

**Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА**

Кафедра геодезії та землеустрою

Небор Ігор Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**« Застосування наземного лазерного сканування та ГІС для 3D-
документування об'єктів культурної спадщини України »**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

I. Небор, студент групи ГЗз-23-1К

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник к.т.н., доц. Пилип'юк Ростислав Романович
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри
(посада)

проф. Микола ПРИХОДЬКО
(підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Небор Ігор Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Застосування наземного лазерного сканування та ГІС для 3D-документування об'єктів культурної спадщини України»

керівник роботи к.т.н., доц. Пилип'юк Ростислав Романович

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Історична довідка та регіональні порівняння

2. Методи та дані

3. Результати

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Історична довідка та регіональні порівняння		
2	Методи та дані		
3	Результати		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

(підпис)

Небор І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

Стрімкий прогрес у сфері технологій дистанційних вимірювань значно поглибив потенціал вивчення й охорони архітектурних надбань, особливо у контексті точного запису їхніх даних, аналізу просторових характеристик та формування електронних моделей.

Ключову роль серед цих інструментів відіграють підходи тривимірної просторової реєстрації, котрі забезпечують можливість реконструкції заплутаної геометрії історичних будівель із вражаючою деталізаційністю.

У рамках цього дослідження було здійснено оцінку дієвості використання наземного лазерного сканування (НЛС), яке базується на технології LiDAR, з метою цифрової інвентаризації фасадних поверхонь

Бернардинського монастиря (нині Собор Святого Андрія).

Дані, отримані шляхом сканування, візуалізовані як кольорові скупчення точок, які формують надійний геопросторовий базис для побудови точних тривимірних образів та подальшого аналізу архітектурного задуму споруди.

Збільшення наочності моделей досягається завдяки зведенню разом даних лазерного сканування та високоякісних RGB-фотознімків.

Фотографічний матеріал, опрацьований у програмному комплексі RealityCapture, дає змогу автоматично формувати реалістичні тривимірні моделі, що вирізняються як геометричною вивіреністю, так і точним переданням кольорових та фактурних деталей.

Цей метод є надзвичайно корисним, зокрема, для детального опрацювання різьблення та об'ємних частин будівельних фасадів.

Окрему значущість у цьому дослідженні надано синергії даних, отриманих шляхом лазерного сканування та фотограмметричних методів, із застосуванням функціоналу геоінформаційних систем.

Задіювання ГІС, включно з різноманітними хмарними сервісами, надає змогу впорядковано архівувати просторові відомості, генерувати ортофотоплани фасадів, створювати відповідні тематичні карти, а також здійснювати складні просторово-аналітичні обчислення.

У поєднанні з наземними лазерними сканерами подібні підходи формують потужну платформу для моніторингу поточного технічного стану історичних об'єктів, визначення можливих загроз їхнього погіршення, а також наукового обґрунтування необхідних охоронних втручань.

Отримані висновки засвідчують, що злиття технологій лазерного сканування (LiDAR), фотограмметрії та ГІС являє собою високопродуктивний механізм для цифрової фіксації й охорони архітектурної спадщини, котрий надає необхідну наукову базу для дослідницьких циклів, реставраційних робіт та забезпечення тривалої присутності історичних пам'яток.

Ключові слова: дистанційне зондування; архітектурна спадщина; тривимірне моделювання; хмара точок; LiDAR; геоінформаційні системи; фотограмметрія.

Abstract

Rapid progress in remote sensing technologies has significantly deepened the potential for studying and protecting architectural heritage, especially in the context of accurate recording of their data, analysis of spatial characteristics and formation of electronic models.

A key role among these tools is played by three-dimensional spatial registration approaches, which provide the possibility of reconstructing the intricate geometry of historical buildings with impressive detail.

This study assessed the effectiveness of using terrestrial laser scanning (TLS), based on LiDAR technology, to digitally inventory the facade surfaces of the Bernardine Monastery (now St. Andrew's Cathedral).

The data obtained by scanning are visualized as colored clusters of points, which form a reliable geospatial basis for constructing accurate three-dimensional images and further analysis of the architectural design of the building.

Increased visibility of the models is achieved by combining laser scanning data and high-quality RGB photographs.

Photographic material processed in the RealityCapture software package allows you to automatically create realistic three-dimensional models that are distinguished by both geometric accuracy and accurate reproduction of color and texture details.

This method is extremely useful, in particular, for detailed processing of carvings and volumetric parts of building facades.

Special importance in this study is given to the synergy of data obtained by laser scanning and photogrammetric methods with the use of the functionality of geographic information systems.

The use of GIS, including various cloud services, allows you to systematically archive spatial information, generate orthophotomaps of facades,

create appropriate thematic maps, and also perform complex spatial-analytical calculations.

In combination with ground-based laser scanners, such approaches form a powerful platform for monitoring the current technical condition of historical sites, identifying possible threats to their deterioration, as well as scientifically justifying the necessary conservation interventions.

The obtained conclusions demonstrate that the fusion of laser scanning (LiDAR), photogrammetry and GIS technologies is a highly productive mechanism for digital recording and conservation of architectural heritage, which provides the necessary scientific basis for research cycles, restoration work and ensuring the long-term presence of historical monuments.

Keywords: remote sensing; architectural heritage; three-dimensional modeling; point cloud; LiDAR; geographic information systems; photogrammetry.

ЗМІСТ

Вступ

1. Історична довідка та регіональні порівняння

1.1 Причини актуальності цифрового документування саме цього об'єкта

1.2 Регіональні порівняння: Львів і архітектура Центрально-Східної Європи

2. Методи та дані

2.1. Територія дослідження

2.2 Методологічний підхід

2.3. Тривимірне обстеження та моделювання собору Св. Андрія

3. Результати

3.1. Реєстрація даних лазерного сканування

3.2. Оцінка точності результатів лазерного сканування

3.3. Реєстрація хмари точок

3.4. Усунення шуму хмари точок та CAD-орієнтований аналіз стилістики

3.5. Використання ГІС для управління даними та картографування об'єкта сакральної спадщини

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

Оцифрування архітектурної спадщини стає все більш критичним кроком з огляду на зростаючу небезпеку від антропогенних, природних та суспільних впливів.

Пам'ятки історії, які складають основу культурного коду міст, невпинно деградують через природний знос матеріалів, експозицію до докiлля, надмірну експлуатацію та загрози збройних конфліктів.

Це, своєю чергою, диктує необхідність впровадження передових, неруйнівних технологій для точної реєстрації їхнього тривимірного стану з метою подальшого дослідження, відстеження змін та забезпечення охорони.

Протягом останніх років технології дистанційного зондування зазнали помітного прогресу, надаючи змогу досягти якісно нового ступеня деталізації та всебічності просторових відомостей.

Серед цих напрямів виділяється наземне лазерне сканування, яке використовує технологію LiDAR і дає змогу швидко збирати вичерпні відомості про конфігурацію об'єктів зі складною архітектурою.

Підсумком такого роду знімання є насичені набори точок, що фіксують дійсне розташування граней досліджуваного предмета у тривимірному просторі, які, своєю чергою, слугують підґрунтям для формування об'ємних цифрових моделей.

Хоча лазерні дані вирізняються значною точністю у вимірюванні, вони часом не надають достатньої наочності для будови моделей.

З огляду на це, нагальною є потреба об'єднати результати наземного лазерного сканування з фотограмметричними підходами.

Це дає змогу збагатити суто геометричні відомості доданням інформації про колір та фактуру поверхонь.

Завдяки такому поєднанню стає можливим створення 3D-моделей високого ступеня реалістичності, які корисно використовувати не лише для

інженерного огляду, але й для наочного представлення та демонстрації здобутих результатів.

Геоінформаційні технології займають чільне місце у нововітніх методах документування об'єктів архітектурної спадщини.

Використання цих систем надає змогу здійснити прив'язку до місцевості, організовано зберігати й аналізувати дані, отримані шляхом лазерного сканування та фотограмметричних зйомок.

Здатність вбудовувати тривимірні моделі у ГІС-платформи відкриває шлях до формування високоточних ортофотопланів фасадів, електронної проєктної документації та різноманітних тематичних матеріалів.

Крім того, це дає можливість проводити просторовий аналіз, що є критично важливим для діагностики поточного стану історичних будівель та розробки стратегій їхнього збереження.

У даній праці втілено цілісний метод цифрування фасадів монастиря Бернардинців (нині собор Святого Андрія), що інтегрує наземне лазерне сканування, обробку фотограмметричних знімків та використання геоінформаційних інструментів.

Головним завданням вивчення є здобуття точних у метричному аспекті просторових відомостей, розробка детальних тривимірних макетів та ортофотопланів фасадів, а також визначення потенціалу їх застосування у наукових дослідженнях та при розробці планів реставраційних робіт.

Описана методологія слугуватиме фундаментом для вдосконалення сучасних технік фіксації архітектурної спадщини та придатна для адаптації до оцифрування інших пам'яток, які мають схожі просторові та структурні особливості.

1. Історична довідка та регіональні порівняння

Громада Бернардинського монастиря (нині відома як Собор Святого Андрія) розташувалася якраз на умовному розмежуванні старовинного центрального Львова та прилеглих територій, у районі, де укріплення міста та духовні споруди історично перетиналися найтісніше.

Таке географічне розміщення зумовило двоїсту природу цього архітектурного ансамблю: з одного боку, це був чернечий осередок, що виконував функції богослужіння, навчання та господарювання, а з іншого — складова частина оборонної системи міста, вбудована у фортифікаційну мережу.

Для Львова ця споруда слугувала не лише сакральним вузлом, а й орієнтиром у просторовому розподілі: весь комплекс створював виразну домінанту на шляхах, що вели до серцевини міста, і мав прямий вплив на архітектурне оформлення прилеглих площ та магістралей.

Поступові етапи розбудови монастиря простежуються через низку будівельних періодів, кожний з яких відображав як еволюцію архітектурної моди, так і нагальні потреби як самої общини, так і міського середовища.

Початкові стадії були зосереджені на становленні необхідної монастирської бази та зведенні першого культового об'єкту.

Подальше вдосконалення усього комплексу припало на час жвавого архітектурного зростання Львова, коли величні храми та чернечі обителі почали слугувати виразниками статусу, непохитності й релігійної видимості.

Вирішальним етапом стало зведення мурованого собору та збільшення площі житлових і господарських будівель, що піднесло цю споруду до числа найбільш значущих духовних орієнтирів міста.

Одночасно з цим відбувалося укріплення стін та створення елементів захисту: це підкреслює унікальну особливість Львова, де релігійні

комплекси часто набували рис "оборонної архітектури" — не як повноцінні фортеці, а як вимушена відповідь на прикордонне розташування та постійну загрозу в регіоні.

Андріївська церква входить до ансамблю будівель, де пишність бароко гармонійно співіснує з конструктивним підходом, успадкованим з давніших часів.

Лицьова сторона будівлі утворює виразну лицеву панораму: головна осьова лінія, значний вхідний отвір, вертикальні розділення, скульптурні оздоба та багатоярусна форма.

Подібні архітектурні прийоми слугували як для краси, так і для "інформування" — фасад чітко демонструє високий ранг об'єкта та його місце у міському середовищі.

Особливої уваги заслуговує оздоблення (фігури, тяги, пілястри, заглиблення), яке разом із грою світла й тіні формує об'ємну фактуру.

Для нинішньої 3D-фіксації це суттєво, оскільки фасад містить велику кількість дрібних елементів та різких змін у глибині, що зазвичай вважається "проблемними ділянками" при використанні як фотограмметрії, так і лазерного сканування.

Комплекс святого Бернарда являє собою не просто архітектурну споруду, а й значущу складову культурної історії Львова.

Його вагомість зумовлена збігом кількох чинників: історичне підґрунтя формування міста, релігійні звичаї, зв'язки між різними спільнотами, а також неперервність міського ландшафту.

Для дослідницької роботи це означає, що створення цифрової копії необхідне не суто з естетичної мети — задля отримання гарної тривимірної репрезентації, — а як спосіб каталогізації відомостей про просторову організацію об'єкта, яка може бути пошкоджена або загублена з плином часу внаслідок деградації, реконструкцій чи змін оточення.

1.1 Причини актуальності цифрового документування саме цього об'єкта

Собор Святого Андрія вирізняється такими ознаками:

- багата пластична обробка фасаду (складні вигини, скульптурні елементи, глибоко заглиблені ніші),
- змішування різнорідних матеріалів та поверхонь (фактур),
- значна висота споруди та труднощі з детальним вимірюванням на місці,
- інтенсивний зовнішній вплив (вібраційні навантаження, запилення, вологість, зміна температурних режимів).

Обумовлені цими чинниками, об'єкт є взірцевим для використання технологій наземного лазерного сканування або фотограмметрії, що дає змогу формувати ортоплани фасадів та точні тривимірні моделі для подальшого аналізу стану конструкцій і розробки реставраційних стратегій.

1.2 Регіональні порівняння: Львів і архітектура Центрально-Східної Європи

Львівські забудови нерідко поставали у міському ландшафті як комплекси, що виконували чимало функцій.

На тлі багатьох центрів Центральної Європи, де чернечі обителі здебільшого перебували "осторонь" від фортифікаційних споруд, у Львові простежується тісніший взаємозв'язок із системою укріплень міста та стратегічними шляхами, що ведуть до його серцевини.

Орден бернардинів, подібно до низки інших архітектурних утворень у Львові, ілюструє цю особливість завдяки своєму розміщенню на підступах до старовинного центру та особливостям мурів чи загальному планувальному підходу.

Зіставлення львівських осередків домініканців та єзуїтів

- Домініканський архітектурний комплекс схиляється радше до створення величної головної домінантної будівлі, зосереджуючись на масивності та внутрішньому просторі (їхня просторова структура є справді вражаючою).

- Натомість, єзуїтський костел виявляє інший підхід до презентації – його фасад має впорядковану, "наукову" побудову, що відображає освітню та місіонерську мету чернечого згромадження.

- Ансамбль бернардинців виділяється тим, що поєднує урочистість із "прикордонною" практичністю, завдяки чому елементи його фасаду та межі всієї споруди набувають значної ваги в контексті міського планування.

Для належного цифрового документування слід зважати на те, що різні архітектурні форми фасадів обумовлюють різні підходи до фотографування: так, наприклад, у випадку Бернардинського комплексу вирішальне значення має зображення рельєфності та дрібних архітектурних деталей, тоді як для інших ансамблів акцент зміщується на великомасштабні, рівні поверхні та значні криволінійні елементи.

У межах Галичини сакральні будівлі епохи бароко зазвичай демонструють низку спільних характеристик: фронтальну організацію фасадної площини, акцентований портал, чітко виражену вертикальну спрямованість та насичене оздоблення.

Проте архітектурні утворення Львова, особливо комплекс при костелі Святого Андрія (друга назва Бернардинського), виділяються завдяки таким аспектам:

- помітно вищому ступеню пропрацювання дрібних елементів та скульптурних оздоблень,

- їхній глибокій інтеграції у міську структуру (тісна забудова, важливі перехрестя, площі),

- наявності історично багат шарового середовища, що створює труднощі як для зйомок на місці, так і для подальшого аналізу еволюції об'єкта у часі.

Монастирські ансамблі у містах Центральної Європи (на кшталт Кракова, Любліна чи Праги) нерідко демонструють схожі стилістичні ознаки (барокові чи ренесансні нашарування), проте їхнє оточення суттєво відрізняється:

- У місті Лева спостерігається схильність до зведення сакральних ансамблів, оточених захисними мурами;
- Візуальне оформлення головних частин будівель у Львові часто вирізняється багатшою ліпниною та виразнішим грою світла й тіні, що зумовлено стилістикою елементів та типом використаних матеріалів (камінь/тиньк);
- Міське середовище Львова формує значно більше зон, прихованих від прямого огляду, та затінених ділянок, що безпосередньо позначається на точності фотограмметричних даних та ефективності лазерного сканування з наземних позицій.

З точки зору методології, це передбачає можливість використання "західноєвропейських" підходів, проте їх обов'язково слід коригувати з огляду на специфіку місцевості (тіснота вулиць, різниця рівнів рельєфу, інтенсивність руху транспорту, обмеженість місць для розміщення обладнання).

Львівський монастир Бернардинців слугує взірцем для оцифрування, адже він у собі об'єднує:

- значну орнаментальну насиченість,
- ключову роль у містобудівній організації старого осередку,
- характерні для Галича архітектурні риси культових споруд,
- риси загальноєвропейського стилю, які були адаптовані згідно з місцевими міськими та історичними умовами.

З огляду на це, залучення лазерного сканування з поверхні, фотограмметрії та ГІС у рамках єдиного робочого циклу виглядає не просто технічно виправданим, а й ґрунтується на міцній методологічній базі.

Для того, аби систематизувати знання про історично-архітектурні аспекти сакральних комплексів у межах регіону, а також з'ясувати, наскільки вони відповідають сучасним підходам до цифрового фіксування, було здійснено зіставлення вибраних споруд зі Львова, Галичини та населених пунктів Центрально-Східної Європи. Акцент робився на вивченні архітектурного планування фасадів, їхньому розташуванні у міському середовищі, ступені орнаментальної насиченості та можливих труднощах, що можуть виникнути під час наземного лазерного сканування чи фотограмметричних робіт.

Підсумки цього розбору згруповано у Таблиці 1, яка демонструє порівняння найважливіших ознак вивчених зразків та допомагає визначити найкращі способи їх тривимірного зафіксування.

Таблиця 1 — Регіональне порівняння та їх придатність до цифрового 3D-документування

Об'єкт	Архітектурний стиль та період	Характер фасаду	Містобудівний контекст	Складність для наземне лазерне сканування	Складність для фотограмметрії	Оптимальний метод документування
Бернардинський монастир (собор Святого Андрія)	Бароко з ренесансним и нашаруваннями	Багатопластичний фасад, скульптури, глибокі ніші, виразна вертикальна вісь	Щільна історична забудова, обмежені точки зйомки, вузькі вулиці	Висока (оклюзії, різка зміна глибини)	Висока (тіні, перекриття, дрібний декор)	наземне лазерне сканування + фотограмметрія + ГІС
Домініканський собор	Пізнє бароко	Масивні об'єми, відносно гладкі поверхні	Центральна частина міста, відкрита площа	Середня	Середня	наземне лазерне сканування + фотограмметрія
Єзуїтський костел (св.	Бароко	Строга симетрія, менш	Щільна міська тканина	Середня	Середня	наземне лазерне

Об'єкт	Архітектурний стиль та період	Характер фасаду	Містобудівний контекст	Складність для наземне лазерне сканування	Складність для фотограмметрії	Оптимальний метод документування
Петра і Павла)		виражена пластика				сканування + ортофасади
Колегіальний костел Святої Трійці	Ренесанс–бароко	Спокійні фасади, обмежена кількість декору	Напіввідкрите середовище	Низька	Низька	Фотограмметрія + вибірковий наземне лазерне сканування
Костел св. Петра і Павла	Бароко	Чітка фронтальна композиція, великі площини	Відносно відкрита міська структура	Низька–середня	Середня	Фотограмметрія + наземне лазерне сканування
Костел св. Анни	Готика / барокові перебудови	Вертикально орієнтовані фасади, складна геометрія	Щільна історична забудова	Середня	Висока	наземне лазерне сканування + ГІС

2. Методи та дані

2.1. Територія дослідження

Досліджуваний об'єкт знаходиться в межах історично складеного урбаністичного ландшафту Львова, котрий вирізняється заплутаним просторовим облаштуванням та інтенсивним антропогенним тиском.

Структура поселення у цій частині міста розвивалася протягом тривалого часу, що спричинило нагромадження архітектурних рішень різних епох, зміни висот забудови та суттєве роздроблення незабудованих (відкритих) зон.

Ансамбль Бернардинського монастиря (нині собор Святого Андрія) посідає центральне місце серед історичних орієнтирів на південному сході історичного центру.

Його розташування на межевій зоні між колишнім укріпленням центром та територіями за його межами визначило як градобудівну функцію цього комплексу, так і неповторність його архітектурного вигляду.

Лицьова сторона будівлі звернена до щільної міської забудови, що значно перешкоджає прямому підходу до пам'ятки та впливає на формування сприйняття навколишнього простору.

Кліматичні особливості цієї місцевості передбачають значні зміни температури залежно від пори року, досить високий рівень вологості у перехідні періоди, а також повторювані фази замерзання й розморожування.

Подібні чинники чинять руйнівний вплив на поверхні, покриті каменем чи штукатуркою, спричиняючи появу дрібних тріщин, осипання оздоблювальних елементів та поступову зміну форми окремих архітектурних складових.

Якщо додати до цього міське мерехтіння та дію транспортних шляхів, виникає тривала загроза для підтримки початкових розмірів та форми фасадних конструкцій.

У ситуаціях, де відкриті площі є дефіцитними, освітлення нерівномірне, а зони накладання численні, звичні способи вимірювань не дають змоги якісно зафіксувати форму об'єкта.

Отже, ця ділянка для вивчення є знаковою для впровадження безконтактних технік тривимірного протоколювання, які спроможні функціонувати у заплутаних міських умовах, не зачіпаючи матеріальну будову артефакту.

2.2 Методологічний підхід

У основу методології дослідження закладено ідею зведення незалежних даних про просторове розташування, після чого отриману інформацію збирають у взаємопов'язане цифрове поле.

Фундаментальним інструментом для фіксації геометричних параметрів виступило наземне лазерне променеве зондування, що спроможне збирати насичені просторові показники без необхідності фізичного дотику до конструктивного покриття.

Організація польових робіт узгоджувалася з урахуванням заплутаної архітектурної будови фасаду, а також значної висоти елементів і тих обставин, що диктувалися міським середовищем.

Місця для сканування обиралися з метою гарантувати взаємне покриття зон знімання, а також мінімізувати обсяг неартикульованих (не охоплених контролем) ділянок.

Першочергове значення надавалося ділянкам із виразним рельєфом, де стрімкі зміни висоти та наявність орнаментів вимагали вищої точності просторового розділення.

Опитування за допомогою лазерного сканера дало змогу сформувати насичене точкове поле, що точно віддзеркалює фактичне розташування фасадних площин та архітектурних компонентів.

Аби подолати недоліки лазерного зондування, зокрема тіньові ділянки й надмірно контрастне освітлення, було здійснено додаткові фотограмметричні заходи, використовуючи цифрові знімки відмінної роздільної здатності.

Ці дані стали фундаментом для накладення текстур на моделі та деталізації візуального вигляду поверхонь.

Наступний етап роботи включав поступове зведення даних лазерного сканування та фотограмметрії, з подальшою геодезичною прив'язкою отриманих результатів.

Включення зібраної інформації у єдине геоінформаційне поле перетворило сукупність окремих замірів на впорядковану цифрову модель, що може бути застосована як для аналізу, так і для подальшого проектування.

Сформований цифровий масив даних відкриває шлях до виготовлення метрично виважених ортогональних проєкцій фасадів, тривимірних репрезентацій та додаткових матеріалів для аналізу.

Ці результати можуть слугувати для верифікації просторових параметрів об'єкта, обґрунтування рішень щодо реставрації та довготривалого спостереження за його еволюцією.

Використана методика є такою, що її можна повторити, і вона придатна для адаптації з метою фіксації стану інших архітектурних надбань, розташованих у непростому міському середовищі.

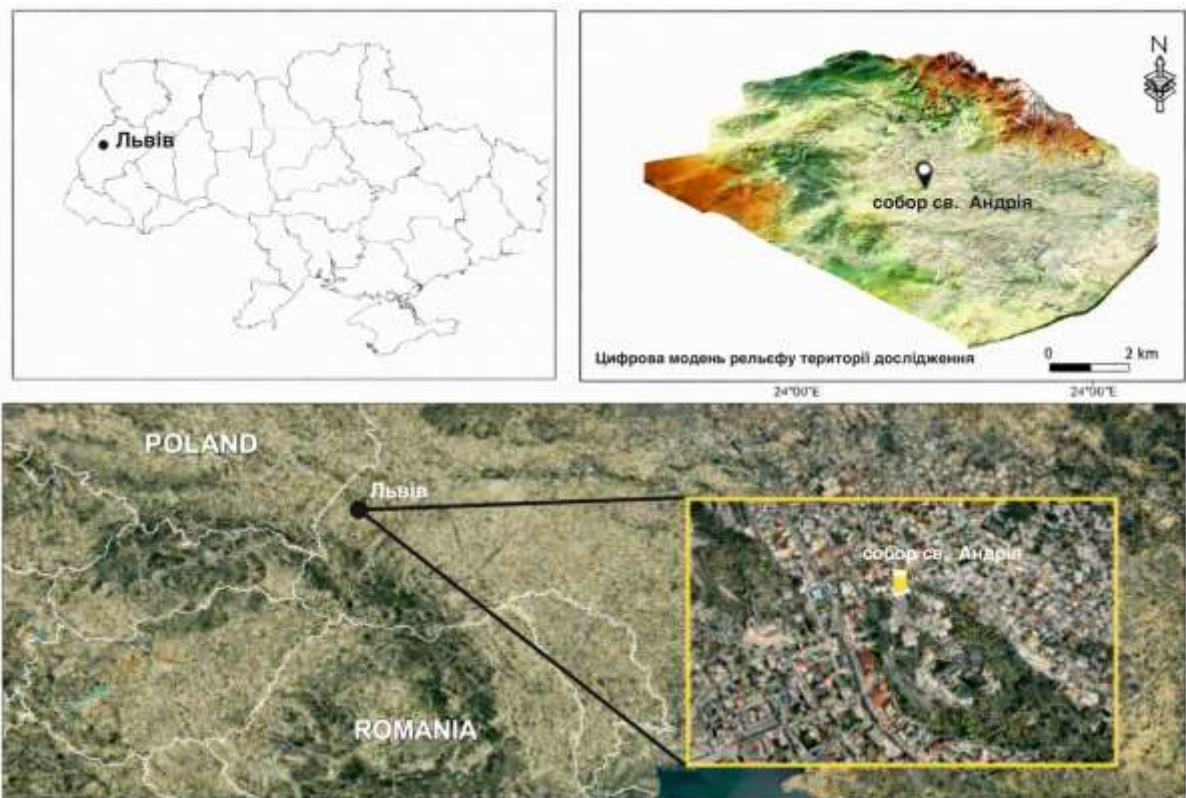


Рисунок 1. Огляд досліджуваної території для

Увесь зібраний геопросторовий масив було уніфіковано в рамках однієї системи, застосувавши особливі мітки-ідентифікатори для кожного запису.

Це гарантувало впорядкованість зберігання та спростило наступні етапи обробки.

Протягом збору даних у полі, ми систематично створювали дублікати на низці потужних зовнішніх накопичувачів, що суттєво зменшило ймовірність втрати будь-яких відомостей.

По закінченні фази польових досліджень, зібрані матеріали було передано до стаціонарної схованки для їхнього тривалого збереження та подальшого вивчення.

Наступною стадією було піддання даних, отриманих шляхом наземного лазерного сканування, стадії попередньої підготовки.

Ця підготовка охоплювала такі етапи, як просторове узгодження окремих знімків, їх систематизація та видалення небажаних артефактів (шумів).

Усі операції здійснювалися за допомогою професійних інструментів для тривимірного моделювання, а саме – RealityCapture та Autodesk ReCap.

Внаслідок цього процесу вдалося отримати впорядковані файли хмар точок, збережені у загальноприйнятих форматах, а також сформувати надзвичайно деталізовані тривимірні проєкції досліджуваного об'єкта.

Використовуючи згруповані хмари точок, було розроблено двовимірні архітектурні креслення, що є еталонно точним базисом для майбутніх наукових пошуків та відновлювальних завдань.

Плани доопрацьовувались у програмних комплексах Autodesk AutoCAD та Revit, щоби значно покращити точність геометрії та деталізацію усіх складових.

Згодом ці напрацювання було перетворено у формати, сумісні для роботи на різних платформах та для тривалого зберігання.

Сформований електронний архів містить об'ємні моделі, доповнені графічними супровідними матеріалами, фотофіксацією та відеозаписами, причому кожен елемент забезпечено відповідним комплектом описових даних.

Такий метод дає змогу багаторазово застосовувати отримані матеріали у наступних проєктах та забезпечує їхню довговічність.

Подальша інтеграція цих результатів у геоінформаційну систему дозволила здійснити точне позиціонування зібраних відомостей, поєднавши їх із архівними картами та додатковою просторовою інформацією.

Урешті, сформований цифровий архів являє собою комплексну інформаційну базу, що слугує для дослідження, адміністрування та консервації об'єктів архітектурної спадщини.

Задум робочого циклу дає змогу ухвалювати обґрунтовані рішення щодо захисту пам'яток, а також гарантує їхнє тривале цифрове збереження.

На рисунку 2 представлено спрощену концептуальну блок-схему, яка охоплює ключові кроки: від накопичення відомостей до їхнього включення у геоінформаційний простір та архівування.



Рисунок 2. Схематична блок-схема використаної методології

2.3. Тривимірне обстеження та моделювання собору Св. Андрія

Апаратне документування сакральних будівель, які характеризуються багатою архітектурною пластикою, вимагає застосування прецизійних, неконтактних методів знімання.

Лицьова частина Бернардинського монастиря (нині – собор Святого Андрія у Львові) вирізняється густою орнаментациєю, присутністю скульптур, заглиблень (ніш), виступів (карнизів) та поверхонь, розташованих на різних висотах, що накладає підвищені вимоги на точність просторового закріплення об'єкта.

Задля гарантування достовірної геометричної фіксації та подальшого дослідження стану історичної споруди, обґрунтованим є залучення технологій наземного лазерного сканування, що базуються на принципі LiDAR.

Для збереження стародавніх кам'яних будівель подібного роду необхідна міліметрова точність при відтворенні конфігурації фасадів та елементів декору.

Навіть невеликі розбіжності можуть спричинити хибні розрахунки у процесі реставрації або при стеженні за змінами конструкцій.

Щоб здобути просторові дані з великою деталізацією, було задіяно наземне лазерне сканування.

Використовувався сканер FARO Focus Premium (версія LS9-H 150), який гарантує густу насиченість хмари точок та надійну точність вимірювань у метричному сенсі.

Технічні параметри апарату сканування — зокрема, здатність охоплювати повне коло у горизонтальній площині та охоплення значного діапазону дистанцій — дали змогу якісно зафіксувати як загальну конфігурацію лицьової частини будівлі, так і найдрібніші орнаменти.

Це має критичне значення при роботі з бароковими архітектурними зразками, де рельєфність поверхонь та гра світла й тіні деталей є ключовими аспектами.

Розташування точок сканування планувалося, беручи до уваги оточення будівлі та дефіцит простору перед нею.

Густа забудова, обмежена ширина шляхів та наявність об'єктів, що заважають, вимагали встановлення сканера у кількох місцях, аби гарантувати повне охоплення об'єкта та звести до мінімуму зони, які не проглядаються.

Посилена увага була зосереджена на сегментах із найбільш заплутаною формою, а саме: різьблені прикраси та верхні рівні фасаду.

Аби покращити точність просторового зведення окремих відсканованих зображень, були застосовані штучно створені репери, розміщені у межах обстежуваної території.

Це дало змогу стабілізувати процес реєстрації точкових сукупностей та сформувати суцільний тривимірний масив інформації.

Якість фінальної хмари точок перевірялася шляхом вивчення середньоквадратичного відхилення (RMSE), що підтвердило досягнення потрібного ступеня їхньої точності для подальшого тривимірного моделювання та проведення аналізів.

На підставі цих даних було зведено високоточні тривимірні проекти фасадів, які придатні для наукових студій, проєктування реставраційних робіт, а також для забезпечення довготривалого, цифрового збереження архітектурної спадщини.

Ступінь точності хмарової моделі точок визначається способом обчислення середньоквадратичної похибки, необхідним для забезпечення встановлених рівнів точності:

$$\text{С. К. П.} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1} (d_{i+1} - d_i)^2} \quad (1)$$

Ось переклад із використанням українських мовних конструкцій:

d_{i+1} – це величини окремих відрізків, зафіксованих під час лазерного сканування;

d_i – це належні їм еталонні (умовно прийняті як істинні) значення цих відрізків;

n – сумарна кількість точок, залучених до обчислень.

Згідно з технічними даними лазерного сканера моделі LS9-H 150, заявлена точність вимірювання дистанцій складає 1 мм на дистанції у 10 метрів, 2 мм на 25 метрах та 3,5 мм на 50 метрах.

Зазначені експлуатаційні характеристики дають змогу застосовувати цей апарат для створення високоточних архітектурних фіксацій об'єктів, що мають історико-культурну цінність.

З метою продемонструвати рівень досягнутої точності, було здійснено розрахунок середньоквадратичної помилки.

Це зроблено за умови, що маємо сто сканованих точок на дистанції у двадцять п'ять метрів, а випадкові похибки підпорядковуються нормальному (гаусовому) закону розподілу.

Знайдене значення RMSE дозволило нам зрозуміти загальний рівень розбіжностей між виміряними відстанями та еталонними величинами.

Для підтвердження сталості точності сканування на довших дистанціях, подібну методику було використано й для дистанції у п'ятдесят метрів.

На результати вимірювань, окрім складової лінійних похибок, також впливає кутова точність самого сканера.

Для моделі LS9-H 150 ця точність становить приблизно ± 19 кутових секунд (або $\pm 0,0053^\circ$), що може призводити до додаткових неточностей при встановленні просторового розташування точок.

Лінійний зсув, який виникає внаслідок кутової неточності на певній дистанції сканування, позначеній як L , було розраховано, використовуючи таку формулу:

$$E_{\text{зм.}} = L * \tan(\theta) \quad (2)$$

ОТОЖ:

Похибка зміщення, що виникає через неточність кута вимірювання, позначається як $E_{зм.}$;

L відповідає інтервалу між апаратом сканування та об'єктом, який піддається вимірюванню;

Θ являє собою величину кутового відхилення.

Стосовно відстані сканування у 50 метрів, вплив похибки кута було інтегровано у процес побудови фінальної тривимірної моделі.

Це було зроблено задля гарантування коректного розташування складових елементів фасаду у просторі.

Врахування цього елементу сприяло мінімізації наростання помилок та посиленню загальної просторової узгодженості створеної моделі.

Аби ще більше поліпшити точність узгодження знятих фрагментів та збудувати цілісну хмару точок, було задіяно ітеративний метод знаходження найближчої відповідності (відомий як Iterative Closest Point, ICP).

Цей підхід дозволяє зменшити розбіжності між тими частинами накладання хмар точок, що збігаються, через постійне коригування параметрів просторового зсуву.

Неточність вирівнювання, яку зафіксували після використання методики, вираховувалася, виходячи з середнього квадратичного розкиду між точками, що збігаються у сусідніх секторах сканування, і обчислювалася за допомогою такої формули:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|P_i - Q_i\| \quad (3)$$

Позначимо P_i та Q як відповідні точки на зонах накладання сусідніх фасадних сканувань.

Завдяки застосуванню процедур оптимізації просторового узгодження, середньозважена помилка реєстрації стала такою, що не перевищує п'яти міліметрів.

Це підтверджує значну кореляцію отриманих даних та дає змогу створити уніфіковане, високодеталізоване хмарне представлення точок.

Після завершення етапу збору інформації у натурі, було розпочато етап програмної обробки отриманих даних у середовищі Autodesk ReCap 2025.

Ця фаза була сфокусована на підвищенні якості та впорядкованості точкової моделі.

У межах постобробки здійснювалася операція видалення шуму для елімінації хибних чи сторонніх вимірів, проводилося додаткове доведення до потрібної точності просторового вирівнювання отриманих сканів, а також усунення всіляких артефактів, спричинених специфікою лазерного зчитування складних архітектурних форм фасаду.

Зроблені правки дали змогу отримати впорядкований і геометрично точний набір просторових відомостей, що підходить для глибокого архітектурного дослідження.

На базі опрацьованої хмари точок здійснено всебічне обстеження стану лицьової частини церкви св. Андрія, а саме: студіювання геометричної непорушності, знаходження ділянок матеріального зотлівання, виявлення закономірностей атмосферного впливу та місцевих зсувів у декорі.

Особливий наголос був зроблений на вивченні будівельних частин фасаду, куди входять поверхні з каменю та тиньку, скульптури та архітектурні розділення, що дало можливість з'ясувати їх просторову стійкість та pinpoint місця з підвищеним небезпечним потенціалом.

Здобуті відомості можуть слугувати підставою для розробки заходів з відновлення й організації майбутнього нагляду за технічним станом історичної споруди.

Створений тривимірний макет фасаду, отриманий шляхом обробки хмари точок, являє собою міцний фундамент наукового та інженерного характеру, необхідний для консервації архітектурного надбання.

Він надає вивірені просторові дані, що є критично важливими як для планування реставраційних робіт, так і для моніторингу деформацій форми протягом тривалого часу.

Поєднання метрологічної точності лазерного сканування з передовими алгоритмами цифрової маніпуляції даними доводить незаперечну цінність технології LiDAR як провідного методу дистанційного збору інформації у сфері захисту та адміністрування пам'яток культури.

Таблиця 1. Технічні характеристики лазерного сканера LS9 H 150

Характеристика	Лазерний сканер FARO Focus Premium
Швидкість сканування	До 50% швидше, приблизно ~1 хв на одне сканування
Роздільна здатність кольору	До 266 мегапікселів для фотореалістичних 3D-сканів
Максимальна дальність	300 м
Мінімальна дальність	0,1 м
Поле огляду	360° × 270°
Захист від впливу навколишнього середовища	Стійкий до бруду, пилу, туману, дощу, високих і низьких температур
Хмарна інтеграція	Підключення до застосунку FARO Stream та хмарної платформи FARO Sphere

3. Результати

3.1. Реєстрація даних лазерного сканування

Завдяки наземному лазерному скануванню, виконаному апаратом FARO Focus Premium LS9-H 150, нам удалось створити надзвичайно точну тривимірну цифрову копію фасадів Бернардинського монастиря (який нині є собором Святого Андрія у Львові).

Цей результат слугує цілком надійним метричним підґрунтям для проведення архітектурних досліджень та подальшої фіксації історичної пам'ятки.

Зібрані дані дають змогу зафіксувати з великою деталізацією як загальні габарити та просторовий вигляд будівлі, так і найдрібніші складові частини фасадного декору.

Завдяки лазерному скануванню вдалося створити насичені хмари точок, в яких зафіксовано вичерпну інформацію щодо геометрії, габаритів та взаємного розміщення складових частин будівель.

На противагу підходам, які цілком залежать від фотограмметрії, наземне лазерне сканування дає змогу отримати самодостатній набір просторових даних: він не прив'язаний до рівня освітлення чи візуальної насиченості поверхонь, що є критично значущим для кам'яних та скульптурно оформлених історичних фасадів.

Зведення окремих сканів до спільного простору відбувалося шляхом використання контрольних маркерів (цілей) та зони накладання між даними, отриманими з прилеглих точок знімання.

Позиціювання кожного окремого скану визначали у єдиній системі координат, спираючись на відповідність геометричних ознак, що гарантувало коректне взаємне орієнтування та просторове узгодження усіх сегментів інформації (див. Рис. 3).

Застосування цієї методики уможливило формування єдиної, цілісної тривимірної моделі, вільної від пропусків чи спотворень.

Завдяки насиченості хмари точок вдалося звести до мінімуму ділянки з прогалинами, а також із високою достовірністю зафіксувати усі хитромудрі частини фасаду, як-от виїмки для скульптур, виступи (карнизи), профільовані облямівки вікон та різьблені оздоби.

Здобуті відомості формують міцний фундамент для подальшого дослідження стану збереження лицьової поверхні споруди, виявлення будь-яких змін форми та збору даних, необхідних для реставрації.

Загалом, обраний спосіб збору даних – наземне лазерне сканування – продемонстрував свою спроможність для створення цифрових копій сакральних будівель, гарантуючи високу точність вимірювань, стабільність одержуваних даних та спроможність довготривалого електронного зберігання інформації про пам'ятку.

3.2. Оцінка точності результатів лазерного сканування

У рамках цього вивчення акцент було зроблено на підтвердженні коректності й цілісності просторових відомостей, здобутих у процесі лазерного сканування фасаду Бернардинського монастиря з поверхні землі.

Якість сформованої точкової хмари аналізувалася для з'ясування, наскільки достовірними є координати зафіксованих точок і чи придатний такий масив даних для подальших робіт з архітектурного вивчення та фіксації об'єкта.

Стикування (реєстрація) окремих сканів було реалізовано за допомогою техніки «хмара до хмари», що передбачає зменшення розбіжностей у просторі на ділянках, де сусідні скани перетинаються.

Завдяки обчисленим метрикам стало можливим чисельно визначити ступінь точності, з якою скани були зведені у спільний координатний простір.

Аналіз оброблених даних показав, що середня похибка реєстрації склала 1,2 мм.

Водночас, найбільше зафіксоване зміщення не перевищило 5,9 мм, а найменший ступінь збігу між окремими сканами сягав 16,2 % (Таблиця 2).

Таблиця 2. Показники точності реєстрації для вибраних сканувань

Ідентифікатор скану	Максимальна похибка точки (мм)	Середня похибка точки (мм)	Мінімальне перекриття (%)
097	1,5	1,2	69,7
095	1,2	1,2	78,7
093	1,8	1,4	50,2
077	2,8	1,7	32,6
066	3,0	1,7	16,2
047	5,9	1,9	34,2

Ці дані демонструють надійність та правильність етапу вирівнювання даних, а також підтверджують вдалий вибір конфігурації розташування сканувальних позицій.

Здобуті показники засвідчують, що сформований масив точок має відмінну просторову точність і високий ступінь взаємної відповідності.

Досягнутий рівень неточностей, що по всій поверхні фасаду не перевищує одиниць сантиметрів, є цілком адекватним для виготовлення ортофотопланів, розробки розмірних планів та проведення реставраційних й аналітичних завдань.

Отже, застосована методика наземного лазерного сканування надає міцний вимірювальний фундамент для цифровізації та подальшого вивчення об'єкта релігійної споруди.



Рисунок 3. Розташування позицій наземного лазерного сканування

Сканування лазером охопило як висотні площини будівлі, так і головний фасад храму, включно з довколишнім архітектурним та міським оточенням, завдяки чому було досягнуто вичерпного й суцільного фіксування об'єкта дослідження.

Ще одним доказом високого гатунку просторового узгодження слугують величини середньоквадратичної похибки (RMSE), які засвідчують стійкість реєстрації та загальну точність вимірювань у метричному сенсі, здобутих завдяки наземному лазерному скануванню.

Огляд цих RMSE-показників ілюструє, наскільки незмінним залишався процес зведення окремих знімків в уніфіковану точкову хмару.

Зведені дані щодо оцінки RMSE та просторової насиченості, отримані шляхом наземного сканування, представлено у Таблиці 3.

Таблиця 3. Середньоквадратична похибка (RMSE) та показники щільності хмари точок.

Показник	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
RMSE, мм	1,2	0,5	5,9
Щільність хмари точок (точок/м ²)	3500–4200	2800	4500
Коефіцієнт перекриття, %	45,3	16,2	90,8

Середній показник середньоквадратичної похибки сягає 1,2 мм, що підтверджує, що під час вирівнювання було досягнуто точності меншої за сантиметр, і вказує на те, що зібрані відомості цілком підходять для детального дослідження архітектури та створення цифрової моделі фасаду з високим ступенем деталізації.

Густина збудованого хмарового масиву вар'ювалася від 3500 до 4200 відміток на квадратний метр, коли найменше зареєстроване число становило 2800 точок/м², а найбільше — 4500 точок/м².

Ці величини засвідчують про достатній рівень насиченості просторової інформації, що дало змогу впевнено зафіксувати малі структурні та оздоблювальні складові фасадів, що піддалися скануванню.

Ступінь накладання між окремими проходами сканера знаходився в діапазоні 16,2 % – 90,8 %, що демонструє сталу сполучуваність прилеглих масивів даних та адекватне просторове зведення окремих точок зйомки в загальний хмарний об'єкт.

Окрім цього, досягнута точність зведення суміжних сканів становила не більше 2,0 мм, що підтверджує високу ступінь достовірності та повторюваність процедури наземного лазерного сканування, а також

вказує на стійкість використаного алгоритму роботи до наростання помилок.

3.3. Реєстрація хмари точок

Щойно було закрито етап збору даних на місці за допомогою наземного лазерного сканування, розпочався етап детальної обробки отриманих просторових даних.

Метою цих маніпуляцій було створення високоточної тривимірної цифрової моделі фасаду Бернардинського монастиря.

Початковий масив відсканованих даних, збережений у файлах формату .e57, спершу підлягав процесам вирівнювання та зведення в єдину спільну систему координат.

На етапі попереднього опрацювання ми провели ретельне "прибирання" хмар точок.

Це включало видалення будь-яких шумів, помилкових чи випадкових вимірів, а також об'єктів, які не є частиною архітектурної структури будівлі, що нас цікавила.

Завдяки цьому вдалося мінімізувати спотворення, спричинені самим процесом сканування, і суттєво покращити якість даних перед їхнім остаточним поєднанням.

По закінченні стадії вирівнювання усі відкориговані скани було зведено в уніфікований структурований файл формату .e57, який став відправною точкою у вигляді просторового масиву даних для наступних етапів візуалізації й моделювання.

Ця сформована сукупність точок була потім завантажена у програмне забезпечення RealityCapture версії 1.5, де проводилась фіналізація геометричних параметрів, аудит збіжності отриманих даних та

підготовка цієї моделі до подальших процедур аналізу та графічного представлення (див. малюнок 4).

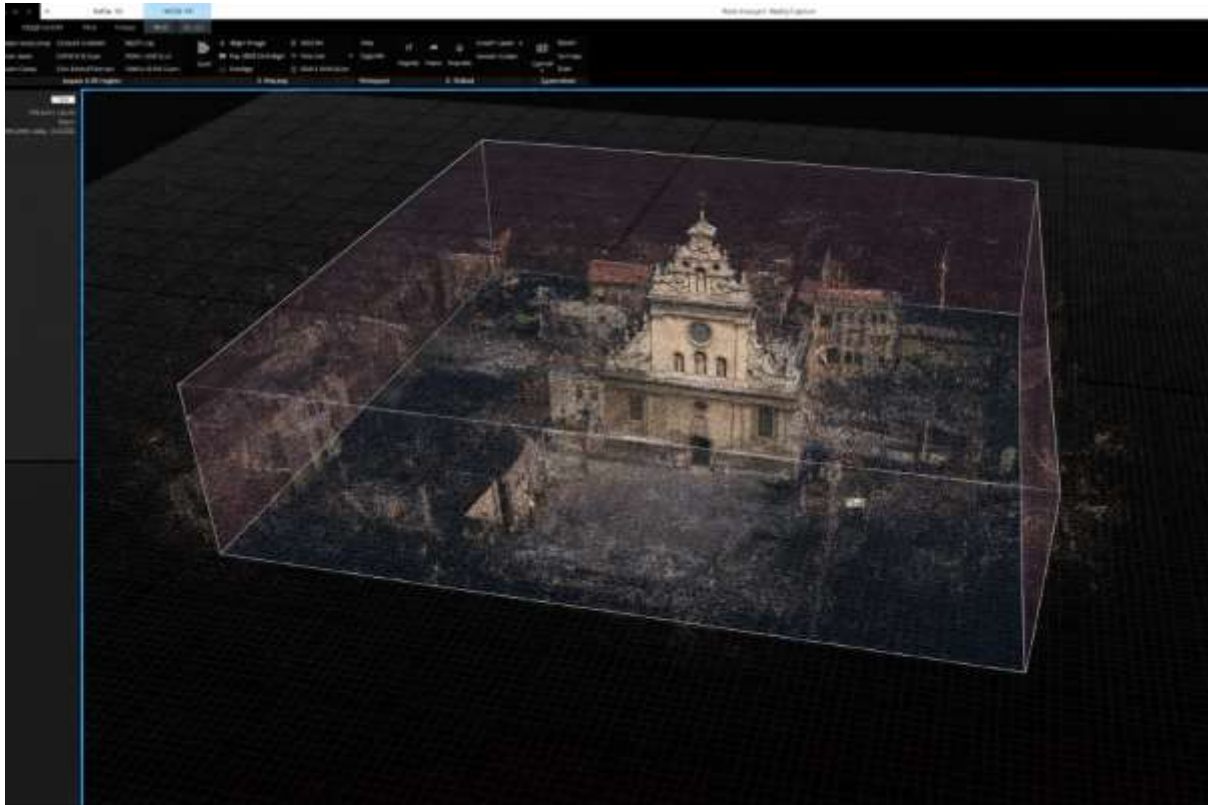


Рисунок 4. Хмари точок, оброблені в RealityCapture 1.5 з лазерного сканування.

Ця зведена до купи хмара точок надала міцний геометричний фундамент, необхідний для створення високодеталізованої тривимірної репрезентації фасаду, а також для формування вимірних ортофотопланів та аналітичних звітів, які виступають ключовими для фіксації та збереження архітектурної спадщини.

Відправною точкою для процедури просторового узгодження лазерних сканів було визначення еталонної станції, яка задавала референційну площину для усієї композиції, до якої згодом інкрементально прив'язувалися наступні скани.

У контексті даної роботи під «вирівнюванням» трактується винятково процес реєстрації даних наземного лазерного сканування, без використання якихось фотограметричних технік для побудови моделі.

З метою зміцнення позиційної достовірності етап реєстрації був додатково вдосконалений завдяки застосуванню геодезичних орієнтирів, чиї координати були високоточно визначені.

Цей метод забезпечив суттєве підвищення сумісності окремих знімків у межах спільної координатної системи.

Необхідно підкреслити, що фотограметричний метод реконструкції не був залучений як геометричне джерело; натомість, фотозображення використовувалися лише для накладання візуального текстурного шару на фінальну тривимірну модель, не проявляючи жодного впливу на її метричні параметри.

Завдяки проведеним маніпуляціям, програмне забезпечення успішно звело до купи всі отримані LiDAR-дані в єдиному просторовому контурі.

Процедура зведення точкових хмар була виконана в середовищі RealityCapture версії 1.5, що забезпечило абсолютну просторову згоду між усіма пунктами збору даних, зафіксованими під час експедиції.

Саме ж вирівнювання будувалося на інтеграції двох взаємопідсилюючих методик.

Перша — це підхід «хмара до хмари», який оперує геометрією на ділянках взаємного накладання сусідніх сканів, аби звести до найменшого розбіжності між ними.

Другий компонент — це система реєстрації за контрольною прив'язкою, яка застосовує заздалегідь розміщені репери (як сферичні, так і планарні маркери), що виступали додатковими орієнтирами задля покращення точності фінального калібрування.

Реалізація робочого процесу відбувалась у дві наступні стадії.

На початковій фазі, що стосувалася автоматичної реєстрації, програмне забезпечення проводило первинне вирівнювання.

Це досягалося шляхом дослідження просторових ознак поверхонь, концентрації точок, а також взаємного розміщення точок сканування, аби знайти та мінімізувати будь-які потенційні розбіжності.

Далі, на етапі ручного коригування, обирався еталонний скан, після чого позиції всіх інших сканів доводилися до бажаного стану з метою досягнення найкращої збіжності поверхонь.

Це подальше коригування дало змогу суттєво зменшити залишковий рівень помилок та підвищити загальну геометричну узгодженість утвореної хмари точок.

Як то наочно видно із зображення 5, тривимірна модель сітки, створена у середовищі RealityCapture, потребувала подальшої доробки та вдосконалення.

Таке втручання було критично важливим не тільки для досягнення високої точності геометрії, але й для того, щоб модель була придатною для подальшого аналізу та використання у процесі архітектурної фіксації.

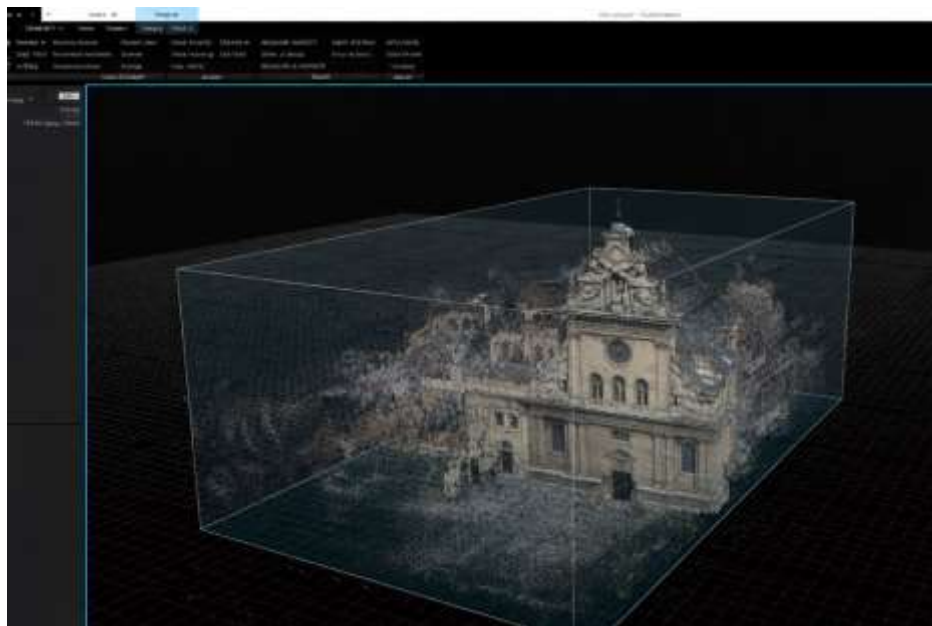


Рисунок 5. Вирівнювання та реєстрація хмари точок у RealityCapture

На лівій частині екрана бачимо вихідний набір точок, отриманий шляхом лазерного сканування місцевості.

Праворуч же відображаються відскановані дані, які вже пройшли процедуру реєстрації та просторового вирівнювання, акуратно вміщені у визначені тривимірні межі, що окреслюють зону майбутньої тривимірної моделі будівлі.

Спочатку ми зосередилися на видаленні всіх зайвих або некоректно орієнтованих елементів геометрії, які не мали відношення до фасадних площин об'єкта дослідження.

Далі слідувала валідація топології моделі, щоб ідентифікувати будь-які помилки: нестиківки у ребрах, прогалини у поверхні чи відокремлені вузли.

Для усунення цих недоліків були задіяні засоби автоматичного покращення моделі, а опція заповнення порожнин дала змогу створити цілісну поверхню, яка відповідає вимогам для подальшого тривимірного опрацювання.

Подальша валідація та вдосконалення геометричних даних були здійснені в рамках програмного пакета Autodesk ReCap версії 2025.

Там фахівці застосували інструментарій для вирішення проблем із шумами, локального пом'якшення (згладжування) нерівностей, а також для акцентування уваги на тонких елементах, аби досягти максимально достовірного зображення архітектурних складових фасаду.

По закінченню цієї стадії, фінальний варіант мережі було вивантажено та знову прив'язано до первинного файлу інформації про метадані (.rcinfo), який походив із RealityCapture, при цьому дотримавшись відповідності новому іменуванню файлу.

Цей крок гарантував успішне впровадження відкоригованої моделі назад у загальний робочий цикл та дозволив верифікувати просторову відповідність усім проєктним вимогам.

Далі ми перейшли до етапу виведення на площину та нанесення текстур на тривимірну модель, аби досягти реалістичного візуального образу фасаду собору Святого Андрія.

Сам процес розгортання передбачав формування UV-мапи — плаского, параметричного відображення поверхні з усіма її вигинами, що є необхідною умовою для коректного розміщення текстурних зображень.

Запуск процедури розгортання розпочинався з вибору вже існуючої сітки та застосування інструмента «Unwrap» (Розгорнути), розташованого у функціональному блоці реконструкції.

Цей інструмент самостійно обраховував найбільш вигідний розмір для окремих елементів текстури (текселів).

Щодо моделі наземної споруди, ми додатково встановили бажану чіткість (з кроком 4 мм), що дозволило збалансувати високу деталізацію візуального оформлення з кінцевим обсягом файлів (додаткові подробиці представлені на рис. 6).

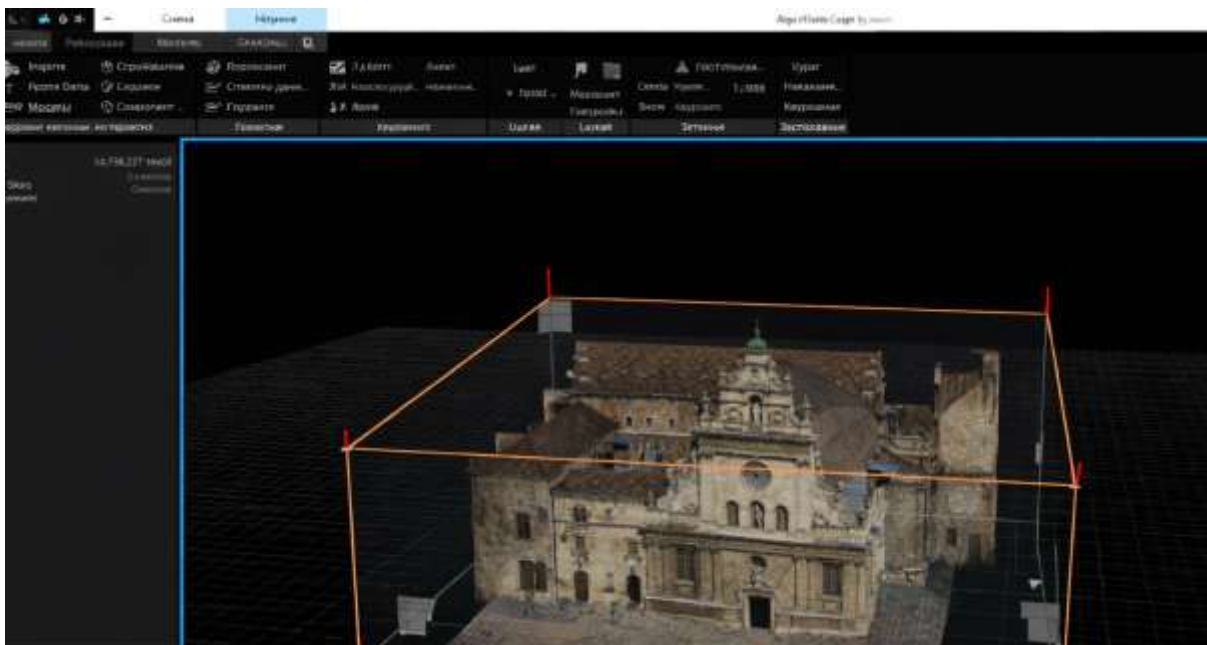


Рисунок 6. Етап розгортання та текстурування 3D-моделі Shanashael у RealityCapture

Реконструкційна зона була визначена на основі вже створеної тривимірної моделі, після чого було проведено UV-мапінг для досягнення впорядкованої параметричної форми поверхні, що є необхідною умовою для коректного застосування текстур.

Такий алгоритм гарантував точне розміщення деталізованих зображень на геометрії об'єкта, в результаті чого можна було отримати візуально цілісний та реалістичний вигляд моделі.

На стадії рендерингу використовувалися два різні підходи: або метод шейдингу (клавіша F8), де кольорові дані напряму прив'язуються до вершин полігональної сітки, що сприяє зменшенню об'єму файлу, або метод текстурування (клавіша F9), що створює складні растеризовані текстури для поверхні, забезпечуючи при цьому вищий ступінь фотореалістичності.

Для підвищення ефективності роботи до процесу підбиралися лише ті зображення, які відповідали необхідним критеріям якості, тоді як невідповідні або неправильно вирівняні кадри виключалися в розділі SCENE 3D / TOOLS.

За потреби, для специфічних знімків можна було встановити персональні коефіцієнти значущості, надаючи їм більшої ваги під час операції накладання текстур.

Налаштування параметрів накладання текстур виконувалося відповідно до особливостей конкретного об'єкта: особа, що працює, мала можливість вибрати лінійні чи багатосмугові схеми обробки, підходи, що базуються на оцінці видимості чи фотореалістичності, або мозаїчні техніки.

Крім того, були доступні додаткові функції для покращення швидкості роботи, як-от зниження деталізації вихідних світлин чи автоматична обробка зон, що залишилися без покриття на поверхні.

Аби зробити процес роботи більш гнучким, застосовувався механізм перенесення текстурних даних.

Це давало змогу копіювати кольорові дані з оригінальної, деталізованої моделі на спрощені або змінені варіанти геометрії, усуваючи потребу в повному циклі повторного нанесення текстур.

Насамкінець, відбулося вивантаження текстурованої тривимірної моделі у загальноприйняті формати, які легко інтегруються (.FBX, .OBJ), разом з інтегрованими текстурами, збереженими як .JPG файли.

Це гарантує можливість подальшого застосування моделі у різних системах – чи то для візуалізації, чи для проведення досліджень, або ж для довготривалого цифрового зберігання.

3.4. Усунення шуму хмари точок та CAD-орієнтований аналіз стилістики

Створення ортофотопланів, що базуються на інформації наземного лазерного сканування у програмі RealityCapture, стартувало з точного визначення меж зони реконструкції, встановлення кута нахилу площин проектування та встановлення бажаної початкової просторової деталізації.

Ці параметри гарантували, що масштаб, співвідношення сторін та взаємозв'язки між складовими частинами фасаду й загальними габаритами об'єкта культового призначення будуть збережені у їхньому дійсному вигляді.

Розроблена методика була націлена на те, щоб максимально зберегти точні виміри, характерні для хмари точок, отриманої лазерним сканером із землі.

Це дало змогу сформувати ортогональні зображення, які без жодних спотворень перспективи достовірно передають форму будівель Бернадинського монастиря.

Здобуті ортофотоплани стали слугувати надійною базою для архітектурної фіксації, подальшого аналізу в геоінформаційних системах

(ГІС) та створення креслень у системах автоматизованого проєктування (CAD).

Кожен ортогональний фасад було виведено з дотриманням заздалегідь заданих площин розрізу, які узгоджувалися з проєкційною системою тривимірної моделі.

Це гарантувало абсолютну відповідність просторової конфігурації між двовимірним відображенням та вихідними результатами лазерного сканування.

Як демонстративно показано на Малюнку 7А, масив точок, зібраний під час польового лазерного сканування, було скрупульозно інтегровано з інформацією, попередньо підготовленою в програмному забезпеченні Autodesk ReCap.

Відтак, цей уніфікований набір даних був збережений у файловому форматі .e57 задля подальшого застосування у процедурах аналізу та створення цифрових моделей.

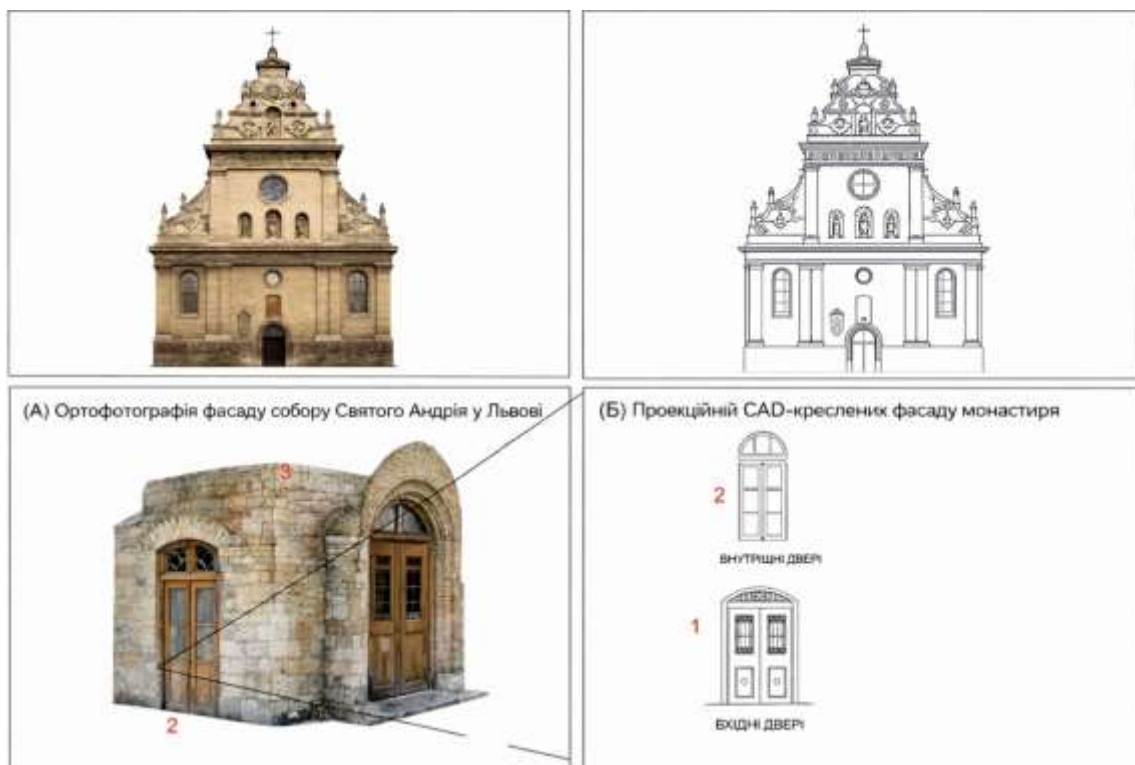


Рисунок 7. Робочий процес цифрової документації

Завдяки отриманій реєстрації з'явилася можливість паралельно обробляти як поперечні зрізи хмари точок, так і відповідну растрову інформацію, отриману з триангуляційної моделі.

Це дало змогу під час двовимірного аналізу та графічної візуалізації добитися кращої репрезентації фактури й поточного стану фасадних поверхонь.

Хмару точок у повному обсязі, після завантаження у середовище AutoCAD 2025, було розрізано попередньо визначеними площинами зрізу, що ґрунтувалися на поверхових планах.

Для забезпечення точності формування кожного ортогонального фасаду, на поверхні сітки фіксувалися три еталонні точки, які слугували орієнтирами для вирівнювання горизонтальної та вертикальної осей у площині проєкції.

Базуючись на геометрії сітки та застосовуючи методи автоматичного заповнення пропущених ділянок, було створено повний набір ортофотопланів фасадних стін.

Кожен малюнок ортофото був імпортований у відповідний файл САПР як растрове посилання, а потім був розміщений на його призначеній площині, відмасштабований та скрупульозно вирівняний з ортогональними зображеннями, які були згенеровані безпосередньо з хмари точок.

Для кожного фасаду ми створювали по дві копії зображень: перша слугувала прямою основою для опрацювання креслень у середовищі САПР, а друга мала уніфікований білий фон під зонами, які мали бути перемальовані, що допомагало краще відділити двовимірну графіку, зберігаючи при цьому загальний контекст.

Насамкінець було розроблено двовимірні проєкти планів поверхів та фасадів.

Ці креслення доопрацьовувалися шляхом інтеграції даних, отриманих як з ортофотопланів, так і з хмар точок.

В результаті цього процесу постала узгоджена тривимірна модель, де інформація з кожного окремого сканувального пункту наземного лазерного сканування була точно співвіднесена, демонструючи мінімальні похибки, що залишилися.

Така реєстрація гарантувала повну просторову когерентність усіх сканованих наборів, що дало змогу звести їх в одну спільну хмару точок, готову для наступного етапу побудови полігональної моделі.

Проведення подальшої тривимірної реставрації (реконструкції) відбувалося через формування каркасу (сітки) з налаштуваннями, унормованими таким чином, щоб мінімізувати обсяг інформації та уможливити перегляд у режимі реального часу.

Цей робочий алгоритм ґрунтувався не на оригінальній моделі з великою кількістю граней, а на доопрацьованій еталонній копії, яка була отримана на підставі синхронізованих даних наземного лазерного сканування.

Як інструмент для цього використовувався модуль «Спрощення» (Simplify) у програмному комплексі RealityCapture.

Перший етап включав послідовне зменшення ступеня деталізації відносно, крок за кроком по 50%, і тривало це доти, доки кількість багатокутників не наблизилася до позначки в один мільйон.

Опісля застосовувалося вже безумовне (абсолютне) зменшення до сталої кількості у 1 000 000 трикутників з метою гарантування однакової структури усіх створених моделей.

На завершальній стадії апаратура «Clean Model» була задіяна для виправлення дрібних недоліків форми та згладжування лицьової частини.

Удосконалена версія моделі збереглася у такому вигляді, який дозволяв її публікувати та переглядати у режимі реального часу на ресурсі Sketchfab (див. Рис. 8).

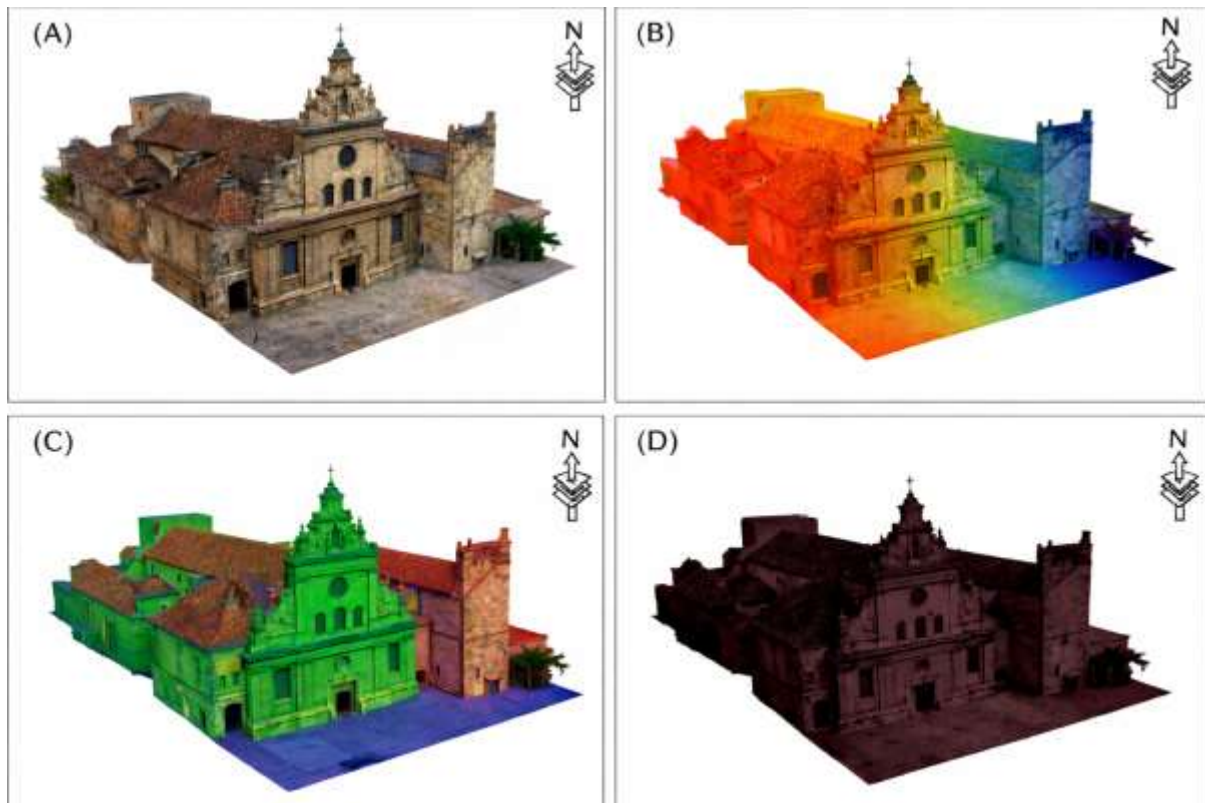


Рисунок 8. Тривимірна реконструкція церкви св. Андрія за допомогою наземного лазерного сканування (наземне лазерне сканування):

- A) текстурована 3D-модель,
- B) хмара точок з кольоровим висотним малюнком,
- C) класифікація нормалей поверхні та
- D) візуалізація карти інтенсивності.

Високодеталізовані текстурні відомості, зняті з вихідної еталонної сітчастої конструкції, були згодом переміщені на спрощену (оптимізовану) форму геометрії за допомогою утиліти Texture Reprojection.

Такий метод дав змогу зберегти наявну візуальну складність поверхонь, уникнувши потреби проходити повний цикл повторного накладання текстур.

На фінальному етапі тривимірна модель була вивантажена у форматі .fbx, включаючи в неї файли текстур.

Задля поліпшення швидкодії та забезпечення коректної роботи з мережевими (онлайн) системами відображення, формат графічних файлів було стандартизовано до .jpg.

Це забезпечило найкраще співвідношення між рівнем деталізації зображення та загальним обсягом даних.

3.5. Використання ГІС для управління даними та картографування об'єкта сакральної спадщини

Геоінформаційні системи (ГІС) являють собою дієвий засіб для акумулювання, збереження, опрацювання й наочного представлення просторових відомостей, що є життєво важливим у процедурах цифровізації документації та консервації надбань культури.

При дослідженні культових споруд впровадження ГІС-технологій уможливорює систематизування підходів до збору, впорядкування та розбору відомостей, що стосуються розміщення, архітекtonіки й будівельних параметрів старовинного церковного об'єкта.

У цьому дослідженні ГІС слугувала невід'ємною частиною методичного апарату для просторового опису об'єкта, що підлягав вивченню.

Просторові прив'язки будівлі було зафіксовано, а пов'язані з ними просторові й описові дані зведено в екосистемі ArcGIS Online, що дало змогу централізовано керувати цією інформацією, створювати карти та візуалізувати її.

Вебплатформа ArcGIS Online, що була розроблена, уможливила користувачам інтерактивно працювати з геопросторовими даними, об'єднувати їх із різноманітними інформаційними шарами та проводити елементарні геопросторові дослідження.

Цей метод дає змогу виявляти певні закономірності у розміщенні об'єктів у міському ландшафті, а також визначати ступінь впливу зовнішніх факторів, таких як міська забудова, мережі інженерних комунікацій, особливості рельєфу та кліматичні характеристики.

Застосовуючи ГІС-технології, на територію об'єкта культурної спадщини були накладені додаткові геопросторові шари, які ілюструють топографію ділянки, контури землекористування, оточуючу забудову та природні компоненти.

Це забезпечило можливість детальніше дослідити потенційні ризики, спричинені руйнуванням будівельних матеріалів, антропогенним тиском та впливом навколишнього середовища.

На основі виконаної роботи було створено впорядковану ГІС-сховище даних щодо досліджуваного масиву, яке стало фундаментом для подальшого вивчення, контролю стану та розробки заходів, спрямованих на його консервацію.

Це сховище охоплює головні характеристики, а саме:

- Дані для розпізнавання (унікальний номер, найменування, стислий зміст, зовнішні джерела інформації);
- Географічні відомості (місцезнаходження, точні координати, просторова форма об'єкта);
- Технічні й будівельні параметри (загальна площа, внутрішній устрій, несуча структура);
- Відмінні архітектурні складові (форма покриття, оформлення зовнішніх стін та внутрішнього оздоблення);
- Використані речовини та художні деталі (кам'яні роботи, різьблення, гравіювання, оздоблювальні елементи);
- Прорізи та входи (скління, дверні полотна);
- Чинники небезпеки (вік побудови, виявлені дефекти, поточний спосіб експлуатації).

Цей систематизований метод значно покращує достовірність фіксації даних, потенціал для проведення досліджень та рівень обґрунтованості рішень, що стосуються збереження історико-культурних надбань.

Побудована інтернет-система на базі ArcGIS слугує інструментом для геопросторового дослідження, визначення ділянок, де ймовірні загрози, а також для зважування наслідків втручання містобудівних та екологічних детермінант на фізичний стан пам'ятки (ілюстрації 9 та 10).



Рисунок 9. Глобальна карта, що ілюструє розподіл задокументованих об'єктів спадщини.



Рисунок 10. Хмара точок та картографування об'єкта спадщини на основі ГІС.

Уключення просторових даних, що стосуються контексту, а саме відомостей про рельєф місцевості, схеми землекористування та наближеність до об'єктів інфраструктури, значно розширює можливості просторового дослідження сукупних загроз, яким піддаються крихкі об'єкти культурної спадщини.

Виходячи зі здобутків попередніх наукових праць щодо злиття методів ГІС та ВІМ у контексті сталої опіки над спадщиною, у цьому дослідженні геоінформаційні системи позиціонуються як центральний елемент цифрового плану дій для охорони архітектурної спадщини України.

Використання здвоєної методики, яка суміщає лазерне сканування з поверхні землі та інструментарій геоінформаційного аналізу, показало значний практичний зиск у процесі цифрової фіксації Бернардинського монастиря (нинішній Собор святого Андрія) у Львові.

Здобуті відомості засвідчили: злиття наземного лазерного сканування і ГІС уможливлює формування єдиного комплексу просторових

даних, придатного як для високоточного геометричного моделювання, так і для подальшого аналітичного опрацювання.

Двовимірні вихідні дані, витягнуті із хмар точок, стали запорукою формування планів, фасадів та перерізів із достовірністю щодо масштабу, які можуть слугувати первинною документацією для робіт із відновлення, наукових досліджень та проєктування.

Паралельно, тривимірна цифрова модель цієї споруди подарувала як загальне, так і докладне розуміння просторової структури будівлі, поєднуючи педантичну точність геометрії із насиченістю візуальних відомостей.

Застосування інструментів ГІС відкрило шлях до глибшого тлумачення отриманих даних через дослідження їхнього оточення у просторі.

Шляхом накладення масивів, що відображують інтенсивність міської забудови, транспортні шляхи та ключові інженерні мережі, ми мали змогу визначити можливі ризики, які негативно позначаються на сталості старовинної будівлі.

Це, своєю чергою, створило необхідну інформаційну базу для обґрунтованого управління об'єктами, що становлять архітектурну цінність.

У процесі здійснення натурних та лабораторних досліджень виявилася низка перешкод, типових для застосування наземного лазерного сканування в умовах старовинних архітектурних ансамблів.

Організація монастирського ансамблю, обмеженість закритого простору та щільне оточення мурами диктували необхідність гнучкого планування позицій сканерів та багаторівневого циклу знімальних робіт.

Водночас, величезний масив інформації, згенерований високоточним скануванням, суттєво ускладнив процеси поєднання знімків та їх подальшої комп'ютерної візуалізації.

Певні оздоблювальні складові фасаду, а саме ті, що мають рельєф чи скульптурні елементи, продемонстрували вразливість до невеликих неточностей у процесі збору даних.

Щоб зменшити вплив цих явищ, застосовували додаткові сканування з невеликої дистанції, а також проводили локальне збільшення чіткості (деталізації) сітки там, де це було критично важливо.

При роботі з фіксацією даних, головна увага приділялася вдосконаленню методу послідовного зведення (зближення) точкових скупчень, надаючи перевагу тим частинам, де геометрія була найбільш стабільною.

Шляхом комбінування реєстраційних технік з використанням реперних міток, автоматичного узгодження між самими точковими хмарами, та точкового ручного втручання, вдалося отримати похибки, що ледве сягнули кількох міліметрів, що, по суті, підтверджує високу внутрішню збалансованість зібраного масиву інформації.

Локальні невідповідності, що виявлялися в певних ділянках, виправляли шляхом повторного коригування вагових коефіцієнтів обмежень або часткової повторної реєстрації відповідних сегментів.

Незважаючи на досягнуту ступінь деталізації, варто підкреслити, що використання лазерного сканування з наземної позиції в умовах густої міської забудови стикається з низкою методологічних труднощів, зумовлених затіненням (оклюзією) та ускладненням можливості дістатися до верхніх частин будівельних об'єктів.

У майбутньому слушним кроком буде інтеграція наземного сканування з іншими методами дистанційного зондування, як-от аерофотограметрія, з обов'язковим дотриманням чинного регуляторного поля.

Еволюція методів обробки точкових хмар, зокрема завдяки впровадженню моделей машинного навчання, надає потенціал для

автоматизованого дослідження стану споруд, категоризації складових частин та ідентифікації дефектів.

Впровадження подібних методик у робочі цикли, що об'єднують наземне лазерне сканування та ГІС, здатне потенційно скоротити рутинні операції та сприяти кращій цифровій фіксації пам'яток архітектури.

Висновки

Протягом здійсненого вивчення створено цифрову просторову модель монастиря Бернардинів (або ж Собору Святого Андрія), розташованого у Львові, що вирізняється високим ступенем деталізації.

Ця модель була отримана шляхом зведення даних, отриманих із наземного лазерного сканування, та інструментів геоінформаційних систем.

Вибраний метод дав змогу зібрати повний обсяг просторових відомостей, мета яких полягає не лише у точному документуванні об'єкта з точки зору його геометрії, але й у забезпеченні подальшої експертної підтримки заходів, спрямованих на охорону архітектурної спадщини.

Застосування лазерного сканера FARO Focus Premium LS9-H 150 дозволило отримати щільні, багатоспрямовані хмари точок, завдяки чому стало можливим із великою точністю реконструювати просторове розташування, співвідношення розмірів та виразні архітектурно-декоративні складові фасадів і загальних габаритів культової будівлі.

Виявлено, що наземне лазерне сканування виявилось надзвичайно продуктивним для документування вигадливих об'ємних форм, заглиблень (ніш), скульптурних оздоблень та профільованих елементів із каменю.

Земні лазерні знімки було піддано обробці в програмному комплексі RealityCapture.

Кінцевою метою цієї стадії було формування ортофотопланів, фасадних планів та текстурованих тривимірних моделей, які б мали точні метричні характеристики.

Наступний етап передбачав введення цих результатів у геоінформаційну систему, що забезпечило змогу скомпонувати тривимірну модель об'єкта з його просторовим розташуванням відносно суміжної історичної забудови, рельєфу місцевості та наявної інфраструктури.

Перевірка адекватності підтвердила високий рівень збігу та коректності отриманих даних: середній показник квадратичної похибки у процесі вирівнювання сягнув приблизно 1,2 міліметра, що цілковито задовольняє критеріям, визначеним для консерваційно-реставраційної документації.

Хмарою точок, що була зареєстрована, закладено міцний та непохитний просторовий фундамент для проведення наступних студій, зокрема тих, що стосуються визначення технічних характеристик, дослідження деформаційних процесів та спостереження за змінами протягом певного періоду.

Інтеграція технологій наземного лазерного сканування та геоінформаційних систем (ГІС) у рамках послідовного робочого циклу довела гнучкість та можливість повторного застосування розробленого методу.

Завдяки такому синтезу стає можливим поєднати детальний аналіз специфіки окремої старовинної будівлі з ширшим просторовим розумінням впливу міського планування, навантажень, створюваних діяльністю людини, і чинників природного походження.

Незважаючи на значну продуктивність задіяних технічних рішень, вивчення також виявило певні труднощі у впровадженні, а саме: утруднення доступу до вищих частин будівельних споруд у щільно забудованих міських районах та значніші потреби у потужностях для обчислень під час обробки великих масивів інформації.

На майбутнє варто подумати про збагачення цієї методології шляхом об'єднання наземного лазерного сканування з іншими дистанційними способами збору даних, а також інтеграції інструментів для самостійного аналізу, базованих на штучному інтелекті.

В цілому, здобуті висновки обґрунтовують слушність використання комбінованої системи (наземне лазерне сканування та ГІС) для створення

цифрових копій, вивчення та адміністрування об'єднань архітектурної спадщини.

Застосований підхід формує міцне, розширюване та довговічне підґрунтя для консервації архітектурних пам'яток, що мають духовне й історичне значення, у відповідь на посилений тиск міського розвитку та екологічних змін, узгоджуючись при цьому з поточними світовими напрямками в царині оцифрування культурної спадщини.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**«Застосування наземного лазерного сканування та ГІС для
3D-документування об'єктів культурної спадщини України».**

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)