

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Навчально-науковий інститут інноватики, природокористування та
інфраструктури
Кафедра економічної експертизи та землепорядкування

СОЛОНИНКА Павло Васильович
Застосування лазерного сканування для збереження
архітектурних пам'яток / Laser scanning application for
preserving architectural monuments
спеціальність: 193 – Геодезія та землеустрій
освітньо-професійна програма - Експертна оцінка землі та нерухомого
майна

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
ГЕОЗ-42 П. В. Солонинка

Науковий керівник:
к.е.н., М. І. Гуменний

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

«___» _____ 20___ р.

Завідувач кафедри

_____ Б. О. Язлюк

ТЕРНОПІЛЬ – 2025

ЗМІСТ

Вступ	3
 Розділ 1. Теоретичні аспекти використання технологій лазерного сканування в архітектурі	 5
1.1. Роль цифрових технологій в збереженні культурної спадщини	5
1.2. Використання фотограмметричних технологій зйомки ситуації і рельєфу для створення карт та планів	11
1.3. Характеристика засобів та методів 3D-сканування для створення моделей архітектурних об'єктів	19
Висновки до розділу 1	29
 Розділ 2. Практичні аспекти використання засобів лазерного сканування архітектурних пам'яток в Україні	 30
2.1. Аналіз способів використання наземного лазерного сканування з метою збереження пам'яток архітектури	30
2.2. Комп'ютерні методи створення цифрового архіву пам'яток архітектури за допомогою 3D-сканування	39
Висновки до розділу 2	41
 Розділ 3. Актуалізація технологій геомоніторингу як фактору забезпечення безпечної експлуатації будівель і споруд	 42
Висновки до розділу 3	52
 Висновки	 54
Список використаних джерел	56

ВСТУП

Актуальність теми. У XXI столітті проблема збереження архітектурних пам'яток стала надзвичайно актуальною через: старіння будівель; руйнівні наслідки кліматичних змін і воєн; інтенсивну урбанізацію. Одним з найефективніших інструментів у сфері збереження і фіксації об'єктів культурної спадщини є лазерне 3D-сканування. Лазерне сканування – це метод, при якому лазерний промінь вимірює відстань до поверхні об'єкта, створюючи високоточну «хмару точок». На основі цієї хмари будується 3D-модель об'єкта з точністю до міліметра. Це сучасний та надійний інструмент для фіксації, збереження, відновлення та популяризації архітектурних пам'яток. Ця технологія відкриває нові горизонти у сфері охорони культурної спадщини, забезпечуючи точність, безпечність і довготривалу цінність цифрових копій.

Серед дослідників проблематики застосування лазерного сканування для різних цілей можна виділити таких вчених, як: С. Бегічев, А. Вовк, В. Глотов, В. Диваков, Ю. Дорошенко, А. Маліцький, Х. Марусаж, В. Нещадим, М. Ничвид, І. Руднева, А. Шоломицький, Р. Шульц та ін. Проте, на сьогодні є низка дискусійних питань щодо застосування лазерного сканування для збереження архітектурних пам'яток.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток теоретико-методологічних та прикладних засад використання технологій лазерного сканування в архітектурі.

Перед роботою стояли наступні завдання:

- з'ясувати роль цифрових технологій в збереженні культурної спадщини;
- розкрити особливості використання фотограмметричних технологій зйомки ситуації і рельєфу для створення карт та планів;
- охарактеризувати засоби та методи 3D-сканування для створення моделей архітектурних об'єктів;
- проаналізувати способи використання наземного лазерного сканування з метою збереження пам'яток архітектури;

- розкрити особливості застосування комп'ютерних методів створення цифрового архіву пам'яток архітектури за допомогою 3D-сканування;
- обґрунтувати стратегічні напрями актуалізації технологій геомоніторингу як фактору забезпечення безпечної експлуатації будівель і споруд.

Об'єкт дослідження – наземне лазерне сканування як незамінний інструмент у сучасному підході до збереження архітектурної спадщини.

Предмет дослідження – процеси застосування лазерного сканування для збереження архітектурних пам'яток.

Методи дослідження. У дослідженні застосовувалися діалектичний метод пізнання економічних законів, системний підхід до аналізу економічних явищ і процесів, а також монографічний метод, методи індукції й дедукції та абстрактно-логічний підхід.

Практична значущість результатів дослідження полягає у обґрунтуванні висновків щодо широкого використання 3D-сканування як ключової технології для високоточної цифрової фіксації геометрії архітектурних об'єктів, яка дозволяє створювати тривимірні моделі будівель, фасадів, історичних пам'яток, що використовуються у реставрації, плануванні, віртуальних турах та інженерному аналізі.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ В АРХІТЕКТУРІ

1.1. Роль цифрових технологій в збереженні культурної спадщини

Культурна спадщина охоплює пам'ятки, будівлі та ландшафти, що мають «видатну загальнолюдську цінність з погляду історії, мистецтва або науки» [18, с. 108]. Важливі культурні об'єкти, такі як собор Святої Софії, Києво-Печерська лавра, історичний центр Львова та інші, потребують охорони, оскільки існує ризик їх втрати через стихійні лиха, воєнні дії чи інші загрози, зокрема надмірний туристичний потік і урбанізацію. Однак, через обмежене фінансування вони часто недостатньо задокументовані.

Збереження культурної спадщини є надзвичайно важливим завданням, яке стало значно доступнішим завдяки сучасним технологіям, зокрема 3D-скануванню та цифровій фотограмметрії. Оцифрування пам'яток у форматі 3D має численні переваги: воно сприяє документуванню та систематизації об'єктів у каталогах і базах даних, забезпечує точні вимірювання, аналіз, а також дозволяє відстежувати зміни їхнього стану з часом.

Тривимірні моделі об'єктів культурної спадщини є цінними для реставрації, оцінки їхнього стану та збереження. Водночас, більшість сучасних методів створення 3D-зображень потребують дорогого обладнання та кваліфікованих фахівців, що ускладнює їхнє використання в багатьох установах, які мають фінансові обмеження. Найбільш поширеними є методи лазерного сканування для невеликих об'єктів та використання безпілотних літальних апаратів для великих архітектурних комплексів. Вони дозволяють створювати високоточні детальні моделі, проте є вартісними та потребують значних зусиль для їхньої реалізації, а також складних технічних процедур для об'єднання отриманих даних у цілісний 3D-об'єкт.

В українському науковому середовищі питання моделювання просторових архітектурних пам'яток почало активно розглядатися лише в останні роки, що пов'язано з появою на ринку сучасного геодезичного обладнання.

Численні наукові праці присвячені застосуванню методів цифрової фотограмметрії для вирішення різних завдань та використанню безпілотних літальних апаратів. Зокрема, Р. Шульц проаналізував сучасні можливості наземної фотограмметрії та лазерного сканування, а також розглянуто методи інтеграції даних, отриманих цими технологіями [27].

Тривимірне наземне лазерне сканування та фотограмметрія належать до «цифрових методів документації, оскільки дозволяють створювати цифрові моделі, що майже повністю відповідають фізичній геометрії об'єктів на основі точних вимірювань» [40].

Наземне лазерне сканування дає змогу забезпечити отримання тривимірної просторової інформації про об'єкт у межах певної відстані від землі за допомогою лазерного випромінювання. Цей метод відзначається високою швидкістю збору даних, мобільністю та доступністю, що дає змогу швидко відтворювати геометрію великих об'єктів культурної спадщини. При цьому точність даних, отриманих за допомогою наземного лазерного сканування, являється найвищою у вертикальному напрямку.

Цифрова фотограмметрія з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) має певні переваги перед лазерним скануванням. Ортофотоплани, створені за допомогою БПЛА, дозволяють проводити безпосередні вимірювання відстаней, кутів, координат та площ, оскільки просторові співвідношення між об'єктами збережені так само, як на топографічних картах. Крім того, фотограмметрія з БПЛА характеризується вищою горизонтальною точністю та швидкістю збору даних порівняно з наземним лазерним скануванням. Отже, правильна інтеграція цих двох технологій дозволяє отримати як числову інформацію, так і детальну структурну модель об'єктів архітектурної спадщини.

3D-сканери застосовуються для отримання метрологічно точної інформації про загальну форму великих об'єктів і поверхонь. Однак вони не придатні для детального вимірювання поверхневих структур. Сканери цього типу працюють на основі лазерного імпульсу: лазерний віддалемір визначає відстань до об'єкта або поверхні, вимірюючи час проходження світлового імпульсу в обох напрямках та використовуючи відоме значення швидкості світла.

У сфері документації культурної спадщини сканери середнього та далекого діапазону часто поєднують із 3D-сканерами ближнього діапазону. Такий підхід дає змогу створювати моделі, що поєднують глобальну метрологічну точність із високою роздільною здатністю. Ці сканери спеціально розроблені для роботи на відкритому повітрі, забезпечуючи ефективне сканування на відстані до 330 метрів. Це дозволяє швидко та точно створювати цифрові моделі ландшафтів, архітектурних ансамблів, фасадів будівель та інших великих об'єктів із точністю до 2 мм.

3D-сканери ближнього діапазону (з робочою відстанню від 8 см до 1 м) призначені для високоточного запису форми та поверхні об'єктів. Близька відстань знімання забезпечує високу роздільну здатність. Лазерне сканування цього типу має частоту від 100 000 до 500 000 точок на секунду, що дозволяє швидко отримувати значні обсяги даних. Точність визначення положення точки є надзвичайно високою.

На коротких відстанях сканери ближнього діапазону перевершують довго- та середньодіапазонні сканери, забезпечуючи детальне відтворення складних об'єктів на відстані до 25 метрів. Вони широко застосовуються для сканування скульптур та інших складних форм. Отримані 3D-моделі використовуються в наукових дослідженнях, у віртуальних додатках, а також для створення фізичних копій об'єктів, зокрема тактильних моделей для людей із вадами зору.

Сканери цього типу працюють на основі лазерної або структурованої системи світла. Лазерні 3D-сканери, що використовують метод тріангуляції,

застосовують лазерний промінь і одну або дві камери для фіксації об'єкта, після чого за тригонометричними розрахунками визначається відстань до поверхні. Структуровані світлові сканери працюють за аналогічним принципом, але замість лазера використовують проєкційні світлові шаблони, аналізуючи їхнє спотворення камерою для розрахунку глибини кожної точки.

3D-сканування в ближньому діапазоні є надзвичайно важливим для документування об'єктів культурної спадщини, які перебувають під загрозою зникнення. Детальне цифрове відтворення не лише зберігає загальну форму, а й точно передає текстуру та особливості поверхні, що є необхідним для повноцінної фіксації історичних артефактів.

Фотограмметрія є ефективним методом отримання 3D-інформації, особливо у випадках, коли використання 3D-сканерів є неможливим (наприклад, у важкодоступних місцях або зонах конфліктів), а також коли потрібна висока швидкість збору даних. Цей метод базується на отриманні тривимірної інформації з двовимірних зображень за допомогою спеціального програмного забезпечення та алгоритмів обробки зображень.

Для створення 3D-моделі фотокамера робить серію знімків об'єкта з різних ракурсів, забезпечуючи їхнє перекриття. Далі ці зображення обробляються програмними засобами, що дозволяє отримати детальну тривимірну модель, придатну для різних застосувань.

Фотограмметрія застосовується ще з часів зародження сучасної фотографії й широко використовується в таких галузях, як топографічне картографування, архітектура та археологія. Основна перевага методу полягає в тому, що необхідні дані можуть бути отримані за допомогою звичайних комерційно доступних камер, що робить його доступним та економічно вигідним способом документування об'єктів.

Сучасні технології кардинально змінили традиційний музейний досвід, надаючи можливість відвідувачам переглядати експонати музеїв з будь-якої частини світу. Завдяки цьому значно зросла кількість людей, які можуть

ознайомитися з культурною спадщиною, а самі колекції стали віртуальними та інтерактивними, що ідеально поєднується з можливостями 3D-технологій.

Останніми роками 3D-сканування стало невід'ємною частиною комплексного та безконтактного підходу до документування й збереження культурних пам'яток. Використання високоточного 3D-сканування дозволяє не лише детально вивчати та контролювати стан історичних об'єктів, а й робить їх доступними для широкої аудиторії. Завдяки цьому можна глибше зрозуміти спільну культурну історію людства, а також забезпечити довготривале збереження цифрових архівів.

Ключовою складовою цього процесу є фіксація поверхонь і форм артефактів з максимально можливою деталізацією та збереження отриманих даних у необроблених форматах. Це дозволяє повторно опрацьовувати інформацію в майбутньому, адаптуючи її до нових технологічних можливостей і забезпечуючи її актуальність упродовж часу.

Лазерний сканер дозволяє збирати широкий набір даних, які формують тривимірні координати, відомі як хмара точок. Ця хмара являє собою сукупність (X, Y, Z) точок у єдиній системі координат, що дає змогу користувачам краще розуміти просторовий розподіл об'єкта. У більшості випадків хмара точок є первинним, необробленим продуктом лазерного сканування, що містить велику кількість координат, щільність яких залежить від відстані між ними. Такі дані можуть описувати як окремі дрібні деталі, так і цілісні великі архітектурні структури.

Використання цієї технології значно розширює можливості доступу громадськості до об'єктів культурної спадщини через їхню візуалізацію. Завдяки високій точності вимірювань, деталізованому зображенню та ефективному поширенню цифрових копій об'єктів мистецтва та архітектури, 3D-сканування допомагає зберегти спадщину від забуття. Ця технологія є корисною не лише для фахівців у галузі охорони культурних цінностей, а й для широкої аудиторії, оскільки вона дає змогу краще зрозуміти значущість і унікальність історичних об'єктів (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Обладнання, що використовується для фотограмметрії – БПЛА Phantom 4 Advanced+ [18, с. 112]

Крім того, хмара точок може використовуватися для моніторингу стану об'єктів спадщини, дозволяючи аналізувати їхні деформації або зміни з часом. Ця методика також ефективна для створення анімацій та 3D-ілюстрацій, які можуть використовуватися у музеях, виставкових центрах, засобах масової інформації та інтерактивних навчальних програмах, сприяючи популяризації та збереженню культурної спадщини.

Об'єкти культурної спадщини є важливими економічними та соціальними активами будь-якої громади. Вони відіграють значну роль у розвитку туристичної галузі та задоволенні попиту на дозвілля, що зумовлює необхідність їх ретельної документації та збереження. У зв'язку з цим державні установи та організації, які опікуються культурною спадщиною, все частіше звертаються до технологій 3D-сканування для точного фіксування геометричних параметрів історичних об'єктів. Це сприяє не лише збереженню художньої цінності пам'яток, а й забезпечує високу точність їх подальшої реставрації.

Поєднання 3D-лазерного сканування з цифровою фотограмметрією дозволяє створювати детальні тривимірні моделі пам'яток, що відповідають міжнародним стандартам документації культурної спадщини. Використання цих технологій є критично важливим для архівування, моніторингу стану об'єктів та проведення реставраційних робіт.

Документація культурної спадщини в Україні залишається актуальним та складним завданням, яке потребує комплексного підходу та впровадження сучасних технологічних рішень. Завдяки цифровим методам не лише забезпечується довготривале збереження історичних об'єктів, а й створюються детальні бази даних, які можуть використовуватися власниками пам'яток, археологами та реставраторами для подальших досліджень і відновлення культурних цінностей.

1.2. Використання фотограмметричних технологій зйомки ситуації і рельєфу для створення карт та планів

Для створення карт та планів треба виконати зйомку ситуації та рельєфу з дотриманням певних вимог, які пред'являються до конкретного масштабу, а також умовними знаками, визначеними інструкціями. Зйомка може здійснюватися за допомогою різних методів, зокрема геодезичних, фотограмметричних і комбінованих.

В основному в геодезії використовується тахеометрична зйомка. Це традиційний метод, що забезпечує високу точність при вимірюванні відстаней та кутів для створення карт.

У фотограмметрії існують «два основні способи зйомки ситуації:

1. Зйомка на універсальних приладах.
2. Зйомка за допомогою фотопланів.

Зйомка рельєфу може бути виконана як на універсальних приладах, так і за допомогою геодезичних методів, в залежності від вимог точності та специфіки місцевості» [22, с. 79].

Для зйомки контурів на насичених об'єктах з високою кількістю елементів найбільш продуктивним являється метод зйомки за допомогою фотопланів, так як це виключає помилки оператора під час відображенні контурів.

Для зйомки рельєфу найчастіше використовуються універсальні прилади, однак, якщо точність по висоті не задовольняє вимогам, застосовується тахеометрія для зйомки рельєфу, а контури можуть бути отримані за допомогою фотопланів або універсальних приладів.

Конкретна технологія зйомки рельєфу та контурів залежить від точності, яка вимагається для створення карти або плану, а також від наявних приладів і специфіки місцевості. Наприклад, у високогірних районах, де вимоги до точності рельєфу є високими, висотні дані можуть бути отримані за допомогою тахеометра, а ситуація знімається на універсальних приладах. Створення фотопланів у таких районах може бути ускладнене через складність рельєфу та можливу недостатню точність.

У деяких випадках можливий варіант зйомки рельєфу та контурів за допомогою знімків наземної зйомки, коли інші методи є менш ефективними.

Отже, вибір конкретного методу зйомки залежить від точності, яку потрібно досягти, характеру місцевості та доступного обладнання.

Фототопографічні технології базуються на вивченні та зборі інформації про об'єкти шляхом створення їх двовірних або тривимірних моделей, що будуються на основі зображень об'єкта. Використання тривимірних моделей є найбільш ефективним для таких задач, оскільки дозволяє отримати більш точні та детальні дані про об'єкт. Ці моделі можуть бути побудовані за допомогою універсальних приладів, таких як аналогові, аналітичні та цифрові інструменти.

Історія використання аналогових універсальних приладів
У 1980-90 роках в СРСР у фотограмметричному виробництві активно використовувалися аналогові універсальні прилади, зокрема:

- Стереопроєктори СПР-2, СПР-3 – це прилади механічного типу, що використовуються для створення стереообразів аерофотознімків, що дозволяють аналізувати рельєф і будувати тривимірні моделі місцевості.
- Стереографи СД-3, СЦ – універсальні прилади для обробки стереоізображень, призначені для створення топографічних карт і планів.
- Стереометрографи та топокарт-ортофот – прилади механічного типу виробництва фірми «Karl Zeiss» (НДР), що використовувалися для обробки як аерофотознімків, так і наземних знімків. Вони дозволяли створювати ортофотоплани та топографічні карти.

Ці прилади були інструментами високої точності, здатними забезпечити створення карт і планів у масштабах від 1:5 000 до 1:25 000 і менше. Вони використовувалися для обробки планових аерофотознімків та інших типів зйомки, що дозволяли створювати детальні геодезичні та топографічні матеріали.

Аналогові універсальні прилади мали високу інструментальну точність, що дозволяло забезпечити створення карт і планів в широкому діапазоні масштабів, зокрема для великомасштабних карт (1:5 000) та середньомасштабних (1:25 000). Однак, на сьогоднішній день ці методи вже поступилися місцем більш сучасним цифровим технологіям, але вони все ще використовуються в історичних контекстах і у випадках, коли необхідна перевірка старих даних.

Таким чином, фототопографічні технології на основі аналогових універсальних приладів були важливим кроком у розвитку картографії та фотограмметрії, забезпечуючи точність і деталізацію картографічних матеріалів для різних застосувань.

Для побудови моделі на універсальних приладах використовуються різноманітні матеріали, зокрема «аеронегативи (діапозитиви), елементи внутрішнього орієнтування знімків, координати опорних точок, матеріали дешифрування, параметри аерофотознімання (висота польоту та фокусна відстань), а також планшет з координатною сіткою і рамкою трапеції» [22, с.

81]. Модель можна будувати за допомогою установочних елементів або по умові компланарності. На аналогових приладах зазвичай використовують другий метод, оскільки перший часто забезпечує недостатню точність через складність орієнтування знімків.

Метод побудови моделі за умовою компланарності полягає у взаємному орієнтуванні знімків та їх орієнтуванні так, щоб всі точки зображення знаходилися на одній площині. Після цього проводиться горизонтування та масштабування моделі місцевості. Згодом здійснюється зйомка контурів та рельєфу, що дозволяє точно відобразити форму місцевості.

Для оцінки точності моделі використовуються кілька методів контролю якості, таких як визначення залишкових поперечних параллаксів, порівняння координат точок на знімках з координатами на місцевості, а також перевірка зв'язків між суміжними моделями. Це дозволяє забезпечити високу точність картографічної продукції та відповідність її реальним геометричним характеристикам.

Аналітичні універсальні прилади (АУП) забезпечують значні переваги в точності та автоматизації процесів. Вони широко використовуються для обробки космічних знімків та для створення цифрових карт та планів місцевості. Ось деякі ключові характеристики та особливості аналітичних приладів:

1) Висока точність. Точність вимірювань становить 1-2 мкм завдяки використанню оптико-механічної системи і врахуванню всіх видів систематичних помилок. Надлишкові вимірювання дозволяють зменшити інструментальні помилки.

2) Відсутність обмежень на орієнтування знімків. АУП не накладають обмежень на елементи внутрішнього та зовнішнього орієнтування знімків, що забезпечує більшу гнучкість у їх використанні.

3) Автоматизація процесів. Велика частина процесів на аналітичних приладах автоматизована, що значно покращує ефективність роботи та зменшує вплив людського фактора.

4) Універсальність для різних фотограмметричних завдань. АУП здатні вирішувати широкий спектр фотограмметричних задач, зокрема для великомасштабних зйомок.

Аналітичні універсальні прилади використовуються для обробки космічних знімків, створення картографічних оригіналів і цифрових карт. Вони застосовуються також для земельного кадастру, що вимагає високої точності і деталізації.

На підприємствах України широко використовуються такі моделі: «Стереоанаграф-4, SD-2000, SD-20, TRASTER, ASP, Дікомат» [22, с. 82].

SD-20 є одним з найбільш популярних приладів, що широко застосовується. Це прилад, який дозволяє обробляти аерокосмічні знімки і створювати картографічні оригінали. Його можна використовувати «для аналітичної фототріангуляції та створення банків даних земельного кадастру. Помилки визначення висот для цього приладу складають від 1:10000 до 1:12000, а похибки положення контурних точок – 9-10 мкм, що робить його ідеальним для картографування до масштабу 1:500 і створення баз даних міського кадастру» [22, с. 82].

Усі аналітичні стереоплоттери мають схожі блоки та системи: «оптико-механічна система – прецизійний автоматизований стереокомпаратор для обробки знімків; комп'ютер – для обробки даних і управління процесами вимірювання; блок управління; система датчиків стереокомпаратора – для вимірювання переміщення кареток знімків та об'єктивів по осях X і Y й передачі цих даних на комп'ютер; штурвали координатно-вимірювальної системи (X, Y, Z) – для можливості вручну обертати штурвали для визначення координат точок моделі, і ці значення передаються на комп'ютер; сервомотори, які переміщують каретки знімків та об'єктиви за обчисленими значеннями координат, що передаються на комп'ютер» [22, с. 83].

Ці компоненти забезпечують точне і ефективне виконання фотограмметричних задач, включаючи створення цифрових моделей місцевості та обробку аерокосмічних знімків.

Плоттери використовують два основних режими для обробки фотограмметричних даних: стереокомпаратор (прямий) та універсальний прилад (зворотний). Кожен з цих режимів має свої специфічні функції та етапи виконання операцій.

Режим стереокомпаратора (прямий) використовуються для внутрішнього і взаємного орієнтування знімків.

За внутрішнього орієнтування «оператор встановлює мітки на координатні мітки на знімках для визначення внутрішніх параметрів камери (таких як фокусна відстань, координати оптичної осі тощо)» [22, с. 83]. При взаємному орієнтуванні оператор наводить марку на стандартні точки, що мають відомі координати. Це необхідно для визначення відносного положення знімків один до одного. Після того як оператор виміряє координати точок на знімках, ці дані передаються до комп'ютера, який обчислює перетворені координати та коригує їх з урахуванням систематичних помилок. Далі виконуються обчислення для визначення елементів взаємного орієнтування знімків. Це дозволяє коректно співвіднести їх просторові положення. Контроль точності проводиться через перевірку залишкових поперечних параллаксів (розбіжностей між точками на знімках).

Режим універсального приладу (зворотний) активується після завершення взаємного орієнтування і використовується для обробки моделі місцевості.

Оператор використовує штурвали X , Y , Z для визначення координат точок на моделі. Всі координати передаються як цифрові сигнали до комп'ютера, де вони перетворюються в цифровий код для подальших обчислень. Використовуючи формули зв'язку координат точок місцевості та знімка (умова колінеарності), проводиться обрахунок координат точок на обох знімках, що відповідають певним точкам моделі. Це дозволяє точніше визначити положення точок в просторі.

Далі оператор використовує штурвали X , Y , Z для наведення на опорні точки і визначення їх фотограмметричних координат. Вимірюється координати не менше чотирьох опорних точок. Потім комп'ютер вирішує задачу щодо

визначення елементів зовнішнього орієнтування моделі. Оцінка точності зовнішнього орієнтування здійснюється за допомогою порівняння координат опорних точок і перевірки їх розбіжностей. Це допомагає оцінити точність обчислених елементів зовнішнього орієнтування. Після виконання зовнішнього орієнтування моделі, комп'ютер обчислює елементи зовнішнього орієнтування для кожного знімка, що дозволяє здійснювати зворотну засічку на точки моделі.

Коли всі орієнтування (внутрішнє, взаємне та зовнішнє) завершено, переходять до фактичної зйомки рельєфу та контурів. Зйомка може проводитися як в графічному, так і в цифровому вигляді, залежно від використовуваного приладу та мети роботи.

Ці процеси дозволяють створити точні 3D-моделі місцевості, які можна використовувати для подальших картографічних робіт, аналізу та планування.

Для визначення точності побудови моделі використовуються «81 контрольна точка, які вибираються в різних частинах моделі. Середні похибки координат контрольних точок у плані не повинні перевищувати 0,3 мм на одиницю масштабу карти, а по висоті — 0,3 висоти перетину рельєфу» [22, с. 83].

Для збору топографічної інформації за допомогою приладу SD-20 застосовують програмний продукт MicroStation із блоком PRO 600. Це дозволяє здійснювати стереоскопічний збір даних з одночасним дешифруванням і кодуванням об'єктів. Інформація про контури збирається по шарах, і кожен об'єкт має бути кодуваний відповідно до класифікатора топографічних об'єктів для певного масштабного ряду карт. У разі сумнівів щодо характеристик об'єктів їх фіксують для подальшої польової доробки. При цьому існує можливість первинного редагування отриманих даних, що дає змогу змінювати форми об'єктів або створювати нові на основі наявних фрагментів.

Зібрана топографічна інформація зберігається у «базі даних по шарах, що дозволяє організувати дані для подальшої обробки та аналізу. Для зображення рельєфу визначають відмітки характерних точок з густиною 8-10 точок на 1 дм² карти. Горизонталі отримують за допомогою стереоскопічного трасування

поверхні стереомоделі, при цьому програма візуалізує положення горизонталей на екрані монітора в реальному часі. Одночасно з трасуванням горизонталей визначають чисельні характеристики елементів рельєфу, такі як висоти урвищ і насипів» [22, с. 83].

Точність зібраної інформації перевіряється за допомогою залишкових поперечних параллаксів та інших методів контролю якості, що забезпечує точність і достовірність картографічних даних. Завдяки цьому процесу використання приладів на кшталт SD-20 і програмного забезпечення MicroStation PRO 600 дозволяє досягти високої точності і автоматизації в обробці топографічних даних для створення карт і моделей місцевості.

Складений оригінал карти має бути «зведений із суміжними листами карти. Розбіжності в положенні контурів з чіткими лініями не повинні перевищувати 1,0 мм у рівнинних і горбистих районах, а в гірських і високогірних районах – 1,5 мм. Розбіжності в положенні горизонталей на суміжних листах карти не повинні перевищувати полуторної точності відображення рельєфу» [22, с. 83].

Сьогодні для зйомки контурів та рельєфу часто використовують цифрові фотограмметричні станції (ЦФС). Вони дозволяють «автоматизувати процеси внутрішнього і взаємного орієнтування знімків та побудови цифрової моделі рельєфу. Побудова моделі на ЦФС виконується за аналогічним алгоритмом, як і на аналітичних плоттерах. Відмінність полягає в тому, що на аналітичних універсальних приладах вимірювання здійснюються за реальними фотознімками, а на ЦФС – за цифровими зображеннями, що відображаються на екрані дисплея. Для перетворення фотознімків у цифрові зображення використовуються сканери, що забезпечують високу метричну та фотометричну якість» [22, с. 83].

Оскільки вимірювання на ЦФС здійснюються на екрані дисплея в цифровому коді (пікселях) та управляються комп'ютером, на відміну від аналітичних плоттерів, у ЦФС не потрібна оптико-механічна система (стереокомпаратор), датчики інтерфейсу чи електромотори. Основними

характеристиками ЦФС є клас комп'ютера, тип сканера та програмне забезпечення для вирішення фотограмметричних задач. У країнах СНД широко використовуються ЦФС «Фотомод», «Талка», «ERDAS», «SDS». Одним з прикладів є цифрова фотограмметрична станція «Дельта», яка активно застосовується в Україні.

1.3. Характеристика засобів та методів 3D-сканування для створення моделей архітектурних об'єктів

Повітряне лазерне сканування являється однією з найефективніших технологій для збору великої кількості геопросторової інформації.

LiDAR (Light Detection and Ranging) – це «технологія дистанційного зондування, яка вимірює відстань до об'єкта за допомогою лазера і аналізує відбиття світла. У контексті збору даних цей термін застосовується до системи, яка збирає позиційні дані та висоти над рівнем моря, що визначають поверхню рельєфу місцевості, а також інформацію про наземні об'єкти, шляхом сканування профілів з повітря. Система LiDAR, встановлена на вертольоті або літаку, використовує ближню інфрачервону частину електромагнітного спектру (1064 нм) для активного збору даних в будь-який час доби, навіть у тіні або при низькій видимості (наприклад, під хмарами)» [17, с. 20].

Хорватська компанія Geofoto, яка спеціалізується на фотограмметрії та географічних інформаційних системах (ГІС), використовує систему лазерного сканування з повітря IGI LiteMapper 6800-400. Ця система є серією обробленого аерофотознімання і оснащена лазерним сканером Riegl LMS-Q680i, навігаційною системою IGI CCNS4 та GPS/IMU системою. LiteMapper 6800-400 конструктивно має просту, масивну, але компактну та полегшену форму, що дозволяє використовувати її на різних літаках, від великих до гелікоптерів.

Основна функція цієї системи полягає в створенні точних карт Землі. Сканування здійснюється за допомогою швидко обертаючого багатогранного дзеркала, яке забезпечує повністю лінійні, односпрямовані і паралельні лінії сканування. LiteMapper (рис. 1.2) є революційною системою LiDAR, яка є

першою в світі комерційною системою «з функцією високого дозволу запису сигналу в цифровий формат. Її здатність аналізувати форму хвилі для кожного окремого лазерного променя дозволяє детально досліджувати вертикальні структури поверхні. Система містить усі необхідні апаратні та програмні компоненти для створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) і моделей місцевості (ЦММ)» [17, с. 21].



Рис. 1.2. Компоненти LiteMapper 6800-40 [17, с. 21]

Ключовими особливостями системи LiteMapper 6800-40 є: «висока роздільна здатність даних, точність сканування становить 20 мм; максимальна відстань сканування — 3000 м; швидкість сканування є досить високою: 10-200 ліній/с та від 1 до 10 точок на м²» [17, с. 21].

При використанні LiteMapper 6800-40 лазерний імпульс передається з точним вимірюванням часу. Відбитий імпульс вимірюється для визначення часу його відбиття. Різниця в часі між передачею і відбиттям імпульсу використовується для обчислення відстані між сенсором і об'єктом. Завдяки точному положенню сенсора, отриманому від GPS, та орієнтації сенсора, визначеній інерційною системою наведення (IMU), обчислюються прямокутні координати XYZ поверхні відбивання.

LiteMapper 6800-40 застосовують для: доповнення стандартних геодезичних та аерофотограмметричних зйомок при плануванні нових автомагістралей, залізниць, аеропортів; розробки цифрових служб передачі даних - 3D моделі міст, які використовують в цілях містобудування, планування маршрутів, реєстрації кадастру і туризму, управління відходами тощо.

Компанія Bentley представила нові продукти для «моделювання реальності, зокрема Context Capture та Context Capture Centre» [17, с. 21]. Ці програми дозволяють створювати детальні 3D-моделі існуючих умов для інфраструктурних проектів з використанням звичайних фотографій, зроблених стандартними камерами, без потреби в дорогому спеціалізованому обладнанні. Таке програмне забезпечення дозволяє створювати високоякісні моделі реальності, що використовуються в процесах проектування, будівництва й експлуатації різних об'єктів впродовж усього життєвого циклу проектів.

Однією з ключових особливостей ContextCapture є її здатність автоматично обробляти фото для створення моделей з високою деталізацією, що особливо корисно для геопросторових робочих процесів. Завдяки новій змінній роздільній здатності сітки, програма може підтримувати сторонні формати, такі як Esri i3s, Google Earth KML, SpaceEyes3D, OSGB (OpenSceneGraph) та власний формат 3MX. Це дає змогу обробляти великі об'єми даних і створювати моделі реальності, які можна використовувати в різних платформах і робочих процесах.

Програма ContextCapture Centre розширює можливості, дозволяючи створювати найбільші та найскладніші 3D-моделі інфраструктури, включаючи моделі для великих територій, таких як цілі міста. Вона підтримує обробку знімків високої роздільної здатності, що робить її потужним інструментом для великих масштабів, включаючи аерофотозйомку та зйомку за допомогою безпілотних літальних апаратів (БЛА). Замість традиційних способів збирання даних, програма дозволяє заощаджувати час і кошти, роблячи дані про реальність доступними для всіх учасників проекту.

Використання ContextCapture забезпечує високу точність і продуктивність для створення цифрових моделей, що може бути надзвичайно корисно для широкої аудиторії користувачів геопросторових даних.

DigitalGlobe пропонує технологію атмосферної компенсації AComp, яка вирішує проблему «розсіювання світлових хвиль і поглинання світла через атмосферу, що може впливати на якість супутникових знімків. Атмосфера, що

діє як бар'єр, погіршує чіткість зображень, зокрема через туман, водяну пару та тверді частинки. Коли супутник отримує зображення, світло, яке відбивається від поверхні Землі, проходить через атмосферу, що знижує якість знімка. Технологія AComp допомагає пройти крізь цей туман, покращуючи якість і чіткість супутникових знімків, зроблених за умов низької видимості. В результаті знімки стають значно яснішими і більш деталізованими, що дозволяє їх ефективніше використовувати для різних завдань. Ця технологія покращує візуальну естетику зображень, підвищуючи зручність і доступність супутникових даних. Вона дозволяє отримувати супутникові знімки, які можуть конкурувати за якістю з панорамами на землі, що робить їх корисними для аналізу та планування в різних сферах» [17, с. 21] (рис. 1.3).



Рис.1.3. Можливості AComp [17, с. 21]

До ключових особливостей AComp (атмосферної компенсації) від DigitalGlobe можна віднести: «чіткість зображення: технологія усуває ефекти розсіювання світлових хвиль через туман, водяну пару і тверді частинки в атмосфері, забезпечуючи чіткіші супутникові знімки; підвищення кількості перспективних і реальних зображень, отриманих з нової колекції даних; наявність бібліотеки зображень; покращену здатність здійснювати

високоточний аналіз і прискорене отримання інформації; підвищення загальної якості супутникових знімків, що робить їх більш ефективними для різних завдань» [17, с. 21].

Ці особливості дозволяють значно покращити супутникові знімки, забезпечуючи їх використання в широкому спектрі геопросторових задач.

ArcGIS — це потужна платформа, яка надає всі необхідні інструменти для створення, застосування та обміну географічними знаннями серед професіоналів та глобального співтовариства. Ця система має широку архітектуру, що дозволяє розгорнути її як в хмарі, так і на власній IT-інфраструктурі організації. Вона підтримує доступ до програмного забезпечення та сервісів з будь-якого пристрою, будь то настільний чи мобільний, що дозволяє працювати з даними на будь-якому етапі та в будь-якому місці.

Платформа ArcGIS повністю підтримує роботу як окремих користувачів, так і організацій, а також можливість об'єднання груп організацій для колективної роботи. Вона реалізує основні принципи доступу до географічних знань через Веб-ГІС. ArcGIS дозволяє працювати з усім спектром просторової інформації, починаючи від збору даних, їх зберігання, моделювання, аналізу та візуалізації до створення систем управління в реальному часі.

Платформа продовжує розвиватися, включаючи нові веб-сервіси та додатки, вдосконалення 3D картографії, розробку методів «розумної картографії» та технологій просторово-часового аналізу. Вона також підтримує роботу з великими даними та даними в реальному часі, постійно розширюючи колекцію шаблонів і додатків, а також інструменти для швидкої розробки ГІС-додатків.

У 2017 році був анонсований запуск нового релізу версії ArcGIS 10.5, одним із головних нововведень якого став веб-додаток Insights for ArcGIS. Ця технологія спрощує процес обробки та аналізу даних, роблячи його доступним для будь-якого співробітника організації, навіть тих, хто не має спеціальних навичок у галузі ГІС.

Insights for ArcGIS представляє дані та результати дослідницького аналізу у вигляді динамічних і інтерактивних панелей або «карток». Користувач може експериментувати з даними, застосовуючи різні інструменти обробки, і отримувати миттєві результати у вигляді карт, таблиць та графіків. Дані для аналізу можуть надходити з різних джерел, таких як бази даних, веб-сервіси або share-файли, і можуть містити як просторову прив'язку, так і ні.

Додаток дозволяє розраховувати та відображати на карті різні статистичні метрики, такі як геокореляція, теплові карти та інші. Також є можливість використовувати «заготовлені питання», що допомагають з'ясувати просторові розподіли, зміни за певний період або взаємозв'язки між різними змінними. Це дозволяє краще розуміти просторово-часові взаємозв'язки та закономірності різних процесів.

Ще однією значною зміною в платформі ArcGIS є вдосконалення технологій для обробки «великих даних», роботи з даними в реальному часі та розподілених обчислень. Однією з основних новинок є серверний модуль GeoAnalytics Server, який підтримує паралельні обчислення на десятках або сотнях вузлів, що дозволяє швидко аналізувати величезні обсяги даних всього за кілька хвилин.

Компанія Esri активно працює над розвитком своєї платформи ArcGIS Online, постійно доповнюючи її новим контентом і функціональністю. Однією з важливих подій стало укладання партнерської угоди з компанією Digital Globe, світовим лідером у постачанні супутникових знімків. Завдяки цій угоді користувачі ArcGIS Online зможуть отримувати актуальні знімки з високою роздільною здатністю.

Лазерні сканери серії Focus3D X є одними з найкомпактніших і легких на ринку, що робить їх ідеальними для вимірювань як всередині приміщень, так і зовні. Ці сканери поєднують швидкість та точність, надаючи користувачам всі переваги професійних 3D-лазерних сканерів.

Модель Focus3D X 330 має «діапазон сканування до 330 м, а модель Focus3D X 130 дозволяє проводити точні вимірювання на відстані до

130 м» [17, с. 22]. Це робить ці сканери дуже мобільними та зручними для різноманітних завдань лазерного сканування (рис. 1.4).

Сканер FARO Focus3D X 330 розроблений спеціально для «зовнішнього застосування». Він відрізняється компактними розмірами, легкістю, великим діапазоном сканування і здатністю працювати навіть при прямому сонячному світлі завдяки інтегрованому GPS-приймачеві для простого визначення координат. Дані 3D сканування можуть бути легко імпортовані в різноманітні програмні рішення, які застосовуються в аналізі аварій, реконструкції, архітектурі, будівництві, судовій експертизі, промислового виробництва та землеустрої. Це дозволяє швидко, точно і надійно проводити аналіз документації, вимірювати відстані, розміри, а також розраховувати площі та об'єми. Точність вимірювання відстані також становить до ± 2 мм, а діапазон - від 0,6 до 330 м» [17, с. 22].



Рис.1.4. Лазерний сканер Focus3D X 330 [17, с. 22]

До ключових особливостей лазерних сканерів FocusS Series можна віднести:

- 1) захист від пилу та води (IP54), що дозволяє використовувати їх у різних умовах, незважаючи на погану погоду чи забруднення зовнішнього середовища.
- 2) підтримку високого динамічного діапазону (HDR) для запису фотографій. Вбудована 8-мегапіксельна HDR камера дозволяє отримувати кольорові деталі з високою точністю на відміну від звичайних зображень.

3) вага лише 4,2 кг і вбудований літій-іонний акумулятор, який працює до 4,5 годин на одній зарядці. Це робить сканери серії FocusS ультра-портативними та зручними для тривалої роботи в польових умовах.

4) наявність великого і чіткого сенсорного екрану, що робить взаємодію з пристроєм зручною і зручною для користувача.

5) програмне забезпечення FARO SCENE Webshare дозволяє обмінюватися даними в реальному часі для віддаленого сканування та спільної роботи над проектами.

Ці особливості роблять лазерні сканери серії FocusS потужним інструментом для точних і ефективних вимірювань у будь-яких умовах.

RIEGL miniVUX-1UAV – це компактний та міцний лазерний сканер, що має алюмінієвий корпус, який дозволяє легко інтегрувати пристрій на різноманітні БПЛА літакового та вертолітного типу. Завдяки своїм характеристикам, він ідеально підходить для проведення вимірювань на снігу та льоду. Сканер здатний одночасно відстежувати до п'яти відбитих сигналів на кожен лазерний імпульс, що дозволяє отримувати точні дані навіть за складних умов. Малий кут розходження вимірювального променя забезпечує високу просторову роздільну здатність, що дозволяє отримати детальні зображення. Завдяки унікальним технологіям цифрування та оперативної обробки сигналу від RIEGL, цей пристрій може працювати в екстремальних умовах і забезпечує високу якість збору даних.

Ключовими особливостями RIEGL miniVUX-1UAV є:

- легкий і компактний дизайн. Сканер важить всього 1,6 кг і має малогабаритний корпус, що робить його ідеальним для інтеграції з безпілотними літальними апаратами (БПЛА), а також для проектів з обмеженим простором.

- висока швидкість вимірювань. Пристрій здатний виконувати до 100,000 вимірювань за секунду, що забезпечує швидкий збір даних і високу ефективність при аерознімальних роботах.

- широке поле огляду. Завдяки 360° полю огляду, сенсор може захоплювати дані в обширних зонах за одну мить, що є великим перевагою при скануванні великих територій.
- висока робоча висота. Сенсор може працювати на висоті до 100 метрів, що дозволяє здійснювати обстеження важкодоступних або широких територій.
- передова технологія обробки сигналу. Використовує унікальну технологію обробки сигналу RIEGL для високоякісного збору даних, навіть в несприятливих атмосферних умовах. Це дозволяє отримувати точні дані для картографічних і геодезичних робіт.
- економічність і універсальність. Завдяки своєму компактному дизайну і можливостям швидкої інтеграції, RIEGL miniVUX-1UAV є економічно ефективним рішенням для різних застосувань, таких як геодезичні вимірювання, картографія та інші.

Цей лазерний сканер забезпечує високоточний збір даних з безпілотних літальних апаратів і є відмінним інструментом для проведення вимірювань на великих і складних територіях (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Сенсор RIEGL miniVUX-1UAV [17, с. 24]

Сканер застосовується в різних областях, таких як сільське і лісове господарство для моніторингу земельних угідь та лісових масивів, археологія та збереження пам'яток архітектури для точного картографування, а також на будівельних майданчиках для збору даних під час будівництва. Його також використовують для картографування льодовиків та засніжених ділянок, а також для моніторингу зсувів, що робить його незамінним інструментом для точних вимірювань у важких природних умовах.

Наземна скануюча система Polaris TLS, яка дозволяє отримувати точні дані значно швидше, ніж раніше. Ця система заповнює прогалину між компактними, легкими сканерами з обмеженим діапазоном і важкими імпульсними системами великого радіусу дії. Polaris TLS була створена для потреб геодезистів і має зручний інтерфейс для швидкого збору даних, які можна одразу застосувати.

Цей сканер оснащений високороздільною камерою, вимірювачем кута нахилу, компасом та приймачем GPS. Система має високу продуктивність та всі необхідні функції для зйомки, а також можливість встановлення на різні платформи, включаючи штативи та автомобілі. Усі ці характеристики роблять Polaris TLS одним з найуніверсальніших наземних лазерних сканерів на ринку.

Optech Polaris TLS має три моделі з різними діапазонами вимірювань: TLS-250 (короткий діапазон до 250 м), TLS-750 (середній діапазон до 750 м) і TLS-1600 (дальній діапазон). Ця система використовується в архітектурі, фасадному зніманні, виконавчому зніманні, археології, охороні культурної спадщини, обстеженні тунелів, лісовому господарстві, мобільному обстеженні берегових ліній, зйомці кар'єрів, цивільному будівництві, геології та обстеженні приміщень (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Наземна скануюча система Polaris TLS [17, с. 25]

Аналіз сучасного геодезичного обладнання чітко демонструє широкий спектр інновацій у галузі геодезії, що відбулися в XXI столітті. Технології, які

поєднують високоточні вимірювання, автоматизацію процесів і зручність використання, створюють умови для значного підвищення ефективності геодезичних робіт.

Особливу увагу варто звернути на інтеграцію геопросторових технологій з сучасними ІТ-рішеннями, що дозволяє обробляти величезні обсяги даних в реальному часі, працюючи з різними типами інформації, від аерофотознімків до 3D-сканування. Такі системи, як RIEGL miniVUX-1UAV, Polaris TLS або Focus3D X 330, відкривають нові можливості для виконання складних завдань, зокрема в архітектурі, сільському господарстві, лісовому господарстві, екології та інших сферах.

Перспективні геопросторові продукти допомагають вирішувати важливі завдання для різних галузей, від точних вимірювань на місцевості до інтеграції даних у геоінформаційні системи для їх подальшого використання в управлінні ресурсами, розробці проектів та моніторингу змін в навколишньому середовищі.

Вибір найбільш відповідних геопросторових продуктів залежить від конкретних завдань і вимог користувачів, що ставить високі вимоги до професіоналізму фахівців, які мають обирати оптимальні рішення для забезпечення точності, ефективності та надійності в процесі геодезичних робіт.

Висновки до розділу 1

Цифрові технології відіграють ключову роль у збереженні культурної спадщини, надаючи нові можливості для її документування, збереження, популяризації та дослідження. У сучасному картографуванні фотограмметричні методи займають ключове місце, оскільки дозволяють точно і швидко створювати карти та плани місцевості. Дані, отримані фотограмметричним методом, легко інтегруються в геоінформаційні системи (ГІС), де можуть бути проаналізовані, оновлені або поєднані з іншими просторовими даними.

РОЗДІЛ 2

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ АРХІТЕКТУРНИХ ПАМ'ЯТОК В УКРАЇНІ

2.1. Аналіз способів використання наземного лазерного сканування з метою збереження пам'яток архітектури

Архітектурні пам'ятки становлять невід'ємну частину культурної спадщини. Їх збереження та реставрація потребують проведення спеціалізованих робіт, основою яких є створення точного та детального фронтального плану будівлі. На сьогодні для цього існує багато методів, серед яких провідне місце займають технології лазерного сканування та цифрової фотозйомки.

Метод наземного лазерного сканування був використаний для створення TIN-поверхневої моделі комплексу печер Києво-Печерської Лаври, що є чудовим прикладом застосування цієї технології в складних умовах. Для цього використовували лазерну сканувальну систему Leica ScanStation, а обробка отриманих даних відбувалася в програмному комплексі «Cyclone 5.6». У важкодоступних місцях, таких як вузькі коридори та приміщення, застосовували електронний тахеометр Leica T1200 +400.

Перед початком сканування була створена знімальна мережа з визначенням координат опорних точок. Для забезпечення точності зв'язку між різними сканами використовувалися візирні марки Leica Geosystems HDS, що дозволяло координувати скани і контролювати перекриття між ними. Оскільки печери мають вузькі коридори та невеликі приміщення складної конфігурації, традиційні методи зйомки були б малоефективні, тому лазерне сканування стало ідеальним рішенням. Для скорочення часу зйомки та досягнення однакової точності при скануванні об'єктів на різних відстанях застосовувалися скрипти.

Незважаючи на складні атмосферні умови в печерах, такі як висока вологість і низька температура, для забезпечення нормальної роботи сканера

були вжиті додаткові заходи. Цей проект наочно демонструє, як лазерне сканування може ефективно використовуватись для точного документування складних архітектурних об'єктів, де інші методи зйомки були б менш результативними.

За допомогою лазерного сканування вдалося з високим рівнем деталізації відобразити інтер'єр печер, зокрема текстури, що дозволяє створити геоінформаційну систему комплексу печер. В подальшому це може стати основою для розробки 3D ГІС Києво-Печерської Лаври. Завдяки 100% покриттю печер методом лазерного сканування, проект набуває точніших даних, що дозволяють здійснити глибший економічний аналіз, а також оцінити альтернативні інженерні та економічні рішення, що можуть бути використані для планування наступних етапів проекту. Водночас, результати роботи показали, що за допомогою лазерного сканера важко отримати достатньо детальну інформацію щодо внутрішніх планувань та вмісту печер, таких як ніші чи ікони. Крім того, застосування електронного тахеометра у вузьких і низьких проходах печер викликає труднощі. Одним з можливих рішень цих проблем є паралельне використання цифрового стереофотограмметричного методу.

За допомогою лазерного сканування також було створено точкові моделі дерев'яних церков Львівської області, побудованих у XVI–XIX століттях. Тут особливу увагу було приділено зовнішнім та внутрішнім елементам будівель, що є характерними для архітектурного стилю історико-культурної спадщини. При виборі місць для сканування враховували освітленість приміщень, відсутність перешкод для видимості будівлі, а також взаємну видимість з іншими станціями. Результатом цієї роботи стала точкова модель церкви, де похибки «зшивки» сканів не перевищували 1-2 см, що забезпечило високу точність отриманих даних.

Для сканування сакральних споруд був використаний лазерний сканер FARO Laser Scanner Focus3D. Однак, «роздільна здатність його камери

виявилася недостатньою для детального відображення об'єкта знімання» [5, с. 32].

Р. Шульц запропонував методику розрахунку оптимальних параметрів сканування, яка «враховує важливі характеристики, такі як відстань до об'єкта, його геометричну форму та максимальний кут падіння лазерного променя. Застосування цієї методики дозволяє визначити кількість станцій сканування, відстань між ними та оптимальні параметри сканування залежно від об'єкта. Проте зазначено, що не враховано такий важливий фактор, як щільність точок на 1 м^2 , що може впливати на якість та швидкість виконання сканування» [27, с. 167].

Також використання набула технологічна схема цифрового знімання фасадів архітектурних пам'яток. Перед проведенням робіт розраховували точність координат точок на споруді з урахуванням експериментальних досліджень. Проблемою стало обмеження знімання на відстань більше 20 м, що вимагало додаткових рішень для нормального проведення зйомки. Важливою рекомендацією є співпраця з архітекторами під час польових робіт, що дозволяє зменшити час на їх виконання та підвищити точність результатів. Знімання здійснювалося за допомогою цифрової камери з об'єктивами з фокусною відстанню 18 мм для загальних зображень і 55 мм для деталізації елементів споруди. Для обмежень висоти будівель використовувалася телескопічна штанга для кріплення камери. Також акцентовано увагу на необхідності виконання вимірів за допомогою рулетки там, де це можливо, для подальшої обробки знімків та нанесення деталей на плані споруди. Використання методу фототріангуляції дозволило підвищити точність фасадних та інтер'єрних планів і спростило приведення планів до єдиної системи координат.

А. Шоломицький розглянув технологію застосування стереофотограмметричного методу. В цьому випадку «будувалася геодезична мережа, з точок якої створювалося знімальне обґрунтування для тахеометричного знімання. На кожній станції вимірювали контурні точки для складання топографічного плану. З цих точок знімали характерні точки фасадів,

які потім служили опорними для фотограмметричного знімання. Створення абрису фасаду здійснювалося на основі попередньо отриманих цифрових знімків об'єкта. Однак ця технологія вимагає великих витрат часу та коштів на тахеометричне знімання та громіздкого опрацювання результатів цифрового знімання» [25].

Р. Шульц також розглядає різні способи інтеграції даних фотограмметричного знімання та лазерного сканування. Автор розкриває «чотири основні комбінації цих методів, показуючи їх можливості при синтезуванні та створенні 3D моделей архітектурних споруд за допомогою цифрового фотознімання та лазерного сканування місцевості. Проте робота має комбінаторний характер і не дає чіткої відповіді щодо застосування конкретних процесів» [27, с. 168].

В. Глотов аналізував технологічну схему складання фронтальних планів архітектурних споруд за допомогою наземного цифрового знімання та лазерного сканування. Експериментальні дослідження виконувалися «для складання фронтального плану головного входу Палацу Потоцьких у Львові. Перед виконанням робіт автори обчислили апріорну оцінку точності отримання координат точок об'єкта. Технологія передбачала використання як наземного цифрового знімання, так і геодезичних робіт для порівняння методів. Для наземного знімання використовували цифрову камеру Canon EOS 350D, а для геодезичних робіт – лазерний сканер Scan Station 2. Для підвищення точності знімання фасадів споруди застосовували телескопічну штангу. За допомогою НЛС з множини точок обчислювали просторові координати опорних та контрольних точок у системі координат, що значно спростило обробку зображень. Камеральні роботи включали вибір опорних і контрольних точок та подальше опрацювання зображень на ЦФС Дельта-2. Зазначено, що при створенні фронтального плану необхідно звертати увагу на понищення споруди. Отримана точність визначення координат відповідає вимогам щодо точності обмірів архітектурних пам'яток» [6, с. 33].

Лазерне сканування, хоча й надає великий обсяг даних, не завжди забезпечує достатню кількість інформації про деталі споруди, що необхідно для створення точного фронтального плану об'єкта дослідження.

До інноваційних методів дослідження культурної спадщини можна віднести використання високоякісних цифрових зображень разом із автоматичними стереофотограмметричними методами. Важливим аспектом тут є «тріангуляція на основі лазерного сканування для заповнення мертвих зон та виконання геометричних порівнянь. Однак, незважаючи на високий рівень виконання робіт, проблеми виникають із роздільною здатністю зображень, що спричиняє неточності при автоматичному текстуруванні. Для покращення результатів можна виконувати цифрове знімання з постійної відстані для досягнення однорідної текстури» [36, с. 116].

На практиці також використовують високоточне відображення текстури 3D-моделі скульптури, де важливими аспектами є моделювання геометрії та текстур. Відновлення просторового положення камери при захопленні зображення дозволяє точно реєструвати текстуру на моделі лазерного сканування за допомогою нежорсткого перетворення. Це забезпечує точне вирівнювання текстури як на глобальному, так і на локальному рівнях.

Проте всі ці технології мають недоліки, зокрема трудомісткість у обробці даних, складність у відборі контрольних точок, а також потребу в висококваліфікованих спеціалістах. Велика затрата часу та ресурсів також є значним обмеженням для широкого використання цих методів.

Цікавою також є автоматична процедура для об'єднання фотограмметричних зображень і даних лазерних сканерів, що базується на використанні даних, збережених у точці середовища моделі. Цей метод «дозволяє вилучати точну інформацію для управління орієнтацією камери. Лазерні сканери Leica ScanStation HDS 3000 і Faro Laser Scanner Focus3D використовувалися для збору даних на відстані вибірки 2 см і 5 см відповідно. Для отримання цифрових зображень застосовувалася калібрована цифрова фотокамера NIKON D2X (12 Мрх) з об'єктивом 20 мм» [37, с. 230].

У роботі описано процес коригування спотворень зображень, зокрема врахування тільки зеленого каналу для досягнення подібної інтенсивності та зменшення відмінностей освітленості. Також була виконана зміна розмірів зображень для максимально наближення їх до землі. Однак, технологія була розроблена тільки для визначення точкових об'єктів, і її впровадження потребує значних апаратних і програмних засобів.

Незважаючи на високу ефективність цих методів, важливим аспектом є значна потреба в програмному та апаратному забезпеченні для їх реалізації. Технології потребують складних налаштувань та великих ресурсів для повної інтеграції і точності отриманих даних.

Ці дослідження підкреслюють важливість комбінованого використання різних методів для досягнення високої точності 3D-моделей, особливо коли йдеться про археологічні об'єкти, де точність і якість даних є критичними для реконструкції та збереження культурної спадщини.

Туристичний потенціал регіону можна оцінити за наявністю різноманітних пам'яток, які визначають привабливість як окремих населених пунктів, так і регіону загалом. Кількість та стан збереження пам'яток безпосередньо впливають на туристичну привабливість. Одним з основних факторів при плануванні туристичних маршрутів є висока якість збереження та захисту культурних об'єктів. Однак, поряд з постійними заходами охорони, важливим є питання оновлення існуючих та створення нових графічних матеріалів для проведення досліджень та відновлювальних робіт на пам'ятках. Наприклад, на території Львівщини розташовано «443 пам'ятки архітектури національного значення та 1193 пам'ятки місцевого значення, проте лише кілька з них мають актуальні графічні зариси. У порівнянні з архітектурними об'єктами, геологічні пам'ятки, яких в області близько 50, здебільшого не мають детальних графічних матеріалів» [11, с. 71].

Сучасні підходи до дослідження пам'яток, історичних процесів і моніторингу змін навколишнього середовища вимагають спеціальних методів збору даних. Наприклад, для геологічних досліджень важливим є точне

фіксування поточного стану поверхні з високою деталізацією, зокрема особливостей залягання порід та кольору. Використання традиційних геодезичних інструментів для створення векторних моделей поверхні може не дати бажаних результатів. Тому новітні технології, такі як тривимірне наземне лазерне сканування (НЛС), у поєднанні з супутниковим позиціонуванням і фотограмметрією, поступово витісняють класичні геодезичні методи у наукових і виробничих дослідженнях.

НЛС дозволяє точно зафіксувати просторове розташування об'єкта у вигляді хмари точок. Це є оптимальним методом для зйомки архітектурних, геологічних та деяких археологічних об'єктів, результати чого дозволяють створити цифрову модель відсканованого об'єкта. Маючи цифрову модель, можна представити об'єкт з різних ракурсів, проводити експерименти, необхідні для перевірки гіпотез або створення графічних матеріалів. Важливо, що ці дослідження можна здійснювати в камеральних умовах у будь-який час, без необхідності повторного виїзду на об'єкт для зйомки.

НЛС є єдиним методом, який «здатний на високій швидкості (сотні тисяч точок за секунду) визначати координати точок на поверхні об'єкта з точністю до кількох міліметрів, що дозволяє отримати модель з мінімальними спотвореннями. Ця технологія використовує спеціалізовані прилади – лазерні сканери, що вимірюють горизонтальні та вертикальні напрямки поширення лазерного променя та похилі відстані. Дані, отримані в результаті сканування, дозволяють повністю відтворити об'єкт у вигляді точкової 3D-моделі. Подальше створення моделі відбувається шляхом логічного визначення приналежності кожної точки або групи точок до певної поверхні, з подальшим створенням елементів цієї поверхні. Аналіз хмар точок спрощується завдяки кольоровому маркуванню кожної точки. Це здійснюється завдяки інтегрований чи зовнішній цифровій фотокамері лазерного сканера, яка поєднує дані вимірювань з отриманими зображеннями. Отримана точкова модель дозволяє здійснювати різноманітні вимірювання елементів об'єкта, служить основою для побудови 3D-моделі або звичайного плану чи перетину» [11, с. 71].

Для демонстрації результатів лазерного сканування було опрацьовано дані вимірювань дерев'яних церков: Собору Пресвятої Богородиці з дзвіницею у с. Матків Турківського району та церкви Воздвиження Чесного Хреста з дзвіницею у м. Дрогобич. Ці дані стали частиною масштабного проекту, що включав фіксацію пам'яток архітектури місцевого та національного значення – сканування дерев'яних церков Львівщини.

Процес створення 3D-моделі або 2D креслень включав кілька етапів. Спочатку було здійснено розміщення елементів реєстрації сканів на місцевості, що дозволило забезпечити точність вимірювань. Для цього використовувалися декілька станцій сканування, результати яких «зводились в одну координатну систему для отримання єдиної точкової моделі об'єкта. Для зшивання сканів застосовували плоскі марки та кулі діаметром 140 мм, розміщені таким чином, щоб на кожному скані було як мінімум 3 елементи реєстрації, які не змінювали своє положення під час процесу сканування» [11, с. 72].

Наступним етапом було координування опорних точок за допомогою GNSS-приймачів або тахеометра для визначення точного місцезнаходження точок в обраній координатній системі. Завершальним етапом було безпосереднє знімання місцевості за допомогою лазерного сканера, що вимірював територію з усіх необхідних точок, щоб забезпечити максимальне покриття і уникнути «мертвих» зон. Для кожної з церков було створено кілька станцій сканування, наприклад, для церкви в с. Матків було використано 12 станцій для інтер'єру церкви, 6 для дзвіниці та 16 для екстер'єру. У м. Дрогобич для інтер'єру церкви було 16 станцій, для дзвіниці - 1, а для екстер'єру - 22.

Камеральні роботи поділяються на дві основні частини: первинне та остаточне опрацювання. Первинне опрацювання включає всі етапи створення точної точкової моделі місцевості, що включає фільтрацію точок, зшивання сканів, переведення точкової моделі в необхідну систему координат, видалення зайвих вимірювань, коригування кольору об'єкта та інші операції. Остаточний етап полягає у створенні планів або 3D моделей на основі точкової моделі, що є

результатом попередніх етапів. У кінцевому підсумку отримані точкові виміри використовуються для подальших робіт.

Подальше опрацювання даних залежить від мети дослідження та формату, в якому повинні бути представлені дані. Це може бути план, перетин, фасад (ортогональні проекції), 3D модель споруди, рельєфу, інфраструктури місцевості чи її розвиток.

Для створення плану, перетину та фасаду церкви Собору Пресвятої Богородиці та дзвіниці в с. Матків було використано «програмне забезпечення Autodesk AutoCad. Завдяки послідовному використанню вибраних точок, що відтворюють форму споруди, було створено графічні матеріали, які можуть бути використані для проведення реставраційних робіт» [11, с. 72] (рис. 2.1).

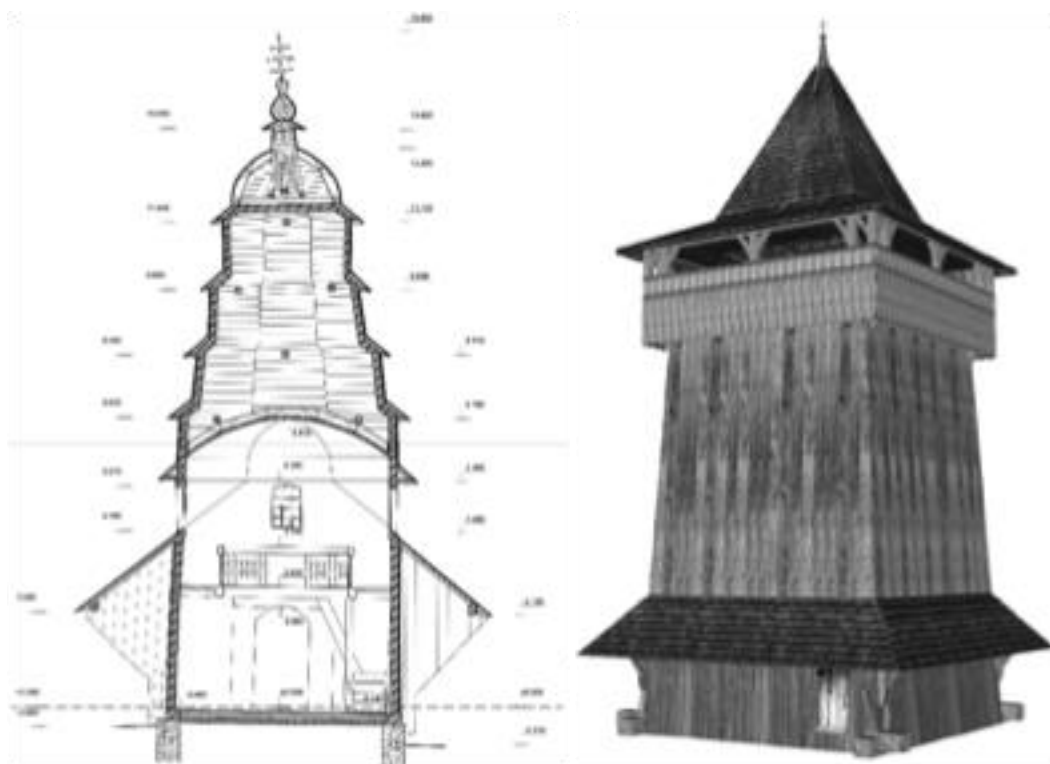


Рис. 2.1. Перетин храму та 3D модель дзвіниці [11, с. 73]

Для побудови 3D моделі церкви Воздвиження Чесного Хреста та дзвіниці в м. Дрогобич використовувалося «програмне забезпечення Autodesk AutoCad та Trimble SketchUp. Процес моделювання елементів церкви та прилеглої території включає виділення окремої області хмари точок, яка відображає

обраний елемент. Після цього виконується вписування у вибрані точки CAD-об'єкта певної форми» [11, с. 73].

Досвід, набутий під час вивчення пам'яток архітектури, може бути використаний для сканування природних об'єктів, таких як відслонення гірських порід і пам'ятки неживої природи.

2.2. Комп'ютерні методи створення цифрового архіву пам'яток архітектури за допомогою 3D-сканування

Процес створення архіву будівель передбачає лазерне сканування фасаду з кількох точок, після чого результати зшиваються. Такий підхід дозволяє відтворювати декоративні елементи фасадного декору, які мають історичну цінність, а також є важливим для реставраційних робіт, створення віртуальних музеїв і моніторингу зношеності об'єктів. Використання BIM-технологій в процесі створення архіву дає змогу отримати доступ до 3D-моделі будівлі одночасно для багатьох спеціалістів, таких як архітектори, конструктори та реставратори (рис. 2.2).

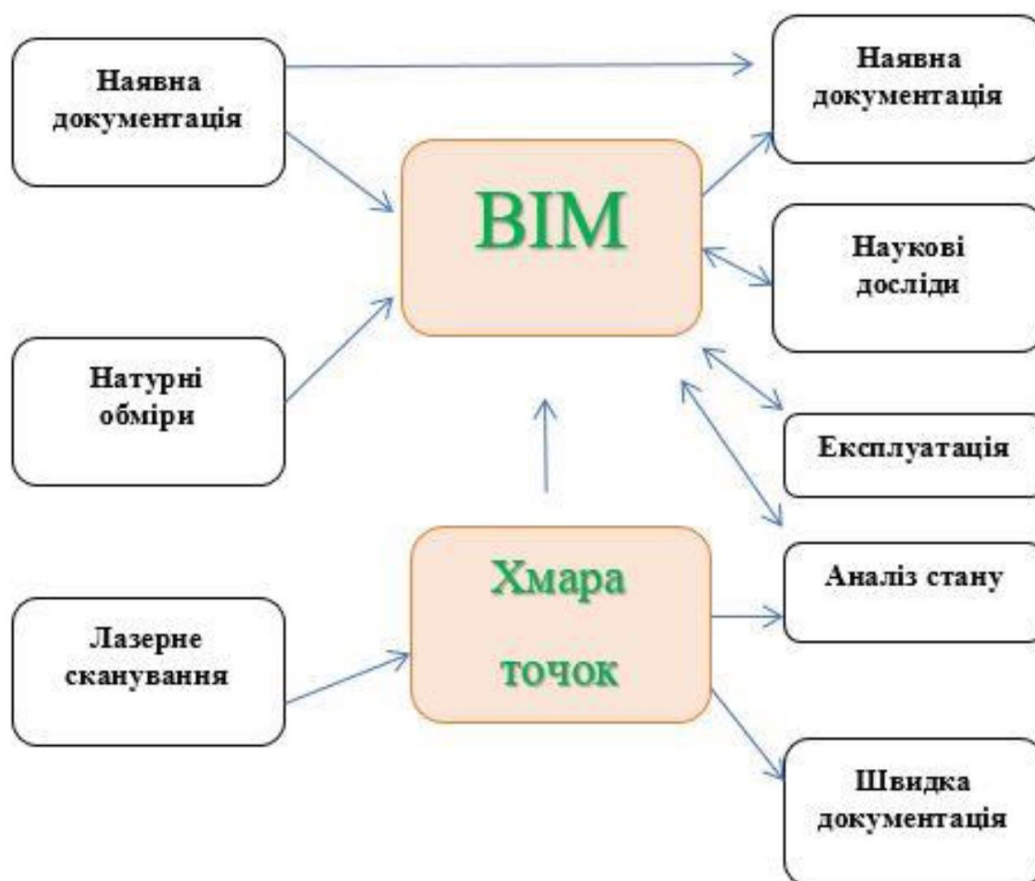


Рис. 2.2. Взаємодія BIM-технологій з об'ємним скануванням [12, с. 100]

Інколи інформаційне моделювання нерухомих об'єктів культурної спадщини описують як спрощений метод фіксації пам'яток. Однак насправді BIM забезпечує значно більші можливості. Інформаційна модель стає не тільки місцем зберігання відомостей про пам'ятник, а й важливим інструментом для проведення досліджень, навчання та просвітницької діяльності. Вона також є важливим інструментом для моніторингу стану об'єкта та його подальшого використання. Взаємодія BIM з хмарою точок, отриманою за допомогою лазерного сканування, відкриває нові можливості для збереження та відновлення пам'яток архітектури.

Сучасне інформаційне моделювання тісно пов'язане зі структурованим зберіганням і обробкою даних про об'єкти, що спрощує відновлення геометрії цих об'єктів. Однак, оскільки моделювання форми здійснюється вручну, цей процес не здатний повністю відновити всі особливості пам'яток архітектури, зокрема їх пошкодження. Технологія 3D-сканування є єдиним сучасним методом для отримання точних геометричних форм елементів фасадного декору. Однак хмара точок, хоча й передає точну інформацію, сама по собі не містить додаткових даних, тому є важливим елементом процесу моделювання.

Процес роботи можна поділити на кілька етапів:

1. Планування проєкту: визначення масштабу проєкту та території, а також розрахунок бюджету і графіку.
2. Доцільність об'єктів: вибір пам'ятки архітектури на основі її історичної та культурної важливості, дослідження правових аспектів, таких як авторські права і дозволи на фотографування.
3. Збір інформації: проведення 3D-сканування пам'ятки з різних ракурсів, розробка документації та цифровізація наявних креслень.
4. Цифрові ресурси: створення хмарного серверу для зберігання даних з можливістю доступу для сертифікованих осіб, таких як архітектори, інженери та реставратори.

5. Забезпечення доступу: надання відкритого доступу до архівів, створення інтерактивних карт та віртуальних турів.

6. Збір додаткової інформації: залучення спільноти та експертів для надання додаткових історичних даних чи особистих свідчень.

7. Захист і збереження: забезпечення довгострокового зберігання 3D-моделей та інформації через надійні цифрові архіви.

8. Продовження та оновлення: планування періодичних оновлень архіву.

9. Публічність і популяризація: рекламування архівів через соціальні мережі, виставки та інші культурні заходи.

10. Співпраця: пошук можливості співпраці з місцевими органами влади, університетами та музеями для підтримки проєкту.

Створення таких «3D-контейнерів» дозволить швидко оцінювати та відновлювати пошкоджені елементи фасадного декору. Цей метод збереження є не лише більш надійним, але й компактнішим. В поєднанні з BIM-технологіями він забезпечить безперешкодний доступ усім учасникам процесу відновлення та реставрації пам'яток архітектури.

Висновки до розділу 2

Наземне лазерне сканування є одним з найбільш точних і ефективних методів документування об'єктів архітектурної спадщини. Воно дозволяє швидко і з високою роздільною здатністю зафіксувати геометрію складних об'єктів без фізичного контакту. Це один із найнадійніших методів для збереження, аналізу і передачі архітектурної спадщини майбутнім поколінням. Воно забезпечує глибоке розуміння структури та дозволяє діяти на основі точних, об'єктивних даних.

В сучасних умовах також почали використовувати комп'ютерні методи створення цифрового архіву пам'яток архітектури за допомогою 3D-сканування. Це сукупність технологій, інструментів і програмних засобів, які дозволяють точно фіксувати геометричну форму, текстуру і стан об'єктів архітектурної спадщини для їхнього збереження, дослідження та популяризації.

РОЗДІЛ 3

АКТУАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ГЕОМОНІТОРИНГУ ЯК ФАКТОРУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Сучасний стан будівельної індустрії в країні визначається принципами ринкової економіки, що часто спричиняє прагнення до максимального прибутку шляхом скорочення витрат на деякі будівельні технології. Наразі нерідко ігноруються геодезичні спостереження за деформаціями основ і фундаментів споруд з метою економії бюджету. Це призводить до того, що осідання, зміщення та крени інженерних споруд виявляються лише тоді, коли наслідки вже значні. У цьому контексті системний геомоніторинг дає змогу своєчасно виявляти деформації та розробляти методичні рекомендації щодо підвищення стійкості будівель, що дозволяє вжити необхідних заходів для їх захисту у разі виявлення недопустимих деформацій.

Досвід геодезичного моніторингу свідчить про важливість ще на етапі проектування передбачити закладку пунктів геомоніторингової мережі. Варто приділити увагу питанням розташування геодезичних деформаційних марок, які мають бути внесені в ескізи фасадів будівель ще на стадії проектування. Це дозволить зберегти архітектурний вигляд та благоустрій території, не порушуючи зовнішнього оформлення споруд у процесі геодезичного моніторингу.

Серед основних причин виникнення деформацій можна виокремити недосконалість конструкцій фундаментів та споруд, а також вплив природних і антропогенних факторів. До природних умов належать геологічні умови, зміна рівня ґрунтових вод, вплив вітру, температури та сейсмічні явища. Антропогенний вплив проявляється через «механічні навантаження на споруди. Постійний тиск від ваги будівлі призводить до ущільнення ґрунтів під її основою, що, в свою чергу, спричиняє осідання споруди у вертикальній площині. Швидка зміна структури пористих і пухких ґрунтів може призвести до швидкої вертикальної деформації споруди, відомої як просідання» [2, с. 18].

Якщо ґрунти під основою будівлі ущільнюються нерівномірно, осідання також будуть нерівномірними, що може спричинити горизонтальні зміщення, перекоси, зсуви, прогинання і появу тріщин та розламів у споруді. Яскравим прикладом таких деформацій є Пізанська вежа в Італії, будівництво якої розпочалося в 1173 році і тривало 180 років. В умовах високого рівня ґрунтових вод та структурно нестійких ґрунтів (глини та дрібного піску) виникли проблеми з осіданням вежі, що стало основною причиною її нахилу. Хоча це явище стало відомим завдяки знаменитій вежі, диференціальні осідання можуть викликати серйозні проблеми і для менш високих споруд. Тому важливо знати потенційні причини таких деформацій, щоб вчасно усувати їх або хоча б зменшувати їхній вплив до прийняттого рівня.

1176 році, після завершення будівництва третього поверху Пізанської вежі, геодезичними спостереженнями було виявлено крен, спричинений ущільненням ґрунту під час будівництва. Це стало приводом для регулярних спостережень за станом вежі, які проводяться до сьогодні. Уже в 1911 році було зафіксовано, що швидкість осідань вежі становила 1,2 мм на рік.

Для стабілізації нахилу вежі в 1932 році було здійснено інженерні заходи: через 351 свердловину діаметром 50 мм було нагнітено близько 1 000 тонн цементного розчину в основу. Проте, навіть після цього зростання нахилу продовжувалося, становлячи близько 1 мм на рік упродовж останнього десятиліття минулого століття. Лише у 2002 році вдалося стабілізувати відхилення вежі шляхом вилучення ґрунту з її основи та проведення додаткових заходів для посилення фундаменту. Наразі нахил вершини вежі в південному напрямку складає 5,3 м від центру (див. рис. 3.1 б).

Таким чином, навіть незважаючи на обмеження технологій середньовіччя, геодезичні методи спостережень дозволили ще в XII столітті виявити крен вежі на етапі будівництва третього поверху та вжити необхідних заходів для запобігання подальших деформацій. Це стало важливим кроком у збереженні цієї архітектурної пам'ятки до наших часів.

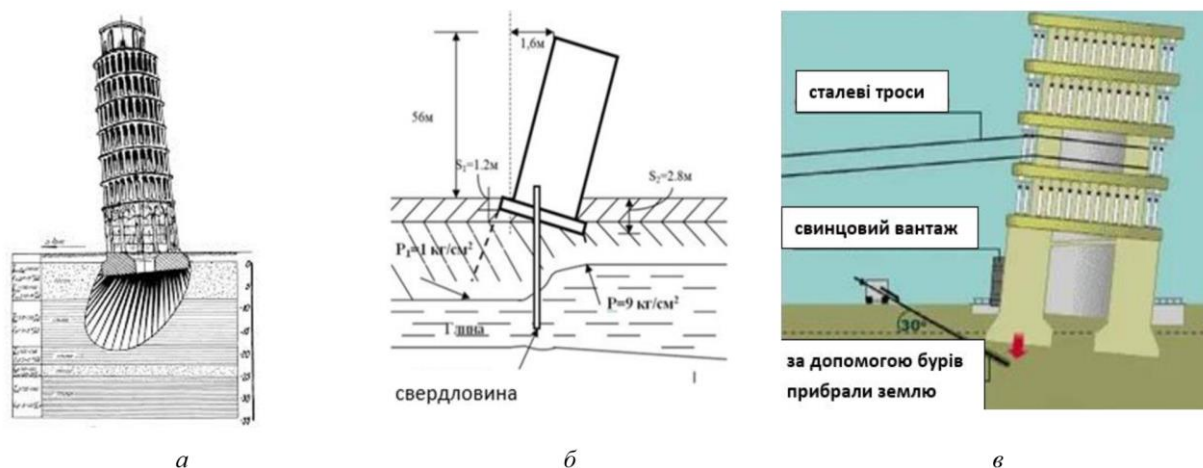


Рис. 3.1. Деформації Пізанської вежі: а – Пізанська вежа на ущільнених ґрунтах; б – нагнітання цементного розчину в 1932 р.; в – стабілізація деформацій у 2002 р. [2, с. 19]

Приклад впливу осідань поверхні на руйнування будівель у Чилі, викликаний техногенною діяльністю людини у XIX столітті, демонструє важливість геодезичного моніторингу для попередження катастроф. Інтенсивна підземна розробка родовищ мідної руди та вугілля в районах Коронель, Швагер і Лота проводилась навіть під містами та поселеннями. Це призвело до численних осідань поверхні, що, в свою чергу, викликало руйнування будівель. Цей випадок яскраво ілюструє наслідки відсутності своєчасного моніторингу та контролю за деформаціями, що могли б бути виявлені за допомогою геодезичних спостережень.

Сьогодні для своєчасного виявлення дефектів та деформацій стін, а також у деяких випадках дефектів будівель, активно використовується технологія 3D лазерного сканування. Це дозволяє отримати детальне уявлення про геометричні форми та параметри приміщень, що є важливим для подальшого планування, дизайну об'єктів і проведення ремонтних робіт. Лазерне сканування будівель і інших великогабаритних об'єктів є ефективним і точним методом отримання просторової інформації про їх характеристики. Цей метод також дозволяє створювати 2D- та 3D-моделі навколишнього простору, що

відкриває нові можливості для проектування та моніторингу стану будівель (рис. 3.2).



Рис. 3.2. 3D-зйомка будівлі (лазерне сканування) [28]

У процесі роботи лазерних сканерів створюється хмара точок із просторовими координатами, що в підсумку дає об'ємне зображення об'єкта. Отримана модель може містити від кількох тисяч до кількох мільйонів точок, при цьому вимірювання здійснюються з точністю до міліметра. Процес лазерного сканування включає кілька етапів:

Польові роботи передбачають:

- рекогносцировку місцевості;
- врахування перекриття хмар точок під час розмічувальних робіт;
- встановлення на місцевості обладнання та вимірювання координат станцій;
- процес сканування на станціях.

Камеральні роботи включають:

- завантаження даних сканування в програмне забезпечення;
- зшивання хмар точок та їх зрівноваження;
- експорт даних у програмні продукти системи автоматизованого проектування.

Е. Bertacchini наводить результати моніторингу середньовічних веж (Гірландіна, Делла Сагра, Асінеллі) в Італії, які внесені до списку культурної спадщини ЮНЕСКО. Для моніторингу веж важливим є визначення геометрії осей. Технологія наземного лазерного сканування для історичних пам'яток є корисним інструментом для встановлення геометрії структури, що дозволяє провести точний глобальний аналіз архітектури. Визначення тривимірної цифрової моделі є важливою базою даних, не лише для оцінки структурних особливостей веж, а й для планування реставраційних робіт.

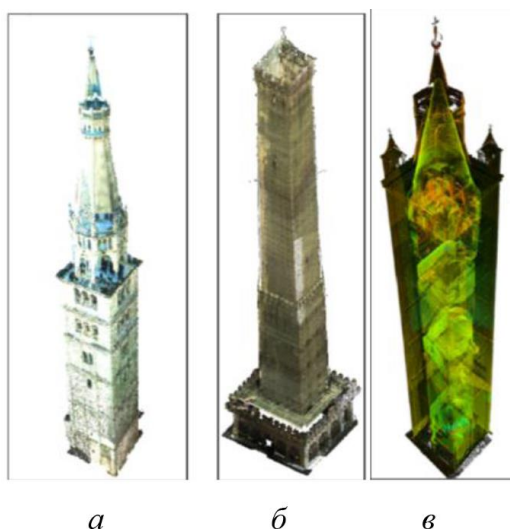


Рис. 3.3. Цифрові 3D-моделі веж: а – Гірландіна; б – Асінеллі; в – Делла Сагра [30]

Процес вирівнювання та реєстрації сканів для створення 3D-моделей веж проводився за допомогою кількох штучних маркерів, виділених у кожній хмарі точок. Для досягнення високої точності (до сантиметра) використовували світловідбивні мішені-цілі, які були встановлені як на самих вежах, так і на сусідніх будівлях. Це дозволяло забезпечити точну реєстрацію даних з різних позицій сканування.

Кожна сканувальна станція повинна була мати як мінімум три мішені, які також можна було б виявити з інших точок сканування для виконання вирівнювання. Для зменшення помилок і підвищення точності реєстрації використовували п'ять або шість мішеней з кожної станції.

Для покращення точності 3D-моделі використовували текстури фотографічних зображень високої роздільної здатності. Це дозволяло детально аналізувати характеристики поверхні та створювати фотореалістичні моделі, які можна використовувати в «віртуальній реальності».

Основною метою обстеження веж було:

- визначення фактичної висоти веж;
- визначення загального звису та максимального зміщення відносно вертикального напрямку;
- аналіз планово-альтиметричного тренду геометричного барицентра, пов'язаного зі зміною висоти.

Цей процес дозволяє не лише отримати точні дані про стан об'єкта, але й є першим важливим кроком для подальшого моніторингу та планування реставраційних робіт.

В. Глотов детально аналізує застосування технологій наземного лазерного сканування (НЛС) та цифрової зйомки для складання фронтальних планів будівель. Автор зазначає, що «використання цифрового стереофотограмметричного методу значно покращує детальність зйомки, зокрема у важкодоступних частинах будівлі та у зонах, які не можна охопити за допомогою стандартного лазерного сканування. Тахеометрична зйомка, в свою чергу, дозволяє визначити контрольні точки на об'єкті, що забезпечує точність і надійність зйомки» [6, с. 34].

Основною метою роботи є дослідження існуючих методів геомоніторингу за деформаціями будівель, особливо у щільно забудованих міських районах. Автор також порівнює різні методики та пропонує оптимальні рішення для їх ефективного використання. У публікації розглядаються стандарти, зокрема ДБН В.1.3-2:2010 [9], що регулюють комплекс робіт з геодезичного моніторингу.

Основні характеристики деформацій, які визначають під час моніторингу, включають:

- Осідання та зміщення основи та фундаментів.

- Перекоси та деформації конструкцій.
- Зміни в інженерних мережах.

Ці деформації мають важливе значення для контролю стану будівель та своєчасного виявлення можливих ризиків руйнувань чи зсувів (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Визначення деформацій будівель [2, с. 22]

Існує кілька методів геодезичного моніторингу деформацій будівель та споруд, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Один із найбільш точних методів – високоточне нівелювання, що дозволяє виявляти вертикальні деформації фундаментів. Лінійно-кутові вимірювання використовуються для фіксації осідань та деформацій різних типів споруд, таких як нахили чи зміщення частин будівель. GPS-вимірювання дозволяють стежити за зміщеннями точок на багатоповерхових спорудах у реальному часі. Наземне лазерне сканування є ефективним методом для виявлення кренів споруд та об'ємних деформацій фасадів, оскільки дає змогу створити точну тривимірну модель об'єкта для детального аналізу.

Інклінометрія застосовується для контролю горизонтальних зміщень, а датчики розкриття тріщин дозволяють здійснювати моніторинг тріщин у реальному часі, виявляючи деформації на ранніх етапах. Стереофотограмметричний метод дозволяє визначати деформації фасадів

будівель, використовуючи фотограмметричні зйомки для отримання координат точок об'єкта.

Геодезичні методи допомагають точно виявляти мікродеформації та зміщення з часом, даючи можливість оцінити загальний стан об'єкта. Сучасні цифрові фотограмметричні методи мають високу точність і дозволяють фіксувати положення точок на об'єкті в один момент часу, що дає змогу аналізувати взаємні деформації частин будівлі. Вони також є більш економічними та ефективними, особливо для обстеження великих об'єктів. Фотограмметричні методи можуть бути корисними для дослідження деформацій конструкцій під статичними та динамічними навантаженнями, оскільки отримані дані дозволяють порівнювати їх із проектними чи вихідними даними.

У наземній фотограмметрії для вивчення деформацій об'єктів можуть застосовуватись два методи: метод нульового базису, який полягає у вимірі одиночних знімків (фотометричний метод), та стереофотограмметричний метод, що базується на використанні стереопар для більш точного визначення деформацій. Застосування фотограмметрії має велику практичну цінність, зокрема для архітектурно-будівельних обмірів при реконструкції споруд. Традиційні методи обмірів потребують значних витрат часу та ресурсів, особливо при обстеженні складних об'єктів, коли необхідно встановлювати будівельні ґрунтування.

З розвитком технологій з'явилися комбіновані методи геомоніторингу, які включають поєднання тахеометричної зйомки, наземного лазерного сканування та цифрової наземної стереофотозйомки. Цей підхід дає змогу отримати об'ємну 3D-картину деформацій як фундаментів, так і стін будівель. Традиційними аналогами таких методів є нівелювання та планово-висотна зйомка, а прототипом – наземна стереофотозйомка.

Принцип роботи лазерного сканера схожий з роботою безвідбивачевого електронного тахеометра: «він вимірює час, за який лазерний промінь проходить від випромінювача до поверхні об'єкта і назад до приймача.

Результатом роботи сканера є масив точок — хмара точок лазерних відображень, що містить координати (x , y , z), інтенсивність відображення та реальний колір. Сканер складається з лазерного далекоміра, що працює на високій частоті, та блоку, який забезпечує розгортку лазерного променя. В електронних тахеометрах відстань вимірюється за різницею фаз між випущеним і відбитим променем (фазовий метод) або за часом проходження лазерного променя до відбивача і назад (імпульсний метод)» [2, с. 22].

Перевагою лазерного сканування є можливість виконання робіт при будь-якому освітленні, а також швидке отримання результатів польових вимірювань, а також зниження витрат на виконавчу та топографічну зйомку. Лазерне сканування дозволяє виявляти «мертві зони» ще на етапі польових робіт завдяки тривимірній візуалізації в реальному часі. Крім того, результати сканування у форматі 3D можуть використовуватися для вирішення інженерних завдань, а сам процес сканування об'єкта може бути здійснений з одного центру проектування. Лазерне сканування також забезпечує високу деталізацію та покращує якість результатів, а також гарантує безпеку при зйомці важкодоступних або небезпечних районів.

Сьогодні лазерне сканування застосовують у ряді сфер, зокрема «для створення тривимірних моделей складних інженерних споруд та технологічного обладнання, зйомки фасадів історичних будівель і пам'ятників для їх подальшої реконструкції, дорожньої зйомки та зйомки тунелів, а також у гірничодобувній промисловості. Це також корисний інструмент для моніторингу стану будівель і споруд, визначення обсягів земляних робіт або технологічних ємностей, а також для документування наслідків надзвичайних ситуацій» [2, с. 23].

Завдяки застосуванню сучасних геодезичних методів моніторингу разом із інноваційними технологіями, такими як електронні тахеометри, лазерні сканери та цифрові фотокамери, можна отримати об'ємну картину зрушень будівель та споруд, що дозволяє вчасно вживати заходи для боротьби з деформаціями та запобігання подальшому руйнуванню конструкцій.

Порівняльні характеристики існуючих методів моніторингу показують, що кожен із них має свої переваги та недоліки. Проте більшість дослідників віддають перевагу комбінованому методу, який базується на поєднанні трьох технологій: наземної цифрової зйомки, наземного лазерного сканування (НЛС) та тахеометрії. Таке поєднання дозволяє підвищити точність і читабельність 3D-моделей, а також усунути «мертві зони», які не може охопити лазерний сканер (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Порівняльна характеристика методів моніторингу будівель та споруд *

Назва методу	Вартість приладів	Вартість програмного забезпечення	Точність визначення	Переваги	Недоліки
Традиційний геодезичний	електронний тахеометр Leica TS07 5" R500; 644 689 грн	ПЗ Leica FlexField 28 050 грн	Кутів – 5" Відстаней $\pm (2.0 \text{ мм} + 2.0 \text{ ppm})$	Вартість	Час виконання зйомки, великий обсяг робіт
Цифровий фотографічний	цифрова камера Nikon D300S 17 546 грн	ПК «Digitals Professional/ Stereo/ Ortho» 14 850 грн	координат $m_x = m_z = m_p = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, кутів $m_\alpha = m_\omega = m_k = m_v = 3''$	Точність, можливість отримання 3D-моделі	Необхідне коригування спотворень зображень
Наземне лазерне сканування	лазерний сканер Leica BLK360 918 400 грн	ПЗ Leica Cyclone 700 088 грн.	від 5 мм до 5 см	Швидкість зйомки (від 15 с до 15 хв.)	Висока вартість обладнання, наявність «мертвих зон»

* Складено автором на основі [2, с. 23]

Для повного реєстрації будівлі рекомендується встановлювати марки на стіни і проводити вимірювання за допомогою тахеометра. Крім того, в процесі будівництва важливо закладати геодезичні пункти в споруду для моніторингової мережі, що дозволяє проводити подальший контроль за її станом без порушення архітектурного вигляду будівлі на етапі експлуатації.

Метод 3D-сканування є одним з найефективніших для отримання детальних даних про об'єкти будівництва, проте він є також і найбільш дорогим. Своєчасне виконання геомоніторингу будівель дозволяє виявити розвиток деформацій і застосувати відповідні технічні рішення для захисту

будівель. Отримана 3D-картина фасадів будівель дозволяє виявити всі недоліки чи переваги конструктивних елементів фасаду, надаючи точну і детальну інформацію про об'єкт, навіть до міліметрів. Висока кількість вимірів з малим кроком дозволяє отримати точні дані про вигини та інші дефекти.

Однак у міських умовах з обмеженою видимістю застосування цього методу може бути складним, а висока вартість обмежує його широке використання. У зв'язку з цим комбінування методів НЛС, цифрової стереофотограмметрії та тахеометрії дає низку переваг. Це забезпечує технологічну оперативність, високу інформативність і можливість створення тривимірних моделей. Поєднання цих методів дозволяє уникати «мертвих зон» в лазерних хмарах точок, виправляти похибки орієнтування та дисторсії цифрових зображень, покращує якість відображення текстури об'єкта і забезпечує надійне об'єднання сканів із різних точок стояння сканера.

Для фіксування контрольних точок на фасадах будівель, що підлягають моніторингу, часто використовують тахеометричний метод прив'язки з використанням високоточних електронних тахеометрів. Щоб уникнути псування архітектурного вигляду будівлі, рекомендується заздалегідь планувати розташування деформаційних марок для майбутньої геомоніторингової мережі, особливо у випадку висотних будівель, таких як вежі. Для цього необхідно використовувати відповідне обладнання, наприклад підйомники, або залучати спеціалістів, зокрема альпіністів.

Важливо також підвищити контроль за дотриманням вимог нормативних документів із організації геомоніторингу та раціонально обирати економічно обґрунтовану технологію для його проведення. У великих містах з різною щільністю забудови та багатими архітектурними ансамблями необхідно мати надійну геодезичну основу. Це можна забезпечити шляхом регулярного моніторингу існуючої міської геодезичної мережі.

Висновки до розділу 3

У зв'язку з інтенсифікацією урбанізації, змінами клімату та зростанням навантаження на інженерні споруди, значення систем геомоніторингу стрімко зростає. Геомоніторинг дозволяє своєчасно виявляти деформації, зміщення та інші потенційно небезпечні зміни у навколишньому середовищі, що впливають на стійкість і безпеку будівель і споруд. Актуалізація технологій геомоніторингу є ключовим напрямом підвищення безпеки сучасного будівництва та експлуатації об'єктів. Їх впровадження сприяє зниженню ризиків, забезпечує довготривалу стабільність споруд і підвищує ефективність управління інфраструктурними об'єктами.

ВИСНОВКИ

У контексті цифрової трансформації суспільства, нові технології відіграють вирішальну роль у документуванні, збереженні та популяризації об'єктів культурної спадщини. Культурна спадщина – це не лише пам'ятки архітектури чи мистецтва, а й матеріальні та нематеріальні елементи, що формують національну ідентичність. Загрозами об'єктам культурної спадщини є час, війна, зміни клімату, урбанізація тощо. У цьому контексті цифрові технології стають інструментом порятунку і відновлення. Вони не замінюють автентичну культурну спадщину, але створюють нові можливості для її збереження, вивчення та популяризації. Їх застосування стає ключовим інструментом у боротьбі з викликами часу, і вони мають бути інтегровані в державну політику з охорони культурної спадщини.

Ключовим напрямком сучасної геодезії, дистанційного зондування Землі та картографії є використання фотограмметричних технологій зйомки ситуації і рельєфу для створення карт та планів. Фотограмметрія дозволяє отримати високоточні просторові дані з фотографічних зображень, що особливо актуально в умовах цифрової трансформації геоінформаційних систем. Застосовується для топографічних зйомок, оновлення карт, інженерних вишукувань та аналізу територій. Сучасні безпілотні технології (БПЛА) зробили її доступнішою та ефективнішою. Вони знижують витрати на польові роботи, підвищують точність та оперативність.

Для створення моделей архітектурних об'єктів використовують сучасні технології в галузі архітектурної фіксації, реставрації, BIM-проєктування та цифрової спадщини, зокрема, 3D-сканування. Це ключова технологія для високоточної цифрової фіксації геометрії архітектурних об'єктів. Воно дозволяє створювати тривимірні моделі будівель, фасадів, історичних пам'яток, що використовуються у реставрації, плануванні, віртуальних турах та інженерному аналізі. До основних методів 3D-сканування належать лазерне сканування

(LiDAR, TLS), фотограмметрія та поєднання LiDAR і фотограмметрії для отримання точності LiDAR і текстур фотограмметрії.

3D-сканування стало невід'ємною частиною сучасної архітектурної практики. Завдяки різноманітним методам і засобам сканування можливо швидко та точно фіксувати існуючі об'єкти, зберігати культурну спадщину в цифровій формі, ефективно інтегрувати моделі у BIM-середовище та реалізовувати принципи сталого управління архітектурними ресурсами.

Наземне лазерне сканування є інноваційною технологією, яка дозволяє з високою точністю фіксувати геометричні характеристики об'єктів культурної спадщини. В умовах руйнування старовинних будівель через час, погодні умови, війну чи людську недбалість, 3D-сканування виступає засобом довготривалого збереження та відтворення архітектурних форм. Воно дозволяє не лише зберегти в цифровому вигляді те, що може бути втраченим, але й активно сприяє реставрації, реконструкції та популяризації культурних об'єктів. Технологія поєднує в собі інженерну точність, наукову достовірність та культурну цінність.

На практиці також почали використовувати комп'ютерні методи створення цифрового архіву пам'яток архітектури за допомогою 3D-сканування. Це сукупність технологій, інструментів і програмних засобів, які дозволяють точно фіксувати геометричну форму, текстуру і стан об'єктів архітектурної спадщини для їхнього збереження, дослідження та популяризації.

У сучасних умовах стрімкого розвитку урбаністичного середовища, зростання навантаження на інженерні конструкції, а також впливу кліматичних, антропогенних та геологічних чинників, особливого значення набуває геомоніторинг. Це система регулярного спостереження за змінами навколишнього середовища, які можуть впливати на стабільність та безпечну експлуатацію будівель і споруд. Сучасні технології роблять його більш доступним, точним і масштабованим. У майбутньому впровадження цифрових геомоніторингових систем стане обов'язковим елементом для всіх складних та відповідальних об'єктів інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антоненкова А. В., Ішутіна Г. С., Бегічев С. В. Створення геодинамічного полігону на території м. Дніпро на базі існуючих пунктів полігонометрії. *Молодь: наука та інновації* : зб. матер. X Міжнар. наук. - техн. конф. студ., аспір. та мол. вч. Дніпро : НТУ «ДП», 2022. С. 137-138.
2. Бегічев С. В., Ішутіна Г. С. Актуалізація технологій геомоніторингу як фактора забезпечення безпечної експлуатації будівель і споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 4. С. 17-26.
3. Вовк А., Глотов В., Гуніна А., Маліцький А., Третяк К., Церклевич А. Аналіз результатів для створення ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу із за- стосуванням БПЛА TRIMBLE UX-5. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2015. Вип. 81. С. 90-103.
4. Войтенко С. П. Інженерна геодезія : підручник. Київ : Знання, 2009. 557 с.
5. Глотов В., Дубик Ю., Чижевський В. Аналіз технології створення фронтальних та інтер'єрних планів при проектуванні реставраційних робіт архітектурних пам'яток. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2007. Вип. 68. С. 17-18.
6. Глотов В., Марусаж Х. Аналіз методів створення фронтальних планів лазерним наземним скануванням та цифровим зніманням. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2013. Вип. 78,. С. 30-37.
7. Глотов В.М., Смолій К.Б. Дослідження технології складання фронтальних планів архітектурних споруд наземним цифровим зніманням і лазерним скануванням. *Геодезія, картографія і аерофото знімання*. 2008. Вип. 70. С. 46-50.
8. Гордюк І. В., Костюченко О. А., Хлюпин О. А. Інноваційні технології створення макетів в архітектурному проєктуванні. Science and society. Proceedings of the 12th International conference. Accent Graphics Communications & Publishing. Hamilton, Canada. 2019. P. 12–17.

9. ДБН В.1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_1_3_2_2010_geodezichni_roboti_u_budivnictvi/1-1-0-787
10. Диваков В. В., Москалькова Ю. Г. Застосування фотограметрії в обстеженні будівель і споруд. *Проблеми інтегрованого розвитку міст*: зб. тез доп. міжн. наук.-практ. конф. уч. та студ. Луцьк: ЛНТУ-КНУБА, 2020. С. 32-36.
11. Маліцький А., Голубінка Ю., Бубняк І., Бубняк А. Використання наземного лазерного сканування для збереження пам'ятки архітектури та геології. *Культурна спадщина нафтової столиці Передкарпаття*. 2017. С. 71-73.
12. Нещадим В. О. Комп'ютерні методи створення цифрового архіву пам'яток архітектури за допомогою 3D-сканування. *Теорія та практика дизайну*. 2023. Вип. 29-30. С. 98-104.
13. Нещадим В. О., Гордюк І. В. Методика розроблення архітектурних макетів у будівельній сфері на прикладі макету адміністративних будівель Софії, Болгарія. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2018. Вип. 50. С. 346-353.
14. Нещадим В. О., Дорошенко Ю. О. Лазерне сканування рельєфних поверхонь як розвиток фотограметричних методів. *Політ. Сучасні проблеми науки*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 5–9 квітня 2021 р.
15. Нещадим В. О., Дорошенко Ю. О. Пропозиційна класифікація елементів фасадного оздоблення будівель за їх об'ємним скануванням. *Теорія та практика дизайну* : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 11 березня 2019 р. С. 116–117.
16. Нещадим В. О., Нікольчук Б. С. Принципи роботи з хмарою точок у середовищі Revit. *Сучасні проблеми геометричного моделювання*: XXIII Міжнародна науково-практична конференція, м. Мелітополь, 1–4 червня 2021 р. С. 125-133.

17. Ничвид М. Р. Зміна технологій: найперспективніші продукти, рішення та послуги. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2017. Вип. II (34). С. 20-28.
18. Ничвид М., Проданець І. Цифрові технології в допомогу збереження культурної спадщини для майбутніх поколінь. *Досвід ревіталізації і промоції історико-культурної спадщини* : збірник статей міжнародної наукової конференції. 28 лютого 2019 року. Луцьк: Надстир'я, 2019. С. 108-118.
19. Принцип лазерного сканування. URL: https://ngc.com.ua/ua/info/whats_hds.html
20. Романишин І., Маліцький А., Лозинський В. Класифікація та основні характеристики наземних 3D-сканерів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2012. Вип. II(24).
21. Руднєва І. Застосування лазерного сканування для моніторингу стану будівель та споруд при реконструкції. *Трансфер інноваційних технологій*. 2021. Вип. 4(1). С. 33-36.
22. Толстохатко В. А., Пеньков В. О. Конспект лекцій з курсу «Фотограмметрія та дистанційне зондування». Модуль 1: «Фотограмметрія». Харків: ХНУМГ, 2013. 91 с.
23. Третяк К., Голубінка Ю., Маліцький А., Яхторович Р. Досвід виконання наземного лазерного сканування для створення точкових моделей дерев'яних церков. *Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS-технології* : збірник матеріалів XVII Міжнародного науково-технічного симпозіуму (АР Крим, м. Алушта), 2012. С. 39-42.
24. Шевня М. С. Використання безпілотних літальних апаратів для отримання матеріалів дистанційного зондування Землі. *Геодезія і картографія*. 2013. № 1. С. 4-50.
25. Шоломицький А., Луньов А., Сірих О., Тарасова О. Геодезичне забезпечення реконструкції та будування. *Вісник Львівського*

національного аграрного університету. Сер.: Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2011. № 12.

26. Шульц Р. В. Аналіз можливостей наземного лазерного сканування та сучасної наземної фотограмметрії. *Містобудування та територіальне планування*. 2010. Вип. 37. С. 607 - 612.
27. Шульц Р. Розрахунок параметрів наземного лазерного сканування. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2010. Вип. I (19). С. 166-169.
28. 3D зйомка будівлі (лазерне сканування). URL: <http://geodet.com.ua/services/3d-ziomka-lazerne-skanuvannya/>
29. AERO3D engineering. URL: <https://aero3d.ua>
30. Bertacchini Eleonora, Bohi Emanuele, Cappa Alessandro, Castagnetti Cristina, Dubbini Marco. Terrestrial Laser Scanner for Surveying and Monitoring Middle Age Towers. *FIG Congress*. 2010. Facing the Challenges. Building the Capacity Sydney, Australia, 2010. P. 1-13.
31. CUES. URL: <https://cuesinc.com/>
32. D'Urso M. G., Russob G. On the integrated use of laser-scanning and digital photogrammetry applied to an archaeological site. *The international archives of the remote sensing and spatial information sciences*. XXXVII congress ISPRS. Beijing, 2008. P. 1107-1113.
33. DigitalGlobe Atmospheric Compensation. URL: <http://explore.digitalglobe.com/AComp>
34. FARO Focus URL: <http://www.faro.com/products/3d-surveying/laser-scanner-faro-focus-3d/overview>
35. Grussenmeyer P., Landes T., Voegtle T., Ringle K. Comparison Methods of Terrestrial Laser Scanning, Photogrammetry and Tacheometry Data for Recording of Cultural Heritage Buildings. *The international archives of the remote sensing and spatial information sciences*. XXXVII congress ISPRS. Beijing, 2008. P. 337-340.

36. Menna F., Rizzi A., Nocerino E., Remondino F., Gruen A. High resolution 3d modelling of the beheim globe. *The international archives of the remote sensing and spatial information sciences*. XXXIX congress ISPRS. Melbourne, 2012. P. 115-120.
37. Moussa W., AbdelWahab M., Fritsch D. An automatic procedure for combining digital images and laser scanner data. *The international archives of the remote sensing and spatial information sciences*. XXXIX congress ISPRS. Melbourne, 2012. P. 229-234.
38. Wu C., Yuan Y., Tang Y., Tian B. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture. *Engineering and Construction (AEC) Industry. Sensors*. 2022. Vol. 22(1). pp. 265. URL: <https://doi.org/10.3390/s22010265>
39. Xi W., Lu W. G. Formation mechanism of an adherent vortex in the side pump sump of a pumping station. *International Journal of Simulation Modelling*. 2021. Vol. 20. Is. 2. pp. 327-338. URL: <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-2-562>
40. Y. H. Jo, J. Y. Kim Three-dimensional digital documentation of heritage sites using terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. Vol. XLII-2/W5.