спроби розробки алгоритмів для ідентифікації та вилучення дахів і виконання аналізу сонячного потенціалу на основі хмари точок даних.

Було представлено успішне тематичне дослідження з великомасштабною оцінкою сонячної радіації в міській забудованій середовищі в місті Кембридж, штат Массачусетс [13]. Окрім обліку сонячного випромінювання на дах, ефект затінення, викликаний навколишніми елементами, також може впливати на рівень сонячного освітлення. Згодом було визначено новий метод, який поєднує в собі топографію міста, витягнуту з лідарних даних, з піранометричними вимірами глобальної та розсіяної сонячної радіації. Цей метод враховує ефекти затінення від різних навколишніх об'єктів. Результати показали більш високу загальну точність, порівняно з фактичними вимірами електростанції, однак сам процес обрахування потребує значних обчислювальних ресурсів.

У статті вже неодноразово згадувався проект *ELiT*, у розробці якого брав участь автор. Даний проект є геоінформаційним веб-додатком, що надає інструменти обробки та аналізу лідарних даних. *ELiT* складається з ГІС-серверу, клієнту та ядра – структурованої платформної сукупності базових алгоритмів та бібліотек функцій. Серед цієї сукупності алгоритмів знаходяться також алгоритми фільтрації та вилучення об'єктів, які розглядалися у цій статті. Крім інструментів обробки лідарних даних в *ELiT* також реалізовано якісну візуалізацію результатів моделювання у вигляді тривимірної сцени та інструменти управління цією візуалізацією у середовищі *Cesium Viewer* [20]. Для обробки лідарних даних *ELiT* на вхід подаються дані формату *LAS/LAZ*, а також допоміжні дані контурів будівель у форматі *SHP*.

У *ELiT* було реалізовано такі основні категорії інструментів обробки даних:

1) *Building Extraction (BE)* – інструмент, спрямований на виокремлення та детальне, високоточне тривимірне моделювання будівель із строгим покриттям витягнутих фрагментів хмари точок, що належать до класу будівель (рис. 8А);

2) *Change Detection (CD)* – інструмент, який автоматично фіксує зміну в архітектурній морфології окремих будівель за допомогою порівняння

двох файлів лідарних даних, зібраних в одній місцевості, але в різні проміжки часу (рис. 8В);

3) *DEM Generation* – інструмент призначений для побудови растрової моделі поверхні – цифрової моделі рельєфу у вигляді ґрид-матриці надвисокої роздільної здатності на основі вхідного файлу лідарних даних (рис. 8Г).

2) *Building Extraction Rural Area (BERA)* – інструмент для вилучення будівель сільської місцевості, при якому моделі генеруються за певними шаблонами будівель та їх контурами, отриманими з допоміжних *SHP*-файлів. Для даного інструменту реалізовано ряд додаткових модифікацій, які виконують автоматичне виокремлення будівель за різними алгоритмами точкової сегментації та кластеризації, серед них оптимізовані алгоритми *RANSAC*, *PolyFit*, а також алгоритм заснований на аналізі власних значень точок [20]. В результаті моделювання за допомогою даного інструменту генеруються низькополігональні моделі, що відображають загальні властивості будівель (рис. 8Б).

Сегментація точок при виокремленні будівель у середовищі *ELiT* істотно оптимізована за рахунок використання у розрахунках додаткових *SHP*-файлів футпрінтів – двомірних контурів будівель. Футпрінти визначають чіткі фрагменти хмари точок, у яких буде виконуватися сегментація. Точки, які не потрапляють у межі футпрінтів – відкидаються. Самі футпрінти будівель можуть бути отримані з різних відкритих карт глобального покриття, таких як *OpenStreetMap* та *GoogleMaps*. Моделі, побудовані таким чином, мають коректну географічну прив'язку і можуть бути візуалізовані прямо на картах глобального покриття.

На пізніших стадіях розробки у проекті було також реалізовано середовище перегляду результатів обробки лідарних даних – *ELiT Geoportal* (рис. 8Д). У цьому середовищі у вигляді узагальнених моделей забудови були візуалізовані великі масиви оброблених лідарних даних, що покривають цілі міста. Для окремих міст було виконано оцінки чисельності населення та енергоспоживання будівель на основі геометричних показників одержаних моделей забудови. Результати таких оцінок також були візуалізовані у тривимірній сцені.

Ще один окремий інструмент аналізу лідарних даних – *Visibility Analysis* – був представлений в *ELiT* для моделювання тривимірної півсфери видимості, що візуалізує видимий обсяг міського простору з певної точки спостерігача (рис. 8Е). Функціональні особливості даного інструменту, а також прикладні аспекти візуального аналізу міського середовища були детально викладені в одній із публікацій автора [44].

Висновки. Таким чином, лідарні дані у ком-

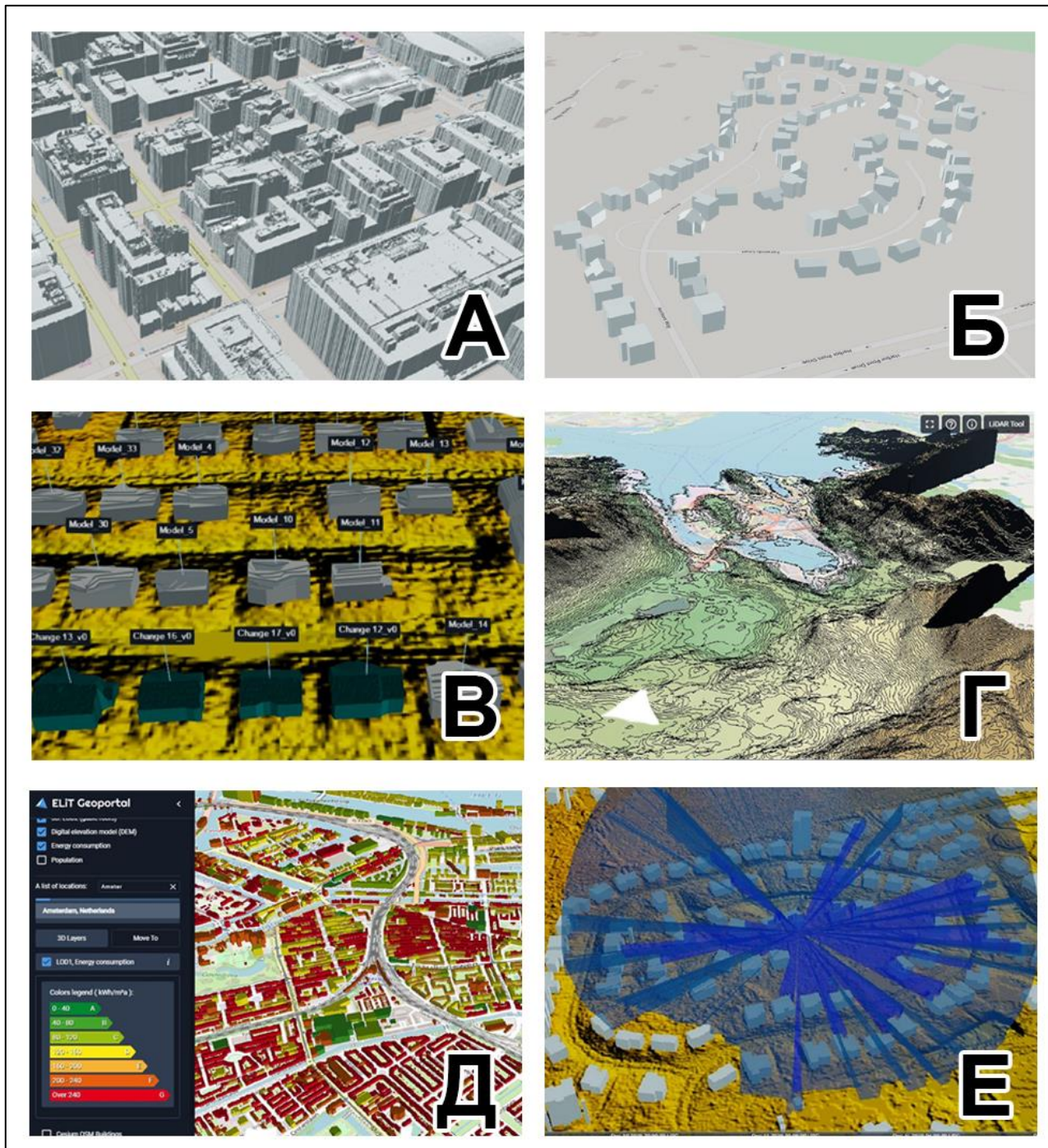


Рис. 8. Візуалізація результатів обробки лідарних даних в середовищі ELiT /
 Fig.8. Visualization of the lidar data processing results in the ELiT environment

бінації з ефективними алгоритмами обробки, зчитування та фільтрації даних мають широкий прикладний потенціал для їх використання у різних урбаністичних дослідженнях. Отримувана з лідарних даних тривимірна модель міської місцевості може суттєво полегшити вирішення низки завдань, що стосуються моніторингу місцевості, міського планування, відстеження змін тощо, але, крім того, тривимірне подання міського середовища відкриває можливість виділення нових урбогеосистемних властивостей міста, які складно було виявити на двовимірних картах. Такими

властивостями можуть бути, наприклад, розподіл щільності забудови у міському середовищі, закономірності поширення різноманітних архітектурних форм та міської інфраструктури. З вилученням таких властивостей міста можна буде простежити різні проблеми міської забудови, різні конфлікти між будівлями окремих функціональних зон та в результаті запропонувати рішення щодо оптимізації забудови та запобігання таким проблемам у майбутньому.

Тривимірне моделювання на підставі обробки даних лідарної зйомки місцевості може бути

реалізовано в сучасних ГІС. Отримані моделі мають високу точність, а сам спосіб їх отримання є економічно ефективним. Таким чином, тривимірне моделювання виводить урбаністичні дослідження на якісно новий рівень. Важливою перевагою такого підходу є те, що сама обробка лідарних даних і подальша побудова моделей може

бути повністю автоматизована, що дозволяє регулярно проводити лідарну зйомку міського середовища і відслідковувати будь-які істотні зміни просторової структури урбогеосистеми, які в свою чергу свідчать про зміни соціально-економічних характеристик міста.

Список використаної літератури

1. Arrighi C. Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data [Text] / C. Arrighi, M. Brugioni, M. Castelli, S. Franceschini, B. Mazzanti // *Natural Hazards and Earth System Science*. – 2013. – Vol.13. – No.5. – P. 1375-1391. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-13-1375-2013>
2. Awrangjeb M. Automatic building detection using LIDAR data and multispectral imagery [Text] / M. Awrangjeb, M. Ravanbakhsh, C.S. Fraser // *Proc. Digital Image Computing: Techniques and Applications*. Sydney, Australia. 2010. – P. 45-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DICTA.2010.17>
3. Awrangjeb M. Automatic extraction of building roofs using LiDAR data and multispectral imagery [Text] / M. Awrangjeb, C. Zhang, C.S. Fraser // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 83. – P. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.05.006>
4. Borrmann D. The 3D hough transform for plane detection in point clouds: a review and a new accumulator design [Text] / D. Borrmann, J. Elseberg, K. Lingemann, A. Nüchter // *3D Research*. – 2011. – Vol. 2. – P. 1-13. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/3DRes.02\(2011\)3](http://dx.doi.org/10.1007/3DRes.02(2011)3)
5. Dong P. Automated parcel-based building change detection using multitemporal airborne LiDAR data [Text] / P. Dong, R. Zhong, A. Yigit // *Surv. Land Inf. Sci.* – 2018. – Vol. 77. – P. 5-13.
6. Dong P. LiDAR Remote Sensing and Applications [Text] / P. Dong, Q. Chen (Editors). – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 246 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.4324/9781351233354>
7. Dong P. A framework for automated assessment of post-earthquake building damage using geospatial data [Text] / P. Dong, H.D. Guo // *International Journal of Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 33. – P. 81-100. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.582188>
8. Dong P. Evaluation of small area population estimation using LiDAR, Landsat TM and parcel data [Text] / P. Dong, S. Ramesh, A. Nepali // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – Vol.31. – P. 5571-5586. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.496804>
9. Dorninger P. A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds [Text] / P. Dorninger, N. Pfeifer // *Sensors*. – 2008. – Vol.8. – P. 7323-7343. DOI: <https://doi.org/10.3390%2Fs8117323>
10. Fischler M.A. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [Text] / M.A. Fischler, R.C. Bolles // *Communications of the ACM*. – 1981. – Vol. 24. – P. 381-395. DOI: <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
11. Huang H. Rule-based roof plane detection and segmentation from laser point clouds [Text] / H. Huang, C. Brenner // *Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. – 2011. – P. 293-296. DOI: <https://doi.org/10.1109/JURSE.2011.5764777>
12. Ioannidis, C. Towards a strategy for control of suburban informal buildings through automatic change detection [Text] / C. Ioannidis, C. Psaltis, C. Potsiou // *Computers, Environment and Urban Systems*. – 2009. – Vol.33. – P. 64-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.010>
13. Jakubiec J. A. A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations [Text] / J.A. Jakubiec, C.F. Reinhart // *Solar Energy*. – 2013. – Vol.93. – P: 127-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.022>
14. Jochem A. Area-wide roof plane segmentation in airborne LIDAR point clouds [Text] / A. Jochem, B. Höfle, V. Wichmann, M. Rutzinger, A. Zipf // *Computers, Environment and Urban Systems*. – 2012. – Vol. 36. No 1. – P. 54-64. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.05.001>
15. Jwa Y. A piecewise catenary curve model growing for 3D power line reconstruction [Text] / Y. Jwa, G. Sohn // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 2012. – Vol.78. – No.12. – P. 1227-1240. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.78.11.1227>
16. Jwa Y. An implicit geometric regularization of 3D building shape using airborne LiDAR data [Text] / Y. Jwa, G. Sohn, W. Cho, V. Tao // *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2008. – Vol. 37. – P. 69-75.
17. Kim K. Building footprints extraction of dense residential areas from LiDAR data [Text] / K. Kim, J. Shan // *Annual Conference of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2011. – Vol. WI. – P. 193-198.
18. Kostrikov S. ELiT, multifunctional web-software for feature extraction from 3D LiDAR point clouds [Text] / S. Kostrikov, R. Pudlo, D. Bubnov, V. Vasiliev // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol.9. – No.11. – P. 650-885. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi9110650>
19. Kostrikov S. Geoinformation approach to the urban geographic system research (case studies of Kharkiv region) [Text] / S. Kostrikov, L. Niemets, K. Sehida [and other] // *Вісник Харківського національного університету імені*

- V. H. Karazina, seriya "Геологія. Географія. Екологія". – Вип. 49. – X.: ХНУ, 2018. – С. 107-121. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09>
20. Kostrikov S. Urban environment 3D studies by automated feature extraction from LiDAR point clouds [Text] / S. Kostrikov, D. Vubnov, R. Pudlo // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія". – Вип.52. – X.: ХНУ, 2020. – С. 156-182. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-12>
 21. Kostrikov S. Urban remote sensing with LIDAR for the Smart City concept implementation [Text] / S. Kostrikov // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія". – Вип. 50. – X.: ХНУ, 2019. – С. 101-124. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-08>
 22. Kostrikov S. Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. Urban Agglomeration [Text] / S. Kostrikov, D. Seryogin / Edited by A. Battisti and S. Baiani. – London – Milan – Zagreb: INTECH Open. – 2022. – P. 1-23. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102482>
 23. Lafarge F. Creating large-scale city models from 3D-point clouds: A robust approach with hybrid representation [Text] / F. Lafarge, C. Mallet // International Journal of Computer Vision . – 2012. – Vol.1. – P. 69-85. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-012-0517-8>
 24. Li Y. An improved building boundary extraction algorithm based on fusion of optical imagery and LIDAR data [Text] / Y. Li, H. Wu, R. An, H. Xu, Q. He, J. Xu // Optik. – 2013. – Vol. 124. – P. 5357-5362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.03.045>
 25. Lu M. Accuracy of transmission line modeling based on aerial LiDAR survey [Text] / M. Lu, Z. Kieloch // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol.23. – No.3. – P. 1655-1663. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911164>
 26. Lu Z. A volumetric approach to population estimation using Lidar remote sensing [Text] / Z. Lu, J. Im, L. Quackenbush // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2011. – Vol.77. – No.11. – P. 1145-1156. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.77.11.1145>
 27. Maas H. Two Algorithms For Extracting Building Models From Raw Laser Altimetry Data [Text] / H. Maas, G. Vosselman // Isprs Journal Of Photogrammetry & Remote Sensing. – 1999. – Vol. 54. – P. 153-163. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00004-0)
 28. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-209-2016>
 29. Mason D.C. Use of fused airborne scanning laser altimetry and digital map data for urban flood modelling [Text] / D.C. Mason, M.S. Horritt, N.M. Hunter, P.D. Bates // Hydrological Processes. – 2007. – Vol. 21. – No.11. – P. 1436-1447. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6343>
 30. McLaughlin R.A. Extracting transmission lines from airborne LiDAR data [Text] / R.A. McLaughlin // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2006. – Vol.3. – No.2. – P. 222-226. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.863390>
 31. Nan L. Polyfit: Polygonal surface reconstruction from point clouds / L. Nan, P. Wonka // Proceedings International Conference on Computer Vision. – 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.258>
 32. Nizar A. Reconstruction Of Buildings From Airborne Laser Scanning Data [Text] / A. Nizar, S. Filin, Y. Doytsher // ASPRS Annual Conference, Nevada. – 2006.
 33. Rottensteiner F. Automatic Generation of Building Models From LiDAR Data and the Integration of Aerial Images [Text] / F. Rottensteiner, C. Briese // ISPRS. – 2003. – Vol. 34. – P. 1335-1339. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCG.2003.1242381>
 34. Sampath A. Clustering Based Planar Roof Extraction From LiDAR Data [Text] / A. Sampath, J. Shan // American Society For Photogrammetry And Remote Sensing Annual Conference, Reno, Nevada, May 1-6. – 2006. – P. 1-6
 35. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030180>
 36. Tarsha-Kurdi F. Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from Lidar data [Text] / F. Tarsha-Kurdi, T. Landes, P. Grussenmeyer // IAPRSSIS – 2007. – Vol. XXXVI-3/W52 – P. 407-412.
 37. Tsubaki R. Unstructured grid generation using LiDAR data for urban flood inundation modelling [Text] / R. Tsubaki, I. Fujita // Hydrological Processes. – 2010. – Vol.24. – No.11. – P. 1404-1420. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7608>
 38. Voegtle T. Airborne laser scanning data for determination of suitable areas for photovoltaics [Text] / T. Voegtle, E. Steinle, D. Tovari // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2005. – Vol.36. – P. 215-220.
 39. Webster T.L. Flood-risk mapping for storm-surge events and sea-level rise using lidar for southeast New Brunswick [Text] / T.L. Webster, D.L. Forbes, E. MacKinnon, D. Roberts // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 32. – No.2. – P. 194-211. DOI: <https://doi.org/10.5589/m06-016>
 40. Weng A. Urban Remote Sensing, 2nd ed. [Text] / A. Weng, D. Quattrochi, P. Gamba (Editors). Boca Raton, USA: CRC Press, 2018. – 387 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781138586642>

41. Xiao Y. *Building segmentation and modeling from airborne LiDAR data* [Text] / Y. Xiao, C. Wang, J. Li [and other] // *International Journal of Digital Earth*. – 2014. – Vol. 8. – P. 694-709. DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.914252>
42. Yan J. *Quality analysis on RANSAC-based roof facets extraction from airborne LIDAR data* [Text] / J. Yan, W. Jiang, J. Shan // *IAPRSSIS*. – 2012. – Vol. XXXIX-B3. – P. 367-372. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-367-2012>
43. Yan W.Y. *Urban land cover classification using airborne LiDAR data: a review* [Text] / W.Y. Yan, A. Shaker, N. El-Ashmawy // *Remote Sensing of Environment*. – 2015. – Vol.158. – P. 295-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.001>
44. Костріков С. Візуальний аналіз урбаністичного середовища як складова урбогеосистемного підходу [Текст] / С. Костріков, Д. Серьогін, В. Бережний // *Часопис соціально-економічної географії*. – 2021. – Вип.30(1). – С. 7-23. DOI: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01>
45. Костріков, С. В. Програмне забезпечення ГІС для LiDAR-технології дистанційного зондування в цілях аналізу урбогеосистем [Текст] / С. В. Костріков, Д. Л. Кулаков, К. Ю. Сегіда // *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. – 2014. – Вип. 19. – С. 45-52.
46. Серьогін Д.С. *Особливості та переваги ГІС-моделювання міського середовища на підставі лідарної інформації* [Текст] / Д.С. Серьогін, С.В. Костріков // *Регіон – 2020: стратегія оптимального розвитку: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 8 – 9 жовтня 2020 р.)*. – Харків, 2020. – С. 34-36.

Principles of processing and three-dimensional modelling through lidar data for applied research of the urban environment

Denys Serohin,

PhD Student of the Department of Human Geography and Regional Studies,
V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

ABSTRACT

Introduction. The 3D modeling technology of the urban environment using LiDAR survey data expands the possibilities of urban research. With proper use of various methods, models and algorithms for processing and analyzing LiDAR data, they can significantly facilitate and open up new opportunities for many applications discussed in this paper.

The **main research objective** of the paper is to review methods for analyzing LiDAR survey data in urban studies and to present individual elements of the author's optimization of these methods.

Results. LiDAR data obtained as a result of laser scanning of the earth's surface from a certain vehicle form a three-dimensional terrain model in the point cloud form of varying density degrees. The post-processing of such data can branch out into many applications, which are discussed in this paper. The building extraction from a cloud of LiDAR points is performed using complex computational operations, the essence of which is to calculate the points of separate planes of the buildings roofs and then extract these points for 3D building modeling. There are many approaches to building extraction that aim to either improve the quality and accuracy of the extracted models or to speed up the data processing. Finding the optimal solution for 3D modeling of the urban environment is an urgent task in this area of research. Tracking changes in urban buildings involves comparing digital models of urban areas for different time periods in order to obtain the changes volume for each building. In a similar fashion, LiDAR data is used to assess damage to buildings by creating random points on the buildings walls and comparing their displacements before and after the damage. The population estimate using LiDAR data is based on a comparison of population data for census tracts with data on the number, area and volume of buildings in the same tracts obtained from processed LiDAR data. As a result, the expected population in each individual building can be calculated. Roads extraction from LiDAR data is performed by creating an image of the LiDAR laser pulse intensity and then comparing this image with a digital surface model. The article provides an example of a scheme for such road extraction. In addition, methods for extracting and mapping power lines by filtering the corresponding points are also considered. The ability to determine the exact size, slope, and exposure of a building's roof plane also makes it possible to estimate the potential level of solar radiation received by the roof, which can contribute to the optimal placement of solar power plants. Such an assessment may cause some difficulties, which are discussed in the article. The article proposes various optimization solutions for the considered methods, which were partially implemented in the ELiT software. In addition to effective tools for automatic data processing, the ELiT Project also provides an environment for high-quality visualization of results in a standard web-GIS interface.

Conclusions. LiDAR data, in combination with efficient algorithms for processing and filtering data, greatly facilitates the solution of a number of tasks related to area monitoring and urban planning. In the future, the high accuracy of LiDAR data and the possibility of their visualization in GIS will make it possible to analyze the urban development features in order to identify the urban geosystemic properties of the city.

Keywords: *LiDAR, GIS, LiDAR data processing, 3D modeling, urban remote sensing, automated feature extraction, urban geosystem, urban studies.*

References

1. Arrighi C., Brugiioni M. [and other]. (2013). Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data. *Natural Hazards and Earth System Science*. 13(5), 1375-1391. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-13-1375-2013>
2. Awrangjeb M., Ravanbakhsh M., Fraser C.S. (2010). Automatic building detection using LIDAR data and multispectral imagery. *Proc. Digital Image Computing: Techniques and Applications*. Sydney. 45-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DICTA.2010.17>
3. Awrangjeb M., Zhang C., Fraser C.S. (2013). Automatic extraction of building roofs using LiDAR data and multi-spectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 83, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.05.006>
4. Borrmann D. Elseberg J. [and other]. (2011). The 3D hough transform for plane detection in point clouds: a review and a new accumulator design. *3D Research*. 2, 1-13. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/3DRes.02\(2011\)3](http://dx.doi.org/10.1007/3DRes.02(2011)3)
5. Dong P., Chen, Q. (Editors). (2018). *LiDAR Remote Sensing and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 246. DOI: <http://dx.doi.org/10.4324/9781351233354>
6. Dong P., Guo H.D. (2012). A framework for automated assessment of post-earthquake building damage using geospatial data. *International Journal of Remote Sensing*. 33, 81-100. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.582188>
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.496804>
8. Dong P., Zhong R., Yigit A. (2018). Automated parcel-based building change detection using multitemporal airborne LiDAR data. *Surv. Land Inf. Sci.* 77, 5-13.
9. Dorninger P., Pfeifer N. (2008). A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds. 8, 7323-7343. DOI: <https://doi.org/10.3390%2Fs8117323>
10. Fischler M.A., Bolles R.C. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*. 24, 381-395. DOI: <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
11. Huang H., Brenner C. (2011). Rule-based roof plane detection and segmentation from laser point clouds. *Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. 293-296, DOI: <https://doi.org/10.1109/JURSE.2011.5764777>
12. Ioannidis C., Psaltis C., Patsiou C. (2009). Towards a strategy for control of suburban informal buildings through automatic change detection. *Computers, Environment and Urban Systems*. 33, 64-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.010>
13. Jakubiec J. A., Reinhart C. F. (2013). A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations. *Solar Energy*. 93, 127-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.022>
14. Jochem A., Höfle B. [and other]. (2012). Area-wide roof plane segmentation in airborne LIDAR point clouds. *Computers, Environment and Urban Systems*. 36(1), 54-64. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.05.001>
15. Jwa Y., Sohn G. (2012). A piecewise catenary curve model growing for 3D power line reconstruction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 78 (12) 1227-1240. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.78.11.1227>
16. Jwa Y., Sohn G., Cho W., Tao V. (2008). An implicit geometric regularization of 3D building shape using airborne LiDAR data. 37, 69-75.
17. Kim K., Shan J. (2011). Building footprints extraction of dense residential areas from LiDAR data. *Annual Conference of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. WI, 193-198.
18. Kostrikov S, Bubnov D, Pudlo R. (2020). Urban environment 3D studies by automated feature extraction from LiDAR point clouds. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 52, 156-182. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-12>
19. 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. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-08>
20. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi9110650>
21. Kostrikov S., Seryogin D. (2022). Urbogeosystemic Approach to Agglomeration Study within the Urban Remote Sensing Frameworks. *Urban Agglomeration: INTECH Open*. 1-23, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102482>
22. 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, 107-121. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-09>
23. Lafarge F., Mallet C. (2012). Creating large-scale city models from 3D-point clouds: A robust approach with hybrid representation. *International Journal of Computer Vision*. 1, 69-85. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-012-0517-8>
24. Li Y., Wu H., An. R [and other]. (2013). An improved building boundary extraction algorithm based on fusion of optical imagery and LIDAR data. *Optik*. 124, 5357-5362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.03.045>

25. Lu M., Kieloch Z. (2008). Accuracy of transmission line modeling based on aerial LiDAR survey. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 23(3), 1655-1663. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911164>
26. Lu Z, Im J, Quackenbush L. (2011). A volumetric approach to population estimation using Lidar remote sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 77(11), 1145-1156. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.77.11.1145>
27. Maas H., Vosselman G. (1999). Two Algorithms For Extracting Building Models From Raw Laser Altimetry Data. *Isprs Journal Of Photogrammetry & Remote Sensing*. 54, 153-163. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00004-0)
28. 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, DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-209-2016>
29. Mason D.C., Horritt M.S., Hunter N.M., Bates P.D. (2007). Use of fused airborne scanning laser altimetry and digital map data for urban flood modelling. *Hydrological Processes*. 21(11), 1436-1447. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6343>
30. McLaughlin R.A. (2006). Extracting transmission lines from airborne LiDAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 3(2), 222-226. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.863390>
31. Nan, L., Wonka, P. (2017). Polyfit: Polygonal surface reconstruction from point clouds / L. Nan, P. Wonka // *Proceedings International Conference on Computer Vision*. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.258>
32. Nizar A., Filin S., Doytsher Y. (2006). Reconstruction Of Buildings From Airborne Laser Scanning Data. *ASPRS Annual Conference, Nevada*.
33. Rottensteiner F., Briese C. (2003). Automatic Generation of Building Models From LiDAR Data and the Integration of Aerial Images. *ISPRS*. 34, 1335-1339. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCG.2003.1242381>
34. Sampath A., Jie Shan. (2006). Clustering Based Planar Roof Extraction From LiDAR Data. *ASPRS Annual Conference, Reno, Nevada*.
35. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030180>
36. Tarsha-Kurdi F., Landes T., Grussenmeyer P. (2007). Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from Lidar data. *IAPRSSIS*. XXXVI-3/W52, 407-412.
37. Tsubaki R., Fujita I. (2010). Unstructured grid generation using LiDAR data for urban flood inundation modelling. *Hydrological Processes*. 24(11), 1404-1420. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7608>
38. Voegtle T., Steinle E., Tovari D. (2005). Airborne laser scanning data for determination of suitable areas for photovoltaics. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 36, 215-220.
39. Webster T. L., Forbes D.L., MacKinnon E., Roberts D. (2006). Flood-risk mapping for storm-surge events and sea-level rise using lidar for southeast New Brunswick. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 32(2), 194-211. DOI: <https://doi.org/10.5589/m06-016>
40. Weng A, Quattrochi D, Gamba P. (Editors). (2018). *Urban Remote Sensing*, 2nd ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 387. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781138586642>
41. Xiao, Y., Wang, C. Li, J. [and other]. (2014). Building segmentation and modeling from airborne. *International Journal of Digital Earth*, 8, 694-709. DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.914252>
42. Yan J., Jiang W., Shan, J. (2012). Quality analysis on RANSAC-based roof facets extraction from airborne LIDAR data. *IAPRSSIS*. XXXIX-B3, 367-372. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-367-2012>
43. Yan W.Y., Shaker A., El-Ashmawy N. (2015). Urban land cover classification using airborne LiDAR data: a review. *Remote Sensing of Environment*. 158, 295-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.001>
44. Kostrikov S., Serohin D., Berezhnoy V. (2021). Vizualnyi analiz urbanistychnoho seredovishcha yak skladova urboheosystemnoho pidkhodu. *Human Geography Journal*, 30(1), 7-23. DOI: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2021-30-01>
45. Kostrikov, S., Kulakov, D., Sehida, K. (2014). Programme zabezpechennya GIS dlya LiDAR-technologiei dustantsijnogo zonduvannya v tsilyah analizu urbogeosystem [GIS-software for the urban geosystem analysis with LiDAR-technique]. *Proceedings of GIS Forum*, 19, 45-52.
46. Serohin D.S., Kostrikov S.V. (2020). Osoblyvosti ta perevahy GIS-modeliuvannia miskoho seredovishcha na pidstavi lidarnoi informatsii. *Region 2020: Human-Geographical aspects. Proceedings of the International Conference for young scientists and post-graduate students*. Kharkiv, 34-36.

Received 17 June 2022

Accepted 6 July 2022