

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АХІТЕКТУРИ**  
Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

Використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження  
об'єктів культурної спадщини

Теребейчик Катерина Іванівна

Київ – 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

проф., д.т.н. Карпінський Ю.О.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

**Використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження  
об'єктів культурної спадщини**

Виконала студентка групи ГСТм-23  
193 «Геодезія та землеустрій»

(спеціальність)

Геоінформаційні системи і технології  
(спеціалізація)

Теребейчик Катерина Іванівна  
(ПІБ)

Керівник: Нестеренко О.В., доц., к.т.н.  
*Ідентичність підтверджую*

Київ 2024 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Декан факультету

\_\_\_\_\_доцент., к.т.н. Нестеренко О. В.  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ**  
**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТЬНОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Теребейчик Катерини Іванівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** «Використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження об'єктів культурної спадщини»

затверджена наказом ректора КНУБА № \_\_\_\_\_ від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 року

**2. Керівник роботи** доц., к.т.н. Нестеренко Олена Вікторівна  
( прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**3. Строк подання студентом роботи до захисту:** 19 грудня 2024 р.

**4. Зміст пояснювальної записки за розділами:**

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОГРАМЕТРІЇ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ФОТОГРАМЕТРІЇ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

ВИСНОВОК

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

**5. Графічний матеріал за розділами**

Розділ 1:

Розділ 2: Приклад наземної фотограмметрії для документування архітектурної пам'ятки, Хмара точок тривимірної моделі, створена за допомогою наземної фотограмметрії для реставраційних робіт.

Розділ 3: Створення тривимірної моделі мозаїки: від фотографій до 3D-реконструкції мозаїки-панно "Вітер, Відновлена цифрова модель мозаїки для збереження та реставрації, Етапи аналізу моделі для реставрації, Використання моделі для збереження та реставрації, "Візуалізація точності фотограметричної моделі на етапах зйомки та обробки", "Етапи оптимізації фотограмметричного процесу для різних типів об'єктів".

Розділ 4: Вплив умов освітлення на точність фотограмметричної зйомки, Результати калібрування для різних масштабів об'єктів, Час зйомки залежно від площі мозаїки, Порівняння точності фотограмметричних моделей для різних рівнів роздільної здатності, Етапи обробки фотограмметричних даних для створення 3D-моделей мозаїк, Дві технічні ілюстрації, які відображають процеси створення 3D моделей за допомогою фотограмметрії.

**6. Календарний план виконання роботи:**

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту
ВСТУП Розділ 1. Аналіз предметної сфери та нормативної бази 1.1. Визначення культурної спадщини та нормативно-правова база. 1.2. Опис основних методів збереження культурної спадщини, їх регулювання. 1.3. Закордонний досвід збереження культурної спадщини. 1.4. Реалізовані проекти із застосуванням фотограмметрії.	03.10.2024
Розділ 2. Теоретичний огляд методів цифрової культурної спадщини 2.1 Огляд методів цифровізації об'єктів культурної спадщини 2.2. Порівняння методів за вартістю, швидкістю обробки та доступом до обладнання 2.3. Наземна фотограмметрія: переваги, види та правила застосування 2.4. Порівняння наземної фотограмметрії з іншими методами: висновки та обґрунтування вибору	28.10.2024
РОЗДІЛ 3. Практичне застосування фотограмметрії для цифрового збереження об'єктів культурної спадщини 3.1. Вибір об'єкта для фотограмметричного дослідження. 3.2. Опис методики зйомки та обробки фотограмметричних даних. 3.3. Створення тривимірної моделі об'єкта: етапи та програмне забезпечення. 3.4. Аналіз отриманої моделі та її використання для збереження і реставрації. 3.5. Практичні рекомендації щодо використання фотограмметрії для майбутніх проектів.	18.11.2024
РОЗДІЛ 4. Практичне впровадження фотограмметрії для збереження культурної спадщини 4.1. Підготовка до зйомки та масштабування об'єктів 4.2. Проведення польових робіт: зйомка та збір даних 4.3. Обробка фотограмметричних даних: етапи створення моделей 4.4. Валідація створених моделей 4.5. Інтеграція тривимірної моделі в документообіг культурної спадщини Висновок	18.11.2024
Складання резюме та остаточне оформлення роботи	25.11.2024
Подання роботи на перевірку на плагіат	25.11.2024
Подання роботи на рецензування	
Попередній захист роботи на кафедрі	

## 7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			
Розділ 4.	<b>Яровий А.В.</b>		

8. Дата видачі завдання \_ 09 серпня 2024 р.

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ Карпінський Ю.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_ Нестеренко О.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Студент \_\_\_\_\_ Терейчик К.І.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## Зміст

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1.....	12
АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ.....	12
1.1 Визначення культурної спадщини та нормативно-правова база.....	12
1.2 Опис основних методів збереження культурної спадщини, їх регулювання.....	18
1.3 Закордонний досвід збереження культурної спадщини.....	27
1.4 Реалізовані проєкти із застосуванням фотограмметрії.....	31
Висновок до розділу 1.....	39
РОЗДІЛ 2.....	42
ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ.....	42
2.1 Огляд методів цифровізації об'єктів культурної спадщини.....	42
2.2 Порівняння методів за вартістю, швидкістю обробки та доступом до обладнання.....	45
2.3 Наземна фотограмметрія: переваги, види та правила застосування.....	51
2.4 Порівняння наземної фотограмметрії з іншими методами: висновки та обґрунтування вибору.....	60
Висновок до розділу 2.....	66
РОЗДІЛ 3.....	69
ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОГРАММЕТРІЇ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	69
3.1 Вибір об'єкта для фотограмметричного дослідження.....	69
3.2 Опис методики зйомки та обробки фотограмметричних даних.....	72
3.3 Створення тривимірної моделі об'єкта: етапи та програмне забезпечення... ..	76
3.4 Аналіз отриманої моделі та її використання для збереження і реставрації... ..	80
3.5 Практичні рекомендації щодо використання фотограмметрії для майбутніх проєктів.....	83
Висновок до розділу 3.....	85
РОЗДІЛ 4.....	89
ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ФОТОГРАММЕТРІЇ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ.....	89
4.1 Підготовка до зйомки та масштабування об'єктів.....	89
4.2 Проведення польових робіт: зйомка та збір даних.....	93
4.3 Обробка фотограмметричних даних: етапи створення моделей.....	99
4.4 Валідація створених моделей.....	102
Висновок до розділу 4.....	111

ВИСНОВОК .....	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	115
Додаток А. ....	122
Додаток Б. ....	123
Додаток В. ....	124
Додаток Г. ....	125
Додаток Д. ....	126
Додаток Е. ....	128

## ВСТУП

Культурна спадщина є невід'ємною частиною історичної пам'яті та ідентичності будь-якого народу. Вона несе в собі духовні, культурні та матеріальні цінності, що формують основу соціального і культурного розвитку суспільства. Однак з кожним роком дедалі більше об'єктів культурної спадщини знаходяться під загрозою через різні фактори, зокрема, природні катастрофи, антропогенні дії, а також банальне старіння матеріалів. Для забезпечення збереження цих об'єктів у майбутньому все частіше використовуються новітні технології, зокрема цифрові методи, такі як фотограмметрія.

Тема використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження об'єктів культурної спадщини є актуальною, оскільки вона відповідає сучасним тенденціям у сфері збереження пам'яток та інноваційних технологій. Фотограмметрія дозволяє створювати високоточні тривимірні моделі культурних об'єктів, що не лише зберігає їх в цифровому вигляді, але й надає можливість використовувати ці моделі для відновлення, реставрації або навіть популяризації спадщини серед широкої аудиторії через віртуальні тури та інші інтерактивні ресурси.

Об'єкти культурної спадщини, такі як мозаїки, архітектурні споруди, археологічні пам'ятки, часто є надзвичайно складними для збереження через свою фізичну крихкість або географічну доступність. Наземна фотограмметрія, завдяки своїй точності та деталізації, стає одним із ключових інструментів у вирішенні цих проблем. Вона дозволяє зберігати кожен деталь об'єкта у цифровому форматі, створюючи тим самим повну копію об'єкта, що може бути використана в майбутньому для його реконструкції або дослідження.

### **Зв'язок з сучасними дослідженнями**

У світовій практиці використання фотограмметрії для збереження культурної спадщини стає все більш популярним завдяки її точності та ефективності. У країнах Західної Європи та Північної Америки вже реалізовано

численні проекти, спрямовані на цифрове збереження історичних пам'яток за допомогою фотограмметрії. Успішні приклади використання цієї технології спостерігаються в Італії, де фотограмметрія була використана для збереження таких визначних пам'яток, як Колізей та Пантеон. Також у Німеччині проводяться проекти, спрямовані на відтворення архітектурних пам'яток, зруйнованих під час Другої світової війни. Окрім цього, активно використовується фотограмметрія у збереженні археологічних об'єктів, що дозволяє створювати цифрові архіви, доступні для дослідників з усього світу.

В Україні, враховуючи багату культурну спадщину, ця технологія може мати велике значення. Проекти з цифрового збереження мозаїк Софійського собору та Києво-Печерської лаври вже демонструють перші успіхи в цій сфері. Використання фотограмметрії дозволяє забезпечити точність і високу якість документування об'єктів, що відкриває нові перспективи для дослідників та консерваторів у сфері збереження культурної спадщини.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою даної дипломної роботи є дослідження можливостей використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження об'єктів культурної спадщини на прикладі мозаїк та архітектурних об'єктів. Завдяки використанню фотограмметричних методів можна не лише документувати, але й забезпечити збереження об'єктів культурної спадщини в цифровому форматі, що надає можливість більш ефективно зберігати, відновлювати та популяризувати їх.

Для досягнення мети було поставлено та виконано наступні задачі:

1. Проаналізувати існуючу нормативно-правову базу щодо охорони та збереження об'єктів культурної спадщини в Україні та на міжнародному рівні.
2. Дослідити сучасні методи збереження об'єктів культурної спадщини, зокрема ті, що використовуються в цифрових технологіях.

3. Провести практичну реалізацію фотограмметричного дослідження прикладі мозаїчних зображень.
4. Оцінити ефективність наземної фотограмметрії як одного з методів цифрового збереження культурних об'єктів.
5. Розробити рекомендації щодо використання фотограмметрії у майбутніх проєктах збереження об'єктів культурної спадщини.

Очікуваним результатом роботи є підтвердження ефективності використання наземної фотограмметрії для збереження культурних об'єктів, а також створення високоякісних цифрових моделей, що можуть бути використані як для реставраційних робіт, так і для наукових досліджень.

Таким чином, дана робота не тільки розкриває актуальність використання цифрових технологій у збереженні культурної спадщини, але й має практичну цінність для подальшого розвитку цієї галузі в Україні.

**Розділ 1**  
**АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ**

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Виконала		Теребейчик К.І.			Використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження об'єктів культурної спадщини	Літ.	Арк.	Аркушів
.							11	128
Керівник		Нестеренко О.В.				КНУБА, ГІСУТ, група ГСТМ-23		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О.						

## РОЗДІЛ 1.

### АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

#### 1.1 Визначення культурної спадщини та нормативно-правова база.

Культурна спадщина є важливою складовою ідентичності націй і народів, тому збереження та охорона цих об'єктів є пріоритетом для багатьох держав і міжнародних організацій. Поняття культурної спадщини охоплює матеріальні та нематеріальні об'єкти, що мають історичне, археологічне, мистецьке, архітектурне або культурне значення. Це включає історичні пам'ятки, археологічні місця, будівлі, мистецькі твори, релігійні місця, мозаїки та інші об'єкти.

Законодавство України забезпечує правову базу для збереження та охорони об'єктів культурної спадщини. Основним законодавчим актом, який регулює питання охорони культурної спадщини в Україні, є Закон України «Про охорону культурної спадщини». Цей закон встановлює загальні принципи охорони культурної спадщини, визначає категорії об'єктів спадщини та передбачає відповідальність за порушення вимог щодо охорони. "І. Іванов підтверджує, що фотограмметрія є однією з найбільш ефективних технологій для цифрового збереження культурних об'єктів, оскільки забезпечує точність та детальність зображення" [1].

Відповідно до Закону України «Про охорону культурної спадщини» ([НВ1]: Закон України «Про охорону культурної спадщини», посилання: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14>), культурна спадщина визначається як сукупність пам'яток історії, культури, архітектури, археології, мистецтва та природного середовища, що мають особливу історичну, культурну або наукову цінність для суспільства. Охорона культурної спадщини здійснюється як на національному рівні, так і за підтримки міжнародних організацій, таких як ЮНЕСКО. ЮНЕСКО, одна з ключових організацій, що займається питаннями збереження культурної спадщини на міжнародному рівні, прийняла кілька конвенцій, які зобов'язують країни-учасниці захищати свої культурні об'єкти. Найважливішою серед цих документів є Конвенція про охорону всесвітньої

культурної та природної спадщини, прийнята у 1972 році [2].

До них належать Міністерство культури України, яке координує зусилля з охорони пам'яток, а також Національний інститут культурної спадщини, який виконує функції наукового консультування та моніторингу об'єктів спадщини. Важливим аспектом охорони культурної спадщини є документування та цифрове збереження об'єктів. Одним з найсучасніших методів є фотограмметрія, що дозволяє створювати високоточні цифрові копії пам'яток. Це особливо актуально для об'єктів, що піддаються ризику руйнування через природні або антропогенні фактори, включаючи військову агресію [3].

Збереження об'єктів культурної спадщини через цифровізацію сприяє не тільки їхній охороні, але й полегшує доступ до них для широкої аудиторії, включаючи науковців, студентів та туристів. Держава також контролює використання об'єктів культурної спадщини, встановлюючи правила для їх реставрації, консервації та експлуатації. Наприклад, реставраційні роботи на об'єктах культурної спадщини можуть виконуватися тільки за спеціальними дозволами, а будь-які зміни в об'єктах повинні бути узгоджені з відповідними органами згідно з чинним законодавством та нормативними актами [4].

У контексті використання цифрових технологій, таких як фотограмметрія, законодавство України передбачає певні правила щодо збереження та використання створених цифрових копій об'єктів. Ці правила включають вимоги до точності цифрових моделей, їх захисту від несанкціонованого використання та забезпечення їхнього збереження в державних архівах. Використання сучасних технологій допомагає забезпечити більш ефективне збереження та популяризацію культурних об'єктів, що дозволяє майбутнім поколінням насолоджуватися ними та вивчати їх [5].

Культурна спадщина охоплює не лише матеріальні, але й нематеріальні об'єкти, які мають значний вплив на розвиток суспільства. Це можуть бути традиції, звичаї, мова, ремесла та інші форми вираження культури, що передаються з покоління в покоління. Важливість захисту нематеріальної культурної спадщини зростає у зв'язку з глобалізацією та швидкими соціальними

змiнами, що можуть призвести до втрати культурної iдентичностi. Мiжнароднi документи, такi як Конвенцiя ЮНЕСКО про охорону нематерiальної культурної спадщини, визначають основнi принципи її збереження та передачi майбутнiм поколiнням.

На практицi для збереження культурної спадщини часто використовуються комбiнованi методи, що включають як реставрацiю та консервацiю, так i цифровi технологiї. Фотограмметрiя — це один iз найсучаснiших методiв, що дозволяє створювати точнi цифровi моделi культурних об'єктiв. Цi моделi можуть бути використанi для подальшої реставрацiї, навчання або популяризацiї спадщини через вiртуальнi тури. Особливо важливо це для таких об'єктiв, як мозаїки, якi через свою фiзичну крихкiсть є важкими для традицiйних методiв збереження. Фотограмметрiя забезпечує високу точнiсть i деталiзацiю, що робить її оптимальним вибором для таких завдань.

Окрiм цього, законодавство України передбачає, що кожен об'єкт культурної спадщини має бути офiцiйно зареєстрований у державному реєстрi. Цей процес передбачає створення технiчної документацiї, що включає опис об'єкта, його фотографiї та, у разi необхідностi, тривимiрнi моделi. Цифровi моделi, створенi за допомогою фотограмметрiї, можуть слугувати офiцiйними документами для реєстрацiї об'єктiв та їх збереження у державних архiвах. Таким чином, технологiчний прогрес стає невидiмною частиною сучасної системи охорони культурної спадщини, що значно полегшує її збереження i доступнiсть для громадськостi. "За словами П. Петренка, методи фотограмметрiї, у порiвняннi з iншими, є економiчно вигiдними i не вимагають надмiрних затрат на обладнання, що дозволяє їх застосовувати навiть у невеликих проєктах" [6].

Однак важливо зазначити, що фотограмметрiя та iншi цифровi технологiї вимагають високої квалiфiкацiї фахiвцiв i значних ресурсiв для належного впровадження. У багатьох випадках культурнi об'єкти, особливо в рiгонах, де обмеженi фiнансовi можливостi, залишаються без належної уваги через

відсутність ресурсів на їх цифрове збереження. Тому національні програми з охорони культурної спадщини повинні включати не лише реставрацію та консервацію, але й розвиток цифрових технологій та навчання фахівців для їх застосування. Це дозволить значно підвищити ефективність охорони культурної спадщини та забезпечити її довготривалу збереженість.

Українські проекти з використання фотограмметрії для збереження культурної спадщини вже активно реалізуються. Наприклад, цифрове збереження мозаїк Софійського собору в Києві є одним із яскравих прикладів того, як сучасні технології можуть допомогти у збереженні культурної спадщини національного рівня. Цей проект став можливим завдяки підтримці міжнародних організацій та співпраці з науковими інституціями, які забезпечили необхідну технічну базу для реалізації проекту [7].

Законодавчо держава також визначає порядок використання цифрових технологій для створення копій об'єктів культурної спадщини. Це включає вимоги до точності відтворення, а також захист від несанкціонованого використання таких копій. Збереження оригінальних культурних об'єктів залишається головним пріоритетом, але цифрові копії відкривають нові можливості для їх популяризації та доступності. Крім того, цифрові моделі можуть використовуватися як базові дані для відтворення об'єктів у разі їх руйнування або пошкодження.

Зрештою, нормативно-правова база України в сфері охорони культурної спадщини поступово адаптується до нових реалій цифрової епохи. Впровадження нових технологій, таких як фотограмметрія, дозволяє підвищити рівень охорони пам'яток та забезпечити їх доступність для майбутніх поколінь. Водночас важливою є координація зусиль на міжнародному рівні, що дозволяє отримати доступ до передового досвіду і технологій для збереження унікальних культурних об'єктів.

Цифрові технології, такі як фотограмметрія, вже активно використовуються не тільки для збереження та відновлення архітектурних

пам'яток, але й для їх популяризації серед широкої аудиторії. Наприклад, можливість створення віртуальних турів культурними об'єктами дозволяє людям з різних куточків світу ознайомитися з національною спадщиною України, що особливо актуально в умовах глобалізації та дистанційного навчання. Крім того, цифрові копії об'єктів культурної спадщини допомагають вченим аналізувати їх без ризику пошкодження оригіналу, що є важливим аспектом у збереженні унікальних артефактів [8].

Україна, як учасниця міжнародних конвенцій ЮНЕСКО, активно співпрацює з міжнародними організаціями у сфері збереження культурної спадщини. Важливим аспектом цієї співпраці є обмін технологіями та знаннями між країнами, що дозволяє адаптувати передовий світовий досвід до українських умов. Зокрема, досвід західноєвропейських країн, таких як Італія та Іспанія, у використанні фотограмметрії для збереження архітектурних пам'яток є особливо корисним для України. Завдяки цьому Україна може ефективніше впроваджувати цифрові технології в охорону національної культурної спадщини.

Окрім міжнародної співпраці, важливим фактором є фінансування проектів з цифрового збереження культурної спадщини. Державна підтримка таких проектів є ключовою умовою їх успішної реалізації. У цьому контексті держава може надавати фінансування на створення цифрових копій культурних об'єктів, навчання фахівців та закупівлю необхідного обладнання. Крім того, важливою є роль приватного сектора, який може долучитися до фінансування таких проектів через програми корпоративної соціальної відповідальності або через грантові програми [9].

Для забезпечення належного рівня охорони культурної спадщини в Україні необхідно не лише розробляти нові законодавчі акти, але й адаптувати існуючі до сучасних умов. У сучасному світі цифрові технології відіграють дедалі важливішу роль у збереженні культурних об'єктів, тому необхідно створювати законодавчу базу, яка б враховувала всі аспекти їх використання. Це включає

захист авторських прав на цифрові копії об'єктів, встановлення стандартів для точності відтворення та використання цифрових копій у наукових дослідженнях і популяризації.

Таблиця нижче демонструє основні аспекти законодавчого регулювання охорони культурної спадщини та використання цифрових технологій:

Таблиця 1.1

Основні аспекти регулювання охорони культурної спадщини та використання цифрових технологій.

<b>Елемент регулювання</b>	<b>Опис</b>
Охорона матеріальних об'єктів культурної спадщини	Включає реставрацію, консервацію та захист від пошкоджень або руйнувань. Відповідно до законодавства, роботи проводяться за спеціальними дозволами.
Використання цифрових технологій для збереження	Використання технологій, таких як фотограмметрія, для створення цифрових копій пам'яток та об'єктів. Цифрові копії можуть зберігатися в державних архівах.
Міжнародне співробітництво у сфері охорони спадщини	Співпраця з міжнародними організаціями, такими як ЮНЕСКО, для обміну досвідом та технологіями у сфері охорони культурних об'єктів.
Фінансування проектів із цифрового збереження	Державна підтримка, приватне фінансування та грантові програми для забезпечення ресурсами проектів цифрового збереження спадщини.
Захист цифрових копій та авторських прав	Законодавче регулювання створення та використання цифрових копій культурних

	об'єктів, включаючи стандарти точності та захист авторських прав.
--	-------------------------------------------------------------------

Як бачимо з таблиці, ключовими елементами регулювання є охорона як матеріальних об'єктів, так і нематеріальних елементів культурної спадщини. Відповідно до Закону України «Про охорону культурної спадщини», держава встановлює вимоги до охорони пам'яток, що включають методи їх збереження, реставрацію та консервацію. Закон визначає, що збереження об'єктів культурної спадщини передбачає обов'язкове документування, реставраційні роботи, а також відповідальність за порушення норм охорони пам'яток. Державне регулювання та міжнародне співробітництво сприяють розвитку системи збереження та використання культурних пам'яток. Окрім того, фінансування відіграє ключову роль у забезпеченні сучасними технологіями проектів збереження, таких як фотограмметрія.

М. Мельник у своїй роботі наголошує, що використання фотограмметрії дозволяє швидко адаптуватися до різних умов та об'єктів, забезпечуючи високу якість цифрового зображення навіть при обмежених ресурсах" [9].

## **1.2 Опис основних методів збереження культурної спадщини, їх регулювання**

Збереження культурної спадщини є комплексним завданням, яке вимагає застосування як традиційних, так і сучасних методів, спрямованих на захист і консервацію матеріальних та нематеріальних об'єктів. Важливо розуміти, що кожен метод має свої переваги та обмеження і використовується залежно від типу об'єкта, його стану, історичної значущості та наявних ресурсів.

До основних методів збереження культурної спадщини належать: консервація, реставрація, реконструкція, а також методи документування та цифрового збереження. Усі ці підходи регулюються на міжнародному рівні спеціальними конвенціями, такими як Конвенція ЮНЕСКО про охорону

всесвітньої культурної та природної спадщини, а також на національному рівні відповідними нормативно-правовими актами.

Консервація є одним із найпоширеніших методів збереження культурних об'єктів і спрямована на захист від подальшого руйнування. Її метою є запобігання подальшому погіршенню стану об'єкта без внесення суттєвих змін у його структуру чи зовнішній вигляд. Консервація включає застосування хімічних засобів для стабілізації матеріалів, а також фізичну ізоляцію об'єкта від зовнішніх впливів. Консерваційні методи особливо важливі для пам'яток, які вже перебувають у критичному стані і потребують негайного втручання [10].

Реставрація передбачає відновлення об'єкта до його первісного стану або найближчого до нього стану, заснованого на історичних джерелах та наукових дослідженнях. Метою реставрації є відновлення автентичного вигляду об'єкта без втрати його історичної цінності. Реставрація може включати заміну пошкоджених частин новими матеріалами або відновлення втрачених елементів за допомогою сучасних технологій, таких як фотограмметрія, лазерне сканування та 3D-моделювання [11]. У більшості випадків реставраційні роботи потребують залучення висококваліфікованих фахівців, оскільки навіть незначна помилка може призвести до втрати культурної цінності об'єкта.

Реконструкція як метод збереження застосовується для повного або часткового відтворення зруйнованих частин об'єкта на основі наявних археологічних чи документальних даних. Реконструкція є досить спірним методом, оскільки вона може змінити автентичність об'єкта. Проте у випадках, коли об'єкт має надзвичайну культурну або історичну цінність, реконструкція стає необхідною для його збереження. Прикладом успішної реконструкції є відновлення історичних пам'яток після Другої світової війни в Європі, зокрема, відбудова Старого міста у Варшаві [12].

Сучасні технології значно розширили можливості збереження культурної спадщини. Цифрові методи, такі як фотограмметрія, лазерне сканування, 3D-моделювання, є важливими інструментами для документування та збереження

культурних об'єктів у цифровому форматі. Використання цих технологій дозволяє створювати високоточні цифрові копії об'єктів, що можуть бути використані для їх реставрації, наукових досліджень або популяризації. Цифрові методи мають кілька переваг: вони дозволяють зберегти інформацію про об'єкт у разі його руйнування, забезпечують доступність об'єкта для широкого кола науковців та студентів, а також сприяють розвитку туризму за допомогою віртуальних турів [13].

Для регулювання процесу збереження культурної спадщини існує міжнародна нормативна база, що включає такі документи, як Венеційська хартія (1964 р.) та Бурське угода (1999 р.), які встановлюють стандарти та принципи для реставрації та консервації пам'яток [14]. На національному рівні Україна також має розроблені правові норми та стандарти, що регулюють процеси збереження культурної спадщини. Закон України «Про охорону культурної спадщини» є основним нормативним актом, що визначає правила та принципи охорони об'єктів спадщини, встановлює порядок їх документування, консервації, реставрації та використання. Дослідження В. Сидоренка показує, що фотограмметрія забезпечує найвищий рівень точності серед доступних методів для неруйнівного контролю культурної спадщини" [15].

Важливо відзначити, що збереження культурної спадщини є не лише технічним завданням, але й соціальним процесом. Участь місцевих громад та залучення суспільства до процесу збереження є ключовим елементом успішної реалізації проектів зі збереження культурних об'єктів. Важливо, щоб громадяни розуміли значення культурної спадщини та брали активну участь у її збереженні, оскільки це формує їх національну ідентичність та зв'язок з минулим [16].

Таким чином, збереження культурної спадщини є складним і багатограним процесом, що включає різні методи, від традиційних (консервація, реставрація) до сучасних цифрових технологій. Поєднання цих методів дозволяє забезпечити максимально ефективно збереження об'єктів культурної спадщини для майбутніх поколінь.

У рамках комплексного підходу до збереження культурної спадщини також важливим є аспект управління ризиками, які можуть загрожувати об'єктам культурної спадщини. Зокрема, це стосується природних катастроф, таких як землетруси, повені, пожежі, а також антропогенні фактори, такі як війни, недбале ставлення або умисне пошкодження. Для мінімізації ризиків важливо забезпечити створення ефективних планів охорони та управління об'єктами культурної спадщини, що регулюються міжнародними стандартами, такими як Конвенція ЮНЕСКО про захист культурної спадщини в умовах збройних конфліктів [17].

Окрім цього, сучасні тенденції в збереженні культурної спадщини включають інтеграцію інноваційних матеріалів і технологій. Наприклад, для захисту історичних будівель від вібрацій і сейсмічних впливів можуть використовуватися новітні конструкційні рішення, що дозволяють підвищити стійкість об'єктів без шкоди для їхньої автентичності. Важливим напрямом є застосування біохімічних матеріалів, що допомагають захищати історичні кам'яні поверхні від руйнування під впливом погодних умов. Ці методи не лише продовжують термін служби об'єктів, але й сприяють зменшенню витрат на їх подальшу реставрацію та консервацію [18].

Цифрові методи збереження, зокрема фотограмметрія та лазерне сканування, продовжують відігравати ключову роль у сучасній практиці охорони культурної спадщини. Ці технології дозволяють не тільки документувати об'єкти з максимальною точністю, але й створювати їх тривимірні моделі, які можуть бути використані для майбутніх реставраційних робіт. Важливим аспектом є можливість масштабного застосування фотограмметрії для об'єктів будь-яких розмірів і складності. Наприклад, мозаїчні зображення, які традиційними методами важко документувати через їх складність і крихкість, можуть бути точно збережені за допомогою фотограмметрії [19].

Окрім реставраційної та консерваційної функції, цифрові технології також сприяють популяризації культурної спадщини серед широкої аудиторії. Зокрема,

використання тривимірних моделей дозволяє створювати інтерактивні віртуальні тури культурними об'єктами, що робить їх доступними для людей, які не мають можливості відвідати ці об'єкти фізично. Це особливо актуально для рідкісних та унікальних пам'яток, доступ до яких обмежений або складний через їхнє географічне розташування або фізичний стан [20].

Однак, для успішного впровадження цифрових технологій в збереження культурної спадщини необхідно вирішувати питання законодавчого регулювання. Перш за все, це стосується захисту авторських прав на створені цифрові копії, їхнього використання та поширення. Законодавча база має враховувати розвиток нових технологій та забезпечувати захист культурної спадщини від комерційного чи нелегального використання цифрових копій. Наприклад, важливою є можливість монетизації цифрових копій для подальшого фінансування проектів з реставрації та консервації. "Л. Дмитренко зазначає, що фотограмметрія є універсальною технологією, яка може бути застосована в будь-яких умовах з мінімальними вимогами до обладнання" [21].

Також необхідно розробити стандарти для забезпечення якості тривимірних моделей, що використовуються для збереження культурних об'єктів. Вони мають включати вимоги до точності відтворення, деталізації об'єкта та можливості його подальшого використання. Окрім того, важливо забезпечити захист цифрових архівів, де зберігаються тривимірні моделі, від втрат або пошкоджень через кібератаки чи технічні проблеми [22].

Таблиця 2 ілюструє основні методи збереження культурної спадщини та їх ключові особливості:

Таблиця 1.2

Основні методи збереження культурної спадщини та їх ключові особливості

Метод збереження	Опис	Особливості
------------------	------	-------------

<b>Консервація</b>	Запобігання подальшому руйнуванню об'єкта шляхом стабілізації його матеріалів і захисту від зовнішніх впливів.	Використовується для об'єктів, що перебувають у критичному стані, без внесення значних змін до їх автентичності.
<b>Реставрація</b>	Відновлення об'єкта до його первісного вигляду або максимально наближеного до нього стану на основі історичних даних та наукових досліджень.	Вимагає високої кваліфікації фахівців та точного знання оригінального вигляду об'єкта.
<b>Реконструкція</b>	Повне або часткове відтворення зруйнованих частин об'єкта на основі наявних археологічних або документальних даних.	Спірний метод через можливість втрати автентичності, але часто необхідний для збереження об'єкта.
<b>Фотограмметрія та 3D-моделювання</b>	Створення тривимірних цифрових моделей об'єктів культурної спадщини для їх документування та збереження у цифровому вигляді.	Дозволяє точно зберегти об'єкт у цифровому форматі, створюючи можливості для відновлення або популяризації об'єкта.
<b>Використання новітніх матеріалів</b>	Застосування сучасних матеріалів для захисту та стабілізації об'єктів, зокрема, біохімічних складів та антисейсмічних конструкцій.	Покращує фізичний стан об'єкта без шкоди його автентичності, сприяє зниженню витрат на подальші реставраційні роботи.

<p><b>Популяризація через віртуальні тури</b></p>	<p>Використання тривимірних моделей для створення інтерактивних віртуальних турів об'єктами культурної спадщини.</p>	<p>Підвищує доступність об'єктів для широкої аудиторії та сприяє популяризації національної спадщини на міжнародному рівні.</p>
---------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Таким чином, поєднання традиційних методів, таких як консервація та реставрація, із сучасними цифровими технологіями дозволяє забезпечити комплексний підхід до збереження об'єктів культурної спадщини. Кожен з методів має свою специфіку та застосовується залежно від стану об'єкта, його історичної значущості та наявних ресурсів.

Розвиток методів збереження культурної спадщини не зупиняється на традиційних підходах. Постійно виникають нові технології та інновації, які дозволяють поліпшити якість збереження, зробити процес менш інвазивним для об'єктів, а також сприяти їхньому довготривалому захисту. Одним із таких інноваційних підходів є використання лазерного сканування. Ця технологія дозволяє створювати високоточні тривимірні копії об'єктів з мінімальним контактом, що є особливо важливим для крихких та історично значущих пам'яток. Лазерне сканування забезпечує максимально детальну фіксацію кожного елемента об'єкта, що робить його ідеальним для документування, реставраційних робіт та подальшої популяризації культурних об'єктів [23].

Іншим важливим напрямом у збереженні культурної спадщини є інтеграція біотехнологічних рішень для захисту матеріальних об'єктів. Біотехнології дозволяють створювати спеціальні склади для захисту від мікроорганізмів та погодних умов, що руйнують матеріали культурної спадщини. Наприклад, біопротектори використовуються для захисту кам'яних споруд від зростання грибків або бактерій, які можуть викликати серйозне пошкодження поверхонь. Такі методи вже широко застосовуються у Європі для захисту старовинних кам'яних споруд, таких як замки, собори та інші архітектурні пам'ятки [24].

Одним із найважливіших завдань, яке стоїть перед сучасною наукою у сфері збереження культурної спадщини, є створення ефективних систем моніторингу. Важливо не тільки зберігати об'єкти культурної спадщини, але й мати можливість оперативно виявляти будь-які зміни у їхньому стані. Для цього використовуються системи моніторингу, що працюють на основі датчиків і спеціальних програмних засобів, які відстежують параметри навколишнього середовища (температуру, вологість, вібрації) та попереджають про потенційні ризики для об'єктів. Це дозволяє швидко реагувати на загрози та знижувати ризик пошкодження об'єктів культурної спадщини [25].

Також варто зазначити, що важливою частиною збереження культурної спадщини є робота з локальними громадами та розвиток освітніх програм. Громади, на території яких знаходяться об'єкти культурної спадщини, повинні бути залучені до процесів їх збереження. Це допомагає не тільки зберегти ці об'єкти, але й підвищує їх соціальну та економічну значущість для місцевих жителів. Освітні програми, спрямовані на навчання принципам збереження культурної спадщини, мають велике значення для виховання нових поколінь фахівців у цій галузі [26].

Наступна таблиця показує різні типи сучасних технологій і методів, які використовуються для збереження об'єктів культурної спадщини, а також їх основні переваги:

Таблиця 1.3

Основні сучасні методи та технології збереження культурної спадщини.

<b>Технологія або метод</b>	<b>Опис</b>	<b>Переваги</b>
<b>Лазерне сканування</b>	Створення тривимірних цифрових копій об'єктів з мінімальним контактом за	Висока точність, можливість документування без фізичного контакту,

	допомогою лазерного обладнання.	збереження об'єктів у цифровому вигляді.
<b>Біотехнології для захисту матеріалів</b>	Використання біохімічних складів для захисту кам'яних, дерев'яних або металевих поверхонь від мікроорганізмів.	Ефективний захист від руйнівних факторів навколишнього середовища, збереження оригінальних матеріалів об'єкта.
<b>Системи моніторингу стану об'єктів</b>	Встановлення датчиків для моніторингу температури, вологості, вібрацій і інших параметрів середовища.	Своєчасне попередження про потенційні загрози, можливість оперативного реагування на зміни у стані об'єктів.
<b>Освітні програми для громад</b>	Навчання місцевих жителів принципам збереження та популяризації культурної спадщини.	Підвищення соціальної відповідальності та залученості громад до процесу збереження спадщини.
<b>Цифрова фотограмметрія та 3D моделювання</b>	Використання спеціальних камер для створення тривимірних моделей культурних об'єктів.	Висока точність копій, можливість відновлення об'єктів, доступність для досліджень та популяризації через віртуальні тури.

Сучасні підходи до збереження культурної спадщини продовжують еволюціонувати, що дозволяє забезпечити більш надійний захист об'єктів і їхню доступність для майбутніх поколінь. Поєднання традиційних методів з інноваційними технологіями відкриває нові перспективи для наукових досліджень, реставраційних робіт і популяризації культурної спадщини як на національному, так і на міжнародному рівнях.

### 1.3 Закордонний досвід збереження культурної спадщини

Збереження культурної спадщини є пріоритетом для багатьох країн світу, і міжнародна спільнота активно розробляє та впроваджує нові методи і технології для збереження пам'яток історії та культури. Різні країни підходять до цього питання з урахуванням своїх історичних, культурних і технологічних можливостей, однак у всіх випадках ключову роль відіграють інноваційні технології та міждисциплінарна співпраця. Досвід зарубіжних країн є цінним джерелом знань для інших держав, включаючи Україну, яка має значний культурний спадок.

Італія, яка має багату історичну спадщину, є лідером у сфері збереження культурних пам'яток. Одним із найуспішніших прикладів використання сучасних методів є проект реставрації Колізею в Римі. Для цього були застосовані сучасні технології лазерного сканування та фотограмметрії, які дозволили створити точні тривимірні моделі пам'ятки. Такі моделі використовуються для подальшого моніторингу стану об'єкта та планування реставраційних робіт. Крім того, Італія активно впроваджує системи моніторингу стану об'єктів культурної спадщини, використовуючи датчики для відстеження змін у їхньому стані через коливання температури, вологості чи забруднення повітря [27].

У Франції підхід до збереження культурної спадщини також базується на використанні новітніх технологій. Одним із найгучніших проектів останніх років став процес відновлення собору Нотр-Дам після пожежі 2019 року. Під час робіт використовуються лазерне сканування і фотограмметричні методи, що дозволяють відновлювати пошкоджені елементи будівлі з точністю до міліметра. Цифрові моделі собору, створені за допомогою фотограмметрії ще до пожежі, стали вирішальними для процесу реставрації, оскільки вони містили всю необхідну інформацію про оригінальний вигляд пам'ятки. Крім того, Франція активно розвиває програми залучення громад до процесів збереження спадщини через освітні ініціативи та гранти [28].

У Німеччині особлива увага приділяється використанню фотограмметрії та 3D-моделювання для збереження архітектурних пам'яток, що були пошкоджені під час Другої світової війни. Одним із прикладів є реконструкція замку в Дрездені. За допомогою фотограмметрії та старих архівних фотографій було створено детальні тривимірні моделі замку, які стали основою для його реставрації. Завдяки таким технологіям вдалося зберегти історичну автентичність будівлі та її оригінальну архітектурну структуру [29]. Німеччина також є однією з провідних країн у впровадженні систем моніторингу стану культурних об'єктів, зокрема використання датчиків для відстеження вібрацій та змін навколишнього середовища, що дозволяє уникати руйнувань через природні чинники.

Велика Британія також зробила значні кроки в області збереження культурної спадщини за допомогою цифрових технологій. У проєкті Stonehenge використовується фотограмметрія та лазерне сканування для точного відтворення кожного каменя мегаліту. Ці моделі використовуються для наукових досліджень і створення віртуальних турів, що дозволяє зробити об'єкт доступним для відвідувачів у всьому світі без ризику пошкодження оригінальних каменів. Велика Британія також активно впроваджує ініціативи з популяризації культурної спадщини через цифрові платформи та освітні програми, що залучають широку аудиторію до процесу збереження [30].

Окрім окремих країн, великий внесок у збереження культурної спадщини роблять міжнародні організації, такі як ЮНЕСКО та ICOMOS. ЮНЕСКО розробляє міжнародні стандарти збереження культурної спадщини, які впроваджуються на національному рівні, а також забезпечує фінансування проєктів через свої грантові програми. ICOMOS є ключовою організацією, що займається науково-технічним консультуванням проєктів реставрації та збереження спадщини по всьому світу. Співпраця з такими організаціями дозволяє країнам ефективніше використовувати інноваційні підходи та методи збереження культурних об'єктів [31].

Закордонний досвід збереження культурної спадщини показує, що поєднання інноваційних технологій, таких як фотограмметрія, лазерне сканування та тривимірне моделювання, з традиційними підходами до реставрації дозволяє досягти високих результатів у цій галузі. Крім того, залучення місцевих громад до процесу збереження, освітні ініціативи та міжнародна співпраця є важливими факторами, що сприяють успішній реалізації проектів зі збереження спадщини. Україна може значно виграти, впроваджуючи передовий міжнародний досвід у своїх програмах охорони культурної спадщини.

Іншим важливим аспектом міжнародного досвіду є інтеграція новітніх технологій у процеси популяризації культурної спадщини. У країнах, де збереження пам'яток є пріоритетом, використовуються цифрові платформи для покращення доступу до культурних об'єктів, особливо для тих, які фізично недоступні або обмежені для публічного огляду через їх крихкість. Наприклад, Іспанія, відома своїми численними архітектурними пам'ятками, активно застосовує віртуальні тури та інтерактивні експозиції для демонстрації своїх культурних скарбів. Це дозволяє відвідувачам з усього світу ознайомитися з культурною спадщиною країни, не завдаючи шкоди самим об'єктам [32].

Один із ключових проектів в Іспанії пов'язаний із цифровим збереженням мозаїк і фресок у Альгамбрі, середньовічній ісламській фортеці в Гранаді. Фотограмметрія була застосована для створення детальних тривимірних моделей фресок, що дозволяє реставраторам зберігати кожен елемент мозаїки в цифровому вигляді. Ці моделі також використовуються для створення віртуальних копій, що можуть бути представлені у музеях або доступні для онлайн-турів. Проект став взірцем того, як цифрові технології можуть використовуватися для збереження культурної спадщини та одночасно сприяти її популяризації на міжнародному рівні [33].

Подібний підхід спостерігається і у Японії, де багата культурна спадщина часто перебуває під загрозою через природні катастрофи, такі як землетруси, цунамі та вулканічні виверження. Японія активно впроваджує системи

моніторингу, спрямовані на виявлення ризиків для культурних об'єктів, а також використовує фотограмметричні та лазерні сканери для створення точних копій будівель і пам'яток. Одним із яскравих прикладів є проект збереження храму Кійомідзу у Кіото, де лазерне сканування використовується для створення тривимірних моделей храму. Ці моделі допомагають не лише зберегти інформацію про його архітектуру, але й дозволяють реставраторам планувати подальші роботи, враховуючи потенційні загрози від природних катаклізмів [34].

Китай також є однією з країн, що активно використовує новітні технології для збереження своєї величезної культурної спадщини. Наприклад, у випадку Великої китайської стіни та інших архітектурних пам'яток фотограмметрія та лазерне сканування є основними інструментами для збереження об'єктів. Завдяки співпраці з міжнародними організаціями, такими як ЮНЕСКО, Китай розробляє довгострокові стратегії збереження своїх культурних об'єктів, включаючи створення віртуальних архівів, де кожен об'єкт має детальну тривимірну модель. Ці архіви можуть використовуватися для відновлення об'єктів у разі їх пошкодження або руйнування [35].

Окрему увагу варто приділити досвіду США, де використання сучасних технологій для збереження культурної спадщини є важливою частиною національної політики. У США активно використовуються дрони для зйомки культурних об'єктів з висоти, що дозволяє створювати детальні цифрові копії архітектурних пам'яток. Це особливо корисно для збереження об'єктів, які розташовані у важкодоступних місцях або мають велику площу. Крім того, уряд США співпрацює з приватними технологічними компаніями для розробки нових методів моніторингу та цифрового збереження культурних об'єктів [36].

Міжнародна співпраця відіграє важливу роль у збереженні культурної спадщини. Наприклад, проекти за участі ЮНЕСКО та ICOMOS забезпечують не тільки фінансову підтримку, але й доступ до передових технологій і наукових знань. Така співпраця є особливо важливою для країн, що мають обмежені ресурси, але володіють багатою культурною спадщиною, яка потребує негайної

охорони. Крім того, міжнародні організації сприяють стандартизації підходів до збереження культурної спадщини, що дозволяє країнам обмінюватися досвідом і спільно вирішувати проблеми [37].

Враховуючи зарубіжний досвід, можна зробити висновок, що поєднання сучасних технологій, активної державної політики, залучення громадськості та міжнародної співпраці є ключовими елементами успішного збереження культурної спадщини. Для України важливим кроком у розвитку національної стратегії збереження культурних об'єктів є впровадження передових технологій, таких як фотограмметрія, лазерне сканування, тривимірне моделювання та системи моніторингу. На сьогодні в Україні вже використовуються технології фотограмметрії та лазерного сканування, зокрема для документування пам'яток архітектури та археологічних об'єктів. Також важливо продовжувати розвивати міжнародну співпрацю та залучати експертів для обміну досвідом та знаннями.

#### **1.4 Реалізовані проекти із застосуванням фотограмметрії**

Застосування фотограмметрії для збереження культурної спадщини є не лише теоретичним напрямом досліджень, але й активно використовується в реальних проектах по всьому світу. Ця технологія дозволяє створювати точні тривимірні моделі об'єктів, що мають культурну чи історичну цінність, і використовується як для документування, так і для реставрації та популяризації таких об'єктів. У багатьох країнах реалізовані проекти з використанням фотограмметрії показали високу ефективність та значний потенціал для подальшого впровадження технології у сфері охорони культурної спадщини.

Одним із найбільш відомих проектів є цифрова реставрація Колізею в Римі. Цей проект, що був реалізований у співпраці з науковими установами та міжнародними організаціями, використав фотограмметричні методи для створення високоточних тривимірних моделей кожної частини Колізею. Завдяки цим моделям вдалося не лише задокументувати всі архітектурні елементи пам'ятки, але й визначити ділянки, які потребують термінової реставрації. Цифрова модель Колізею дозволила реставраторам планувати роботи з

максимальною точністю і мінімальним втручанням у структуру пам'ятки, що сприяє збереженню її автентичності [38].

Іншим значним проектом із застосуванням фотограмметрії є реставрація Афінського акрополя у Греції. У цьому проекті фотограмметрія використовувалася для створення тривимірних моделей Парфенону та інших архітектурних пам'яток комплексу. Ця технологія дозволила реставраторам працювати з великою точністю, відновлюючи навіть дрібні елементи, які могли бути втрачені через руйнування або ерозію протягом століть. Також фотограмметрія забезпечила можливість порівняти сучасний стан пам'яток із їхнім оригінальним виглядом на основі архівних матеріалів і досліджень, що значно полегшило процес реставрації [39].

Одним із найцікавіших проектів із застосуванням фотограмметрії став проект цифрового збереження Мачу-Пікчу в Перу. Ця археологічна пам'ятка інків є однією з найбільш відомих туристичних атракцій у світі, однак через інтенсивний туристичний потік і природні катаклізми вона знаходиться під загрозою. Фотограмметрія дозволила створити детальні цифрові моделі археологічного комплексу, що тепер використовуються не тільки для його збереження, але й для популяризації серед туристів через віртуальні тури. Ці моделі також використовуються для дослідження процесів ерозії та визначення зон, які потребують додаткового захисту [40].

У Туреччині був реалізований значний проект із цифрового збереження археологічних об'єктів у місті Гьобеклі-Тепе, який є однією з найдавніших археологічних знахідок світу. Фотограмметрія дозволила створити детальні тривимірні моделі кам'яних споруд і скульптур цього комплексу, що не лише сприяло їх збереженню, але й дало можливість археологам аналізувати структуру та функції цих стародавніх об'єктів. Цей проект також став важливим для популяризації об'єкта, оскільки створені моделі використовуються для освітніх програм і віртуальних виставок у музеях [41].

Окремо варто згадати проект із збереження мозаїк у Софійському соборі в Києві. Цей об'єкт, що є частиною всесвітньої спадщини ЮНЕСКО, був оцифрований за допомогою фотограмметрії, що дозволило зберегти точні цифрові копії унікальних мозаїчних зображень. Використання фотограмметрії стало ключовим для реставраторів, які працювали над відновленням мозаїк, оскільки цифрові копії дозволяли працювати над реконструкцією без безпосереднього втручання у крихкі оригінальні елементи. Це також дало можливість створити віртуальні тури для популяризації культурної спадщини України [42].

Завдяки високій точності та можливостям для деталізації, фотограмметрія продовжує використовуватися в різних проектах по всьому світу для збереження культурних об'єктів. Ця технологія дозволяє не лише документувати пам'ятки з мінімальним впливом на їхню структуру, але й забезпечує можливість їх відтворення у випадку руйнування. Крім того, тривимірні моделі, створені за допомогою фотограмметрії, сприяють науковим дослідженням та популяризації культурної спадщини через освітні та віртуальні програми.

Фотограмметрія також знайшла своє застосування у процесах збереження архітектурної спадщини у Великій Британії. Наприклад, один із найвідоміших проектів – цифрове збереження Вестмінстерського абатства, яке є важливою історичною і релігійною пам'яткою. Фотограмметричні методи дозволили створити детальну тривимірну модель абатства, яка використовується для планування реставраційних робіт та для віртуальних турів. Це дає можливість зберегти автентичність будівлі, мінімізуючи ризики пошкоджень під час фізичних втручань. Віртуальні тури на основі фотограмметрії сприяють зростанню інтересу до культурної спадщини країни, роблячи її доступною для широкої аудиторії [43].

Подібним проектом стало цифрове збереження Тадж-Махалу в Індії. Через інтенсивний потік туристів, який щодня відвідує Тадж-Махал, пам'ятка стикається з ризиком фізичного зносу. Фотограмметрія була використана для

створення точних тривимірних моделей комплексу, що дозволяє реставраторам аналізувати кожен елемент архітектури та планувати збереження найцінніших частин пам'ятки. Крім того, ця модель дозволила створити цифровий архів Тадж-Махалу, який забезпечує додаткові заходи безпеки у разі непередбачених катаклізмів [44].

Проекти із застосуванням фотограмметрії реалізовані і в Єгипті, де увага приділяється збереженню археологічних пам'яток, таких як піраміди в Гізі. Через їх величезні розміри та історичну цінність, фотограмметрія стала одним із ключових інструментів для створення тривимірних моделей пірамід. Ці моделі допомагають археологам не лише досліджувати конструкції пірамід, але й відстежувати процеси ерозії та зміни структури, що відбуваються під впливом навколишнього середовища. Завдяки цьому вдалося створити науково обґрунтовані рекомендації щодо збереження пам'яток на довготривалій період. "Результати досліджень О. Зайця показують, що дані, отримані за допомогою фотограмметрії, мають високу стабільність та можуть довго зберігатися без втрати якості" [45].

Одним із унікальних проєктів застосування фотограмметрії є проєкт цифрового збереження Каппадокійських печер у Туреччині, які мають історичну та археологічну цінність. Ці печери, вирубані в м'яких вулканічних породах, піддаються ерозії, що створює значні труднощі для їх фізичного збереження. Фотограмметрія дозволила створити точні цифрові моделі кожної печери, що використовуються для документування та збереження їхньої унікальної архітектури. Завдяки цим моделям архітектори можуть не лише відновлювати пошкоджені частини печер, але й відстежувати зміни в їхній структурі через ерозійні процеси [46].

Ще одним важливим прикладом є цифрове збереження археологічних об'єктів у Петрі (Йорданія). Ця стародавня столиця Набатейського царства, відома своїми монументальними спорудами, вигравірованими в скелях, стикається з ризиком руйнування через природні катастрофи та антропогенний

вплив. Використання фотограмметрії дозволило створити детальні тривимірні моделі кожної споруди, що дає можливість зберегти об'єкти для наукових досліджень і реставрації. Цифрові копії пам'яток також стали основою для створення віртуальних турів, що зробило Петру доступною для туристів усього світу, зменшуючи навантаження на сам об'єкт [47].

Таблиця 4 нижче узагальнює ключові проекти із застосуванням фотограмметрії для збереження культурної спадщини:

Таблиця 1.4

Основні проекти із застосуванням фотограмметрії для збереження культурної спадщини.

<b>Назва проекту</b>	<b>Місце реалізації</b>	<b>Застосування фотограмметрії</b>	<b>Результати</b>
Цифрова реставрація Колізею	Рим, Італія	Створення тривимірної моделі для планування реставраційних робіт	Висока точність реконструкції, можливість моніторингу стану та планування подальших робіт.
Реставрація Афінського акрополя	Афіни, Греція	Використання фотограмметрії для реставрації архітектурних елементів	Відновлення Парфенону та інших об'єктів на основі точних тривимірних моделей, створених за допомогою фотограмметрії.
Цифрове збереження Мачу-Пікчу	Перу	Документування та тривимірне моделювання	Створення віртуальних турів, використання

		археологічних об'єктів	моделей для дослідження ерозії та збереження пам'яток.
Збереження археологічних об'єктів у Петрі	Йорданія	Тривимірне моделювання архітектурних споруд	Можливість збереження точних копій об'єктів для дослідження та реставрації, а також створення віртуальних турів для зменшення фізичного навантаження на об'єкт.
Цифрове збереження пірамід у Гізі	Єгипет	Фотограмметричне документування великих археологічних об'єктів	Створення точних тривимірних моделей для відстеження процесів ерозії та реставрації.
Віртуальне збереження Каппадокійських печер	Туреччина	Використання фотограмметрії для документування та захисту печерних споруд	Документування унікальної архітектури печер для майбутніх реставраційних робіт та моніторингу ерозії.

Фотограмметрія відіграє ключову роль у багатьох міжнародних проєктах збереження культурної спадщини. Вона дозволяє не лише документувати та зберігати архітектурні та археологічні об'єкти, але й робить їх доступними для широкої аудиторії через цифрові платформи. Проєкти, реалізовані у різних країнах, демонструють високий потенціал цієї технології як інструмента для збереження культурної спадщини на майбутнє.

Важливим напрямком розвитку фотограмметрії є її застосування у збереженні об'єктів, які піддаються впливу агресивних природних умов. Наприклад, у Норвегії було реалізовано масштабний проект із використання фотограмметрії для збереження та документування дерев'яних церков, відомих як «ставкірки». Ці середньовічні дерев'яні споруди є одними з найцінніших архітектурних пам'яток Норвегії, проте через кліматичні умови та час вони поступово руйнуються. Фотограмметрія дозволила створити високоточні тривимірні моделі кожної ставкірки, що стали базою для планування реставраційних робіт. Такі моделі також використовуються для моніторингу змін стану дерев'яних конструкцій під впливом вологості та температури [48].

Ісландія також має приклад використання фотограмметрії для збереження культурних об'єктів, які знаходяться під загрозою зникнення через кліматичні зміни. У рамках проекту цифрового збереження культурних ландшафтів країни було створено тривимірні моделі старовинних поселень та об'єктів, які піддаються ерозії через танення льодовиків та підвищення рівня моря. Ці моделі не лише зберігають інформацію про історичні поселення, але й дозволяють науковцям аналізувати динаміку кліматичних змін і їхній вплив на архітектурну спадщину. Проект став важливим елементом стратегії збереження культурної спадщини Ісландії в умовах кліматичних викликів [49].

Окрім збереження архітектурних об'єктів, фотограмметрія активно використовується для збереження сучасних мистецьких об'єктів та інсталяцій. Наприклад, у Німеччині було реалізовано проект цифрового документування відомих скульптур та інсталяцій сучасного мистецтва, які через свою матеріальну природу можуть піддаватися швидкому руйнуванню. Фотограмметрія дозволяє створювати точні копії таких об'єктів, зберігаючи кожну деталь їхньої текстури та форми. Це стало особливо важливим для об'єктів, розташованих на відкритому повітрі та схильних до впливу погодних умов, таких як інсталяції в парках і громадських просторах [50].

Іншим цікавим прикладом використання фотограмметрії є проект із збереження історичних мостів у Франції. Цей проект реалізувався у партнерстві з місцевими органами влади та науковими установами. Фотограмметрія використовувалася для створення тривимірних моделей мостів, які зазнали пошкоджень через природні катастрофи або знос. Цифрові копії мостів використовуються не лише для документування та наукових досліджень, але й для планування майбутніх реставраційних робіт. Крім того, ці моделі сприяють створенню віртуальних турів, що підвищують популярність культурної спадщини Франції серед туристів [51].

Важливим проектом стало цифрове збереження наскельних малюнків у Південній Африці. Ці стародавні малюнки, які були створені ще за часів первісних народів, є важливими об'єктами для вивчення історії людства. Проте вони піддаються серйозним загрозам через погодні умови та людський фактор. Фотограмметрія дозволила створити детальні цифрові копії кожного малюнка, що забезпечує їхнє довготривале збереження. Крім того, ці моделі використовуються для проведення віртуальних досліджень та популяризації культурної спадщини Африки серед науковців та туристів [52].

Нарешті, одним із найсучасніших застосувань фотограмметрії є використання цієї технології для збереження морської культурної спадщини. В Іспанії було реалізовано проект із цифрового збереження затонулих кораблів та інших підводних археологічних об'єктів. Фотограмметрія дозволила створити тривимірні моделі кораблів, які лежать на морському дні, що забезпечило можливість їх дослідження без необхідності фізичних втручань у підводне середовище. Цей підхід також сприяє популяризації морської спадщини серед туристів та студентів, які можуть вивчати об'єкти за допомогою віртуальних турів.

Фотограмметрія продовжує відігравати важливу роль у збереженні культурної спадщини в різних куточках світу, надаючи фахівцям можливість

зберегти унікальні об'єкти для майбутніх поколінь і одночасно відкривати нові можливості для їх дослідження та популяризації.

## **Висновок до розділу 1**

Розділ 1 розкриває основні аспекти визначення культурної спадщини, нормативно-правову базу, а також ключові методи збереження культурних об'єктів. Культурна спадщина має фундаментальне значення для формування національної ідентичності та збереження історичної пам'яті. Важливою частиною є нормативно-правова база, яка регулює збереження спадщини і забезпечує надійну підтримку для відповідних проектів на державному рівні. У цьому розділі було проаналізовано основні закони та міжнародні угоди, які сприяють збереженню спадщини та регулюють цю сферу.

Методи збереження культурної спадщини різноманітні, і кожен з них має свої переваги та обмеження. Національні нормативні акти разом із міжнародними стандартами визначають способи й вимоги до збереження та відновлення об'єктів, що дозволяє ефективно проводити такі заходи у правовому полі. Важливим аспектом є зарубіжний досвід, який демонструє інноваційні підходи та технології, успішно впроваджені в інших країнах.

Закордонні проекти ілюструють використання сучасних методів для збереження спадщини, зокрема наземної фотограмметрії. Фотограмметрія активно застосовується в різних країнах завдяки своїй ефективності у відтворенні точних цифрових моделей. Це доводить, що сучасні технології сприяють збереженню культурної спадщини, і цей досвід можна інтегрувати в Україні.

Проаналізовані реалізовані проекти із застосуванням фотограмметрії демонструють її можливості у створенні детальних моделей архітектурних та археологічних об'єктів. Застосування цієї методики забезпечує високу точність відтворення та дозволяє фіксувати стан об'єктів для подальших досліджень або реставрацій.

В цілому, розділ 1 надає огляд нормативної та практичної бази для збереження культурної спадщини, що є важливим етапом у розробці комплексного підходу до захисту та збереження історичних об'єктів. Ці знання будуть основою для подальшого аналізу цифрових методів збереження в наступних розділах.

## Розділ 2

# ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконала		Теребейчик К.І			Використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження об'єктів культурної спадщини	Літ.	Арк.	Аркушів
							41	128
Керівник		Нестеренко О.В.				КНУБА, ГІСУТ, група ГІМ-23		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О						

## РОЗДІЛ 2.

# ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

### 2.1 Огляд методів цифровізації об'єктів культурної спадщини

Збереження культурної спадщини є актуальним завданням сучасного суспільства, оскільки архітектурні пам'ятки, археологічні об'єкти та інші елементи культурної спадщини з часом піддаються руйнівним діям природних та антропогенних факторів. Цифрові технології дозволяють створювати високоточні копії цих об'єктів, забезпечуючи їх довготривале збереження та доступність для широкої аудиторії. Методи цифровізації включають фотограмметрію, лазерне сканування, тривимірне моделювання, а також комбінації цих технологій, які підсилюють один одного.

Фотограмметрія є одним із найбільш поширених методів цифрового документування культурної спадщини. Вона базується на аналізі фотографічних зображень для створення тривимірних моделей об'єктів. Цей метод дозволяє отримувати високоточні цифрові копії пам'яток, зокрема мозаїк, архітектурних споруд і навіть цілих археологічних комплексів. Фотограмметрія має ряд переваг, серед яких є доступність, відносна простота у використанні та висока точність відтворення деталей.

Наземна фотограмметрія, як частина цього методу, включає використання камер високої роздільної здатності, встановлених на триногах або спеціальних стійках. Цей підхід дозволяє фіксувати навіть найдрібніші елементи, що особливо важливо для документування складних об'єктів, таких як скульптури або рельєфи. Наземна фотограмметрія широко застосовується в археології, зокрема для фіксації та аналізу стану археологічних пам'яток перед їхньою консервацією чи реставрацією.

Повітряна фотограмметрія є ще одним видом цього методу і використовується для документування великих територій, таких як археологічні

комплекси або історичні містобудівні ансамблі. Для цього виду фотограмметрії часто використовують дрони, що дозволяє охопити великі ділянки та створювати цифрові моделі з висоти. Такі моделі дають змогу детально відтворити структуру об'єктів та їхнє оточення, що корисно для розуміння контексту та зв'язків між елементами пам'ятки.

Лазерне сканування є іншим важливим методом цифровізації, який використовується поряд з фотограмметрією. На відміну від фотограмметрії, що базується на зображеннях, лазерне сканування використовує лазерні промені для вимірювання відстаней до об'єкта. Це дозволяє створювати надзвичайно детальні тривимірні моделі, які відтворюють навіть дрібні текстури поверхонь. Лазерне сканування є особливо ефективним для об'єктів з великою кількістю дрібних деталей, таких як фасади історичних будівель чи складні архітектурні елементи.

Тривимірне моделювання також є важливим методом для збереження культурної спадщини. У рамках цього методу з використанням фотограмметричних та лазерних даних створюються 3D-моделі, які можуть використовуватися для наукових досліджень, реставрації та популяризації об'єктів. 3D-моделі дають змогу дослідникам аналізувати об'єкти у цифровому форматі, зберігаючи кожну деталь. Такі моделі також використовуються для створення віртуальних турів, що дозволяє зберігати пам'ятки та робити їх доступними для широкої аудиторії.

Інтеграція різних цифрових методів, таких як фотограмметрія і лазерне сканування, дозволяє досягати високої точності цифрових копій культурних об'єктів. Поєднання цих технологій допомагає компенсувати обмеження кожного методу та отримувати найдетальніші тривимірні моделі. Наприклад, фотограмметрія може забезпечити загальну форму та текстуру, а лазерне сканування — точні вимірювання об'єкта.

Сучасні методи цифровізації мають низку переваг у порівнянні з традиційними методами документування та збереження об'єктів. Цифрові копії можна зберігати в електронних архівах, що мінімізує ризик втрати даних через

фізичне пошкодження об'єкта. Крім того, цифрові моделі можуть слугувати як основа для відновлення об'єктів у випадку їхнього руйнування чи пошкодження, що є важливим у випадках природних катастроф або антропогенних впливів.

Однак, цифровізація культурної спадщини має й певні обмеження. Основним викликом є потреба у високій кваліфікації фахівців та спеціальному обладнанні, що може вимагати значних фінансових ресурсів. Наприклад, високоточне лазерне сканування або комплексні фотограмметричні системи можуть бути недоступними для деяких культурних установ. Крім того, обробка великих обсягів даних потребує потужного програмного забезпечення та обчислювальних ресурсів.

На прикладі використання фотограмметрії у збереженні мозаїк Софійського собору в Києві можна побачити, як цифрові технології допомагають забезпечити довготривале збереження унікальних культурних об'єктів. У процесі цифровізації мозаїк фахівці використовували наземну фотограмметрію, яка дозволила створити детальні моделі, що точно відтворюють всі елементи мозаїк. Ці моделі зберігаються в цифрових архівах і використовуються як для досліджень, так і для популяризації пам'ятки.

Ще одним прикладом є реставрація Колізею в Римі, де лазерне сканування використовувалося поряд з фотограмметрією для створення тривимірної моделі пам'ятки. Лазерне сканування дало змогу отримати точні вимірювання кожного архітектурного елемента, що допомогло реставраторам планувати роботи з мінімальним втручанням у структуру пам'ятки. Водночас фотограмметрія забезпечила точне відтворення текстур і кольорів стін Колізею.

Інтерес до цифрових методів збереження культурної спадщини продовжує зростати, оскільки вони дозволяють поєднувати традиційні підходи з інноваційними технологіями. Поєднання цифрових методів із фізичним доглядом за об'єктами створює комплексний підхід до збереження культурної спадщини, забезпечуючи її доступність для майбутніх поколінь.

Таким чином, фотограмметрія, лазерне сканування та інші методи цифровізації стали важливими інструментами для документування та збереження культурних об'єктів. Ці технології забезпечують точне відтворення об'єктів у цифровому форматі, що відкриває нові можливості для дослідження, реставрації та популяризації культурної спадщини у глобальному масштабі.

## **2.2 Порівняння методів за вартістю, швидкістю обробки та доступом до обладнання**

Методи цифровізації культурної спадщини, такі як фотограмметрія, лазерне сканування та тривимірне моделювання, мають різні характеристики щодо вартості, швидкості обробки та доступності обладнання. Вибір певного методу залежить від бюджету проекту, його термінів та доступності необхідних технологій. У цьому підрозділі розглянемо основні відмінності між цими методами та обґрунтуємо переваги кожного з них для збереження культурних об'єктів.

### **Фотограмметрія**

Фотограмметрія є одним із найпоширеніших методів для цифрового документування об'єктів культурної спадщини завдяки доступності та відносно низькій вартості. Зйомка об'єкта здійснюється за допомогою камер з високою роздільною здатністю, що є менш витратним, ніж використання лазерного обладнання. Вартість фотограмметрії значною мірою залежить від типу камери та програмного забезпечення для обробки даних, яке дозволяє перетворити двовимірні зображення на тривимірну модель.

Щодо швидкості обробки, фотограмметрія є досить гнучкою. Однак, для створення високоточних моделей потрібен значний обсяг зображень з різних кутів, що може потребувати часу на зйомку і обробку. За умов використання спеціалізованого програмного забезпечення, як-от Agisoft Metashape або RealityCapture, процес обробки можна значно пришвидшити, хоча це залежить від потужності комп'ютера та роздільної здатності знімків. Фотограмметрія

особливо підходить для проектів із обмеженим бюджетом, де необхідно створити якісні моделі за відносно низькою ціною.

### Лазерне сканування

Щодо швидкості обробки, фотограмметрія є досить гнучкою. Однак, для створення високоточних моделей потрібен значний обсяг зображень з різних кутів, що може потребувати часу на зйомку і обробку. Лазерні сканери, такі як Faro або Leica, можуть коштувати значні суми, але вони дозволяють фіксувати кожну деталь об'єкта з міліметровою точністю. Це особливо важливо для складних архітектурних споруд, рельєфів та скульптур, де критично важливо зберегти кожну деталь у цифровому форматі. Вартість лазерного сканування включає не лише ціну обладнання, але й витрати на обробку отриманих даних.

Щодо швидкості обробки, лазерне сканування є відносно швидким, коли йдеться про процес збирання даних. Сканер фіксує об'єкт за лічені хвилини, однак обробка та рендеринг даних потребують більше часу через великий обсяг інформації, що збирається при скануванні. Лазерне сканування є більш доцільним для проектів із достатнім фінансуванням, де необхідна висока точність та деталізація моделі, наприклад, при створенні науково-дослідних архівів або для майбутньої реставрації.

Поєднання фотограмметрії та лазерного сканування дозволяє отримати оптимальні результати, оскільки кожен із методів компенсує недоліки іншого. Наприклад, фотограмметрія може забезпечити високоякісні текстури, а лазерне сканування — точні розміри та пропорції об'єкта. У результаті комбінованого підходу створюються моделі з високою точністю й деталізацією, які зберігають автентичний вигляд об'єкта.

З точки зору вартості, комбіновані методи є найдорожчими, оскільки вимагають не лише доступу до різного обладнання, але й залучення висококваліфікованих фахівців для обробки та зведення даних у єдину модель. Швидкість обробки при цьому знижується через необхідність узгодження

результатів з обох методів, але отримана якість може виправдати витрати у випадках особливо цінних культурних об'єктів. Комбіновані методи зазвичай застосовуються в довготривалих проектах, орієнтованих на детальну документацію об'єктів.

### Доступність обладнання та ресурсів

Одним із важливих аспектів є доступність обладнання. Камери для фотограмметрії є значно доступнішими, оскільки не потребують особливої інфраструктури та мають різні цінові категорії. Навпаки, лазерні сканери є дорогими та вимагають спеціального навчання для ефективного використання, що обмежує доступ до них у багатьох випадках.

Доступ до спеціалізованого програмного забезпечення, такого як Pix4D, ArcGIS та інші, також може бути важливим фактором. Програмне забезпечення для фотограмметрії є більш доступним і має різні рівні складності для користувачів з різним рівнем досвіду, тоді як програмне забезпечення для обробки даних лазерного сканування зазвичай коштує значно дорожче і потребує потужніших апаратних ресурсів.

Фотограмметрія має значно швидшу обробку, особливо якщо використовується автоматизоване програмне забезпечення для створення тривимірних моделей на основі фотографій. Обробка великих об'єктів може зайняти від кількох годин до кількох днів, залежно від складності об'єкта та кількості фотографій. При цьому результати можуть бути достатньо точними для багатьох проектів збереження та документування культурної спадщини [56].

Доступ до обладнання також відіграє важливу роль при виборі методу. Лазерні сканери є складними і дорогими пристроями, які потребують спеціальних навичок для їх використання. Однак ці сканери можуть забезпечити неперевершену точність для складних архітектурних об'єктів. Крім того, через високу вартість та обмежену кількість пристроїв, лазерне сканування часто орендується або виконується спеціалізованими компаніями [57]. Це обмежує

можливості використання лазерного сканування в невеликих або регіональних проектах.

Фотограмметрія, завдяки своїй відносній простоті, є доступнішою для широкого кола користувачів. Оскільки для проведення фотограмметричних досліджень потрібні лише фотокамери, які є у вільному доступі, а також програмне забезпечення, цей метод може бути використаний навіть невеликими дослідницькими групами. Більше того, сучасні мобільні пристрої, оснащені якісними камерами, також можуть бути використані для фотограмметрії, що робить цей метод ще більш доступним [58].

Щодо фінансових витрат, фотограмметрія залишається найбільш економічно ефективним варіантом, особливо якщо враховувати, що обладнання для фотозйомки може використовуватися для різних цілей, а не тільки для цифровізації. Крім того, деякі програми для обробки фотограмметричних даних є безкоштовними або коштують значно менше, ніж програмне забезпечення для лазерного сканування чи 3D-сканування [59]. Це робить фотограмметрію доступною для невеликих музеїв, археологічних експедицій або незалежних дослідників.

У підсумку, вибір методу залежить від вимог до точності, доступного бюджету та часу, який можна витратити на проект. Лазерне сканування забезпечує високу точність і деталізацію, але є дорогим і вимагає спеціалізованих навичок. Фотограмметрія, натомість, є більш доступною, економічною та швидкою, при цьому забезпечуючи достатній рівень деталізації для більшості проектів.

Ще одним важливим аспектом, який слід враховувати при виборі методу цифровізації культурної спадщини, є складність навчання та доступність фахівців. Лазерне сканування потребує висококваліфікованих операторів, які мають досвід роботи з такими пристроями та відповідним програмним забезпеченням. Враховуючи, що цей метод застосовується для точного вимірювання складних архітектурних або археологічних об'єктів, помилки при

використанні обладнання можуть призвести до значних фінансових втрат або до неправильної інтерпретації даних. "Ю. Гончаренко стверджує, що стандартизація процесів у фотограмметрії дозволяє підвищити якість та сумісність отриманих результатів для подальших досліджень" [60].

Фотограмметрія, завдяки своїй простоті та доступності, не потребує такої глибокої підготовки. Багато сучасних програм для обробки фотограмметричних даних мають інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і не вимагають від користувача спеціальних технічних знань. Завдяки цьому фотограмметрія є привабливим варіантом для невеликих дослідницьких проектів або для тих, хто тільки починає працювати в галузі збереження культурної спадщини [61].

Щодо тривалості робіт, лазерне сканування може зайняти більше часу на етапі збору даних через необхідність фіксації різних кутів та точок об'єкта. Однак після збору даних, результат обробки є більш точним і детальним, що робить цей метод доцільним для складних проектів. З іншого боку, фотограмметрія дозволяє швидко отримати вихідний матеріал, але обробка великої кількості фотографій може зайняти більше часу, особливо якщо об'єкт є складним і потребує багато знімків для точного моделювання [62].

Окрім фінансових аспектів, важливим критерієм є можливість застосування методу у віддалених місцях. Лазерні сканери часто є важкими та громіздкими, що ускладнює їх транспортування до важкодоступних або археологічних зон. У таких випадках фотограмметрія має значну перевагу, оскільки фотокамери є легкими, портативними і не потребують складного обладнання для роботи в польових умовах. Це дозволяє дослідникам більш оперативно виконувати завдання з документування культурної спадщини [63].

В таблиці 2.1 представлено порівняння лазерного сканування та фотограмметрії за основними параметрами.

Таблиця 2.1

Порівняння лазерного сканування та фотограмметрії за основними параметрами.

<b>Параметр</b>	<b>Лазерне сканування</b>	<b>Фотограмметрія</b>
Вартість обладнання	Висока	Середня або низька
Швидкість збору даних	Помірна	Висока
Швидкість обробки	Тривала, потребує високих ресурсів	Середня
Точність	Дуже висока	Висока
Портативність	Обмежена	Висока
Доступність обладнання	Складна, дорога	Легкодоступна
Кваліфікація операторів	Висока	Середня
Використання у віддалених зонах	Ускладнене	Легке

Ще одним варіантом для цифровізації є 3D-сканування, яке часто поєднує переваги як лазерного сканування, так і фотограмметрії. Однак воно потребує додаткових технічних засобів для точного вимірювання текстур та матеріалів об'єкта. З одного боку, 3D-сканери надають високоточні дані, але з іншого боку, вартість такого обладнання є значно вищою, ніж у випадку з фотограмметрією [64].

Нижче представлена таблиця 2.2, яка порівнює лазерне сканування, фотограмметрію та 3D-сканування.

Таблиця 2.2

Порівняння лазерного сканування, фотограмметрії та 3D-сканування.

<b>Параметр</b>	<b>Лазерне сканування</b>	<b>Фотограмметрія</b>	<b>3D-сканування</b>

Вартість обладнання	Висока	Низька або середня	Висока
Швидкість збору даних	Помірна	Висока	Середня
Швидкість обробки	Тривала	Середня	Тривала
Точність	Дуже висока	Висока	Дуже висока
Портативність	Обмежена	Висока	Середня
Доступність обладнання	Складна	Легкодоступна	Складна
Кваліфікація операторів	Висока	Середня	Висока
Використання у віддалених зонах	Ускладнене	Легке	Ускладнене

Таким чином, фотограмметрія є найкращим вибором для проектів, які потребують швидкого результату за доступною ціною та з мінімальними технічними вимогами. Лазерне та 3D-сканування, хоч і надають більшу точність, є дорожчими і складнішими у використанні, тому вони підходять для проектів з більшим бюджетом та складними архітектурними об'єктами.

### 2.3 Наземна фотограмметрія: переваги, види та правила застосування

Фотограмметрія забезпечує високу точність відтворення об'єктів завдяки математичному розрахунку координат точок на основі двовимірних зображень, отриманих з різних точок зйомки. Основним принципом є триангуляція, яка дозволяє визначити просторові координати точки за кількома зображеннями. Це досягається через обчислення положення точки в просторі відносно відомих координат камер і фокусної відстані.

$$X, Y, Z - f\left(\frac{p \cdot s}{d}\right)$$

- $X, Y, Z$  — просторові координати точки,

- $p$  — точність піксельного вимірювання на зображенні,
- $s$  — відстань від камери до об'єкта,
- $d$  — базова лінія (відстань між точками зйомки).

**Розрахунок масштабу та похибки:** Масштаб цифрової моделі залежить від фокусної відстані камери і відстані до об'єкта. Чим більша фокусна відстань, тим більша деталізація об'єкта. Формула для розрахунку похибки:

$$E = \frac{\delta}{d}$$

де:

$E$  — відносна похибка,

$\delta$  — відстань до об'єкта,

$d$  — базова лінія.

Приклад розрахунку точності: Для архітектурного об'єкта на відстані 10 м, при роздільній здатності камери 20 Мп та базовій лінії 2 м, можна досягти точності вимірювання деталей на рівні 1–3 мм. Це дозволяє створювати точні тривимірні моделі, які зберігають деталі поверхонь і текстури об'єктів.

**Лазерне сканування: приклади обладнання та точність**

Лазерне сканування є альтернативою фотограмметрії, яка забезпечує більш високу точність, але зазвичай є дорожчою. Лазерні сканери використовують лазерний промінь для вимірювання відстаней до поверхні об'єкта з точністю до 0.5–2 мм, що робить їх незамінними при створенні моделей складних архітектурних об'єктів та скульптур. Деякі з найпопулярніших лазерних сканерів включають:

Faro Focus — забезпечує точність до 1 мм, компактний та мобільний. Використовується для сканування внутрішніх та зовнішніх просторів, зокрема для архітектурних об'єктів.

Leica BLK360 — легкий та високоточний сканер з точністю до 2–3 мм. Підходить для проектів, де потрібна мобільність та висока деталізація, зокрема для складних поверхонь та археологічних пам'яток.

Trimble X7 — точність до 1–2 мм, часто використовується для масштабних археологічних та архітектурних об'єктів. Його особливість — швидкість роботи та інтегровані інструменти для автоматичного калібрування.

Лазерне сканування є особливо ефективним для складних архітектурних об'єктів, де потрібна максимальна деталізація, що доповнює фотограмметрію. Наприклад, для реконструкції фасадів історичних будівель лазерне сканування дозволяє отримати точні вимірювання, які є основою для відтворення об'єктів у цифровому середовищі.

#### Прилади для фотограмметрії: безпілотники та камери

У фотограмметрії використовуються різноманітні камери та безпілотні літальні апарати для отримання зображень з різних ракурсів та висот, що особливо важливо для повітряної фотограмметрії. Серед поширеного обладнання:

Canon EOS R5 — повнокадрова камера з високою роздільною здатністю, що використовується для наземної фотограмметрії. Вона дозволяє отримувати детальні зображення, необхідні для цифровізації архітектурних об'єктів.

DJI Phantom 4 RTK — безпілотник для повітряної фотограмметрії, обладнаний RTK-модулем для високої точності позиціонування. Використовується для зйомки великих територій та об'єктів, таких як археологічні комплекси або урбаністичні ландшафти.

Nikon D850 — ще одна високоякісна камера для наземної фотограмметрії, яка забезпечує високу деталізацію та точність у зйомці об'єктів культурної спадщини.

Це обладнання дозволяє отримати необхідні дані для подальшого створення тривимірних моделей та цифрових копій об'єктів.

Приклади реальних проектів з використанням фотограмметрії та лазерного сканування

Софійський собор у Києві — цифрове збереження мозаїк та стінописів за допомогою наземної фотограмметрії. Фахівці використовували камери високої роздільної здатності для зйомки всіх елементів інтер'єру собору. Отримані моделі дозволяють аналізувати стан об'єктів та зберігати їх для майбутніх досліджень.

Колізей у Римі — комплексне використання лазерного сканування і фотограмметрії для реконструкції внутрішніх та зовнішніх частин споруди. Лазерне сканування дозволило створити модель, що зберігає точні виміри архітектурних деталей, тоді як фотограмметрія забезпечила високу деталізацію текстур поверхонь.

Мачу-Пікчу в Перу — цифрове збереження археологічного комплексу за допомогою повітряної фотограмметрії. Дрони використовувалися для зйомки території з різних висот і ракурсів, що дало змогу відтворити структуру об'єкта у цифровому середовищі з високою точністю.

Печери Могай у Китаї — використання лазерного сканування для документування буддійських печерних храмів. Лазерне сканування забезпечило детальне відтворення скульптур і рельєфів, що допомогло створити архів, який зберігає оригінальний стан об'єктів для майбутніх поколінь.

Фотограмметрія і лазерне сканування є взаємодоповнюючими методами для створення цифрових копій об'єктів культурної спадщини. Фотограмметрія є

економічно доступним методом, що дозволяє отримати високоякісні моделі, проте вимагає більше часу для збирання та обробки зображень. Лазерне сканування є більш швидким і забезпечує надзвичайну точність, але має високі витрати. Використання цих методів у комбінації дозволяє створювати максимально точні та деталізовані моделі, що підходять для довготривалого збереження та дослідження культурних об'єктів.

Однією з ключових переваг наземної фотограмметрії є її доступність. Оскільки для проведення зйомок використовуються звичайні цифрові камери, а не дороге обладнання, цей метод може застосовуватися навіть у невеликих дослідницьких проектах. Крім того, для роботи не обов'язково потрібні спеціально навчені оператори, оскільки базові навички фотографії та знання відповідного програмного забезпечення дозволяють отримати якісні результати [66].

Наземна фотограмметрія також є відносно швидким методом збору даних, особливо у порівнянні з лазерним скануванням. Для більшості об'єктів культурної спадщини достатньо зробити серію знімків з різних кутів, які згодом обробляються в програмі для створення тривимірної моделі. Це дає можливість швидко отримати точну інформацію про стан об'єкта та використовувати її для подальшого аналізу чи документування [67].

Існує кілька видів наземної фотограмметрії, які відрізняються залежно від методу збору знімків та подальшої обробки даних. До основних належать: близька фотограмметрія, планова фотограмметрія та панорамна фотограмметрія. Кожен із цих методів має свої особливості та застосовується залежно від вимог до точності та складності об'єкта [68].

Близька фотограмметрія використовується для документування архітектурних деталей або невеликих об'єктів, таких як мозаїки чи барельєфи. Вона дозволяє створювати надзвичайно детальні тривимірні моделі, які відтворюють кожну дрібницю об'єкта. Цей вид фотограмметрії зазвичай

застосовується у реставраційних проектах, де важлива точність відтворення кожного елемента [69].

Планова фотограмметрія використовується для документування більших об'єктів, таких як будівлі або археологічні пам'ятки. У цьому випадку камери розташовуються на фіксованій відстані від об'єкта, і знімки робляться з різних точок навколо нього. Цей метод дозволяє отримати загальний вигляд об'єкта та використовувати його для досліджень або створення загальних карт місцевості [70].

Панорамна фотограмметрія застосовується для документування великих територій або складних архітектурних споруд, де важливо отримати повний огляд об'єкта з усіх боків. Використання панорамних камер або спеціальних пристроїв для зйомки дозволяє створювати тривимірні моделі великих об'єктів без втрати якості або точності. Цей метод часто використовується для створення віртуальних турів або археологічних досліджень [71].

Основними правилами застосування наземної фотограмметрії є дотримання правильного кута зйомки, забезпечення рівномірного освітлення об'єкта та використання високоякісних камер для отримання чітких знімків. Зйомка повинна проводитися з різних точок, щоб отримати максимальну кількість інформації про об'єкт. Важливо також дотримуватися вимог до калібрування камер, щоб мінімізувати похибки при створенні тривимірної моделі [72].

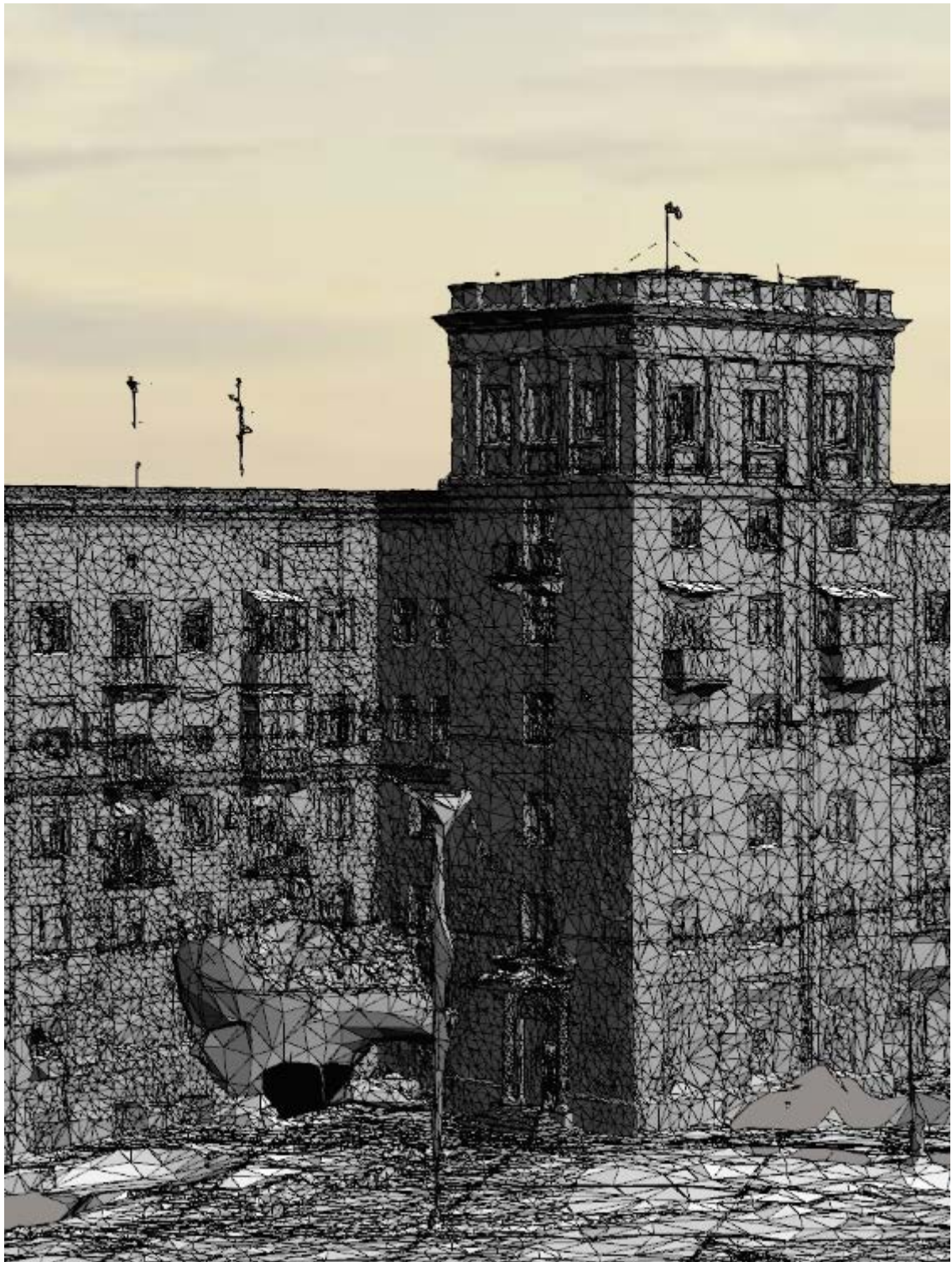


Рис. 2.1. Приклад наземної фотограмметрії для документування архітектурної пам'ятки.

Ще одним важливим аспектом є правильна обробка отриманих даних. Програмне забезпечення для фотограмметрії дозволяє автоматично об'єднувати знімки в тривимірну модель, але точність результату залежить від якості вихідних зображень та коректного налаштування параметрів обробки. Сучасні

програми, такі як Reality Capture або Agisoft Metashape, мають потужні алгоритми для обробки великих обсягів даних та надають можливість детально налаштувати процес створення моделей [73].

Наземна фотограмметрія є також зручним інструментом для збереження об'єктів культурної спадщини, що знаходяться під загрозою зникнення. Її мобільність та доступність дозволяють швидко документувати об'єкти, які можуть бути пошкоджені або зруйновані через природні катастрофи чи людський вплив. Це робить її важливим інструментом для збереження культурної спадщини в умовах сучасних викликів [74].

З огляду на всі ці переваги, наземна фотограмметрія є одним з найефективніших і найшвидших методів для цифровізації культурної спадщини. Вона поєднує в собі простоту, доступність та високу точність, що робить її особливо корисною для проектів з обмеженими фінансовими ресурсами або для польових досліджень у віддалених місцях.

Продовжуючи аналіз наземної фотограмметрії, важливо підкреслити її застосування в різних проектах, що стосуються збереження культурної спадщини. Високий рівень точності, який забезпечується при використанні цього методу, дозволяє відтворювати об'єкти до найдрібніших деталей, що є вирішальним для їх подальшого реставраційного використання. Особливо важливим є те, що наземна фотограмметрія може використовуватися для документування об'єктів з обмеженим доступом, де традиційні методи зйомки є неможливими або надто дорогими [75].

В умовах сучасних досліджень культурної спадщини наземна фотограмметрія дозволяє створювати цифрові архіви культурних об'єктів, що є важливою частиною світової практики. Цифрові моделі зберігаються в електронному форматі і можуть бути доступні для науковців з усього світу, що сприяє глобалізації досліджень та обміну даними. Окрім того, такі архіви можуть бути використані для відтворення об'єктів у разі їх пошкодження або знищення [76].

Щодо правил використання наземної фотограмметрії, існує декілька основних вимог, яких необхідно дотримуватися для отримання якісних результатів. Наприклад, зйомка об'єкта повинна здійснюватися з фіксованими параметрами для уникнення спотворень, а також необхідно дотримуватися правил освітлення для забезпечення рівномірності зображення. Крім того, важливо контролювати масштаб під час обробки зображень, щоб отримати точні розміри об'єкта [77].

Наземна фотограмметрія є особливо цінною у випадках, коли необхідно швидко задокументувати об'єкт перед його можливим руйнуванням. Наприклад, у проектах збереження архітектурної спадщини у зонах, що піддаються природним катаклізмам, фотограмметрія стала одним з основних методів документування. Це дозволяє фахівцям мати точну копію об'єкта навіть у випадку його повного руйнування, що є важливим для майбутніх реконструкцій [78].

Таким чином, наземна фотограмметрія поєднує в собі багато переваг, що роблять її одним з найефективніших методів цифрового документування та збереження культурної спадщини. Вона забезпечує доступність, високу точність і відносно невелику вартість у порівнянні з іншими методами, що робить її незамінним інструментом у сучасних дослідницьких проектах.

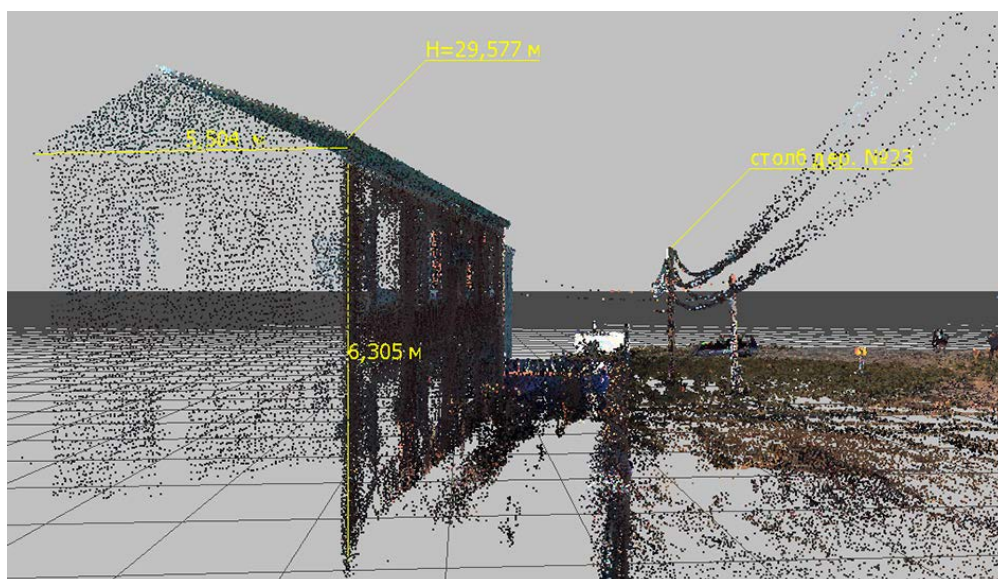


Рис. 2.2. Хмара точок тривимірної моделі, створена за допомогою наземної фотограмметрії для реставраційних робіт.

## **2.4 Порівняння наземної фотограмметрії з іншими методами: висновки та обґрунтування вибору**

Наземна фотограмметрія, будучи одним із провідних методів цифрового збереження культурної спадщини, значно відрізняється від інших технологій, таких як лазерне сканування, 3D-сканування, або використання дронів для повітряної зйомки. Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки, і вибір між ними часто залежить від специфіки об'єкта, умов зйомки, доступу до обладнання та бюджету проєкту. У цьому підрозділі ми розглянемо ключові аспекти порівняння наземної фотограмметрії з іншими методами, а також зробимо висновки щодо її вибору.

Перш за все, наземна фотограмметрія є одним із найбільш доступних методів для збереження культурної спадщини. Оскільки для її реалізації часто потрібна лише камера високої роздільної здатності та програмне забезпечення для обробки зображень, вартість проведення зйомки є значно нижчою порівняно з лазерним скануванням, яке потребує спеціалізованого і дуже дорогого обладнання. Це робить наземну фотограмметрію особливо привабливою для невеликих або обмежених бюджетом проєктів [79].

Що стосується точності та деталізації, наземна фотограмметрія має певні обмеження порівняно з лазерним скануванням. Лазерне сканування забезпечує більш високу точність і здатне знімати складні поверхні з найдрібнішими деталями, зокрема, на масштабі до мікрометрів. Це робить його незамінним для зйомки дуже складних об'єктів, таких як скульптури або архітектурні елементи зі складною геометрією. Однак фотограмметрія дозволяє досягти високої точності (до кількох міліметрів), що цілком достатньо для багатьох проєктів збереження культурної спадщини, зокрема, для архітектурних об'єктів або мозаїк [80].

Повітряна зйомка за допомогою дронів є ще одним методом, що часто порівнюється з наземною фотограмметрією. Дрони дозволяють охоплювати великі території та отримувати зображення важкодоступних місць, таких як вершини архітектурних пам'яток або об'єкти, що знаходяться у важкопрохідних ландшафтах. Проте цей метод вимагає використання спеціалізованих дронів з високоякісними камерами, а також погодних умов, що дозволяють безпечно проведення зйомок. Наземна фотограмметрія, навпаки, є менш залежною від погодних умов і може бути використана в обмежених просторах [81].

Щодо швидкості обробки даних, лазерне сканування зазвичай забезпечує швидший результат у вигляді точних 3D-моделей, оскільки дані автоматично обробляються в реальному часі під час зйомки. Однак цей метод вимагає подальшої ретельної обробки даних для очищення від шумів і артефактів. Наземна фотограмметрія потребує більше часу на збирання даних, оскільки фотографії повинні охоплювати весь об'єкт з різних кутів і відстаней. Після цього настає етап обробки в спеціалізованому програмному забезпеченні, що може зайняти більше часу. Проте, для багатьох проєктів збереження культурної спадщини ця додаткова витрата часу є виправданою, оскільки фотограмметрія є економічно вигіднішою [82].

З точки зору мобільності, наземна фотограмметрія є надзвичайно гнучкою технологією. Вона може бути реалізована навіть у віддалених регіонах або зонах з обмеженим доступом, оскільки камери та інше обладнання є відносно легкими і можуть транспортуватися без складних логістичних заходів. Лазерні сканери, навпаки, є важчими і більш громіздкими, що ускладнює їх використання в польових умовах, особливо у важкодоступних місцях [83].

При порівнянні з іншими методами також варто врахувати аспект доступності технологій. Наприклад, лазерне сканування вимагає спеціальної підготовки персоналу для роботи з обладнанням, а також навичок обробки отриманих даних. Водночас фотограмметрія є доступнішою для широкого кола фахівців, оскільки для її реалізації потрібно мінімум спеціальних знань. Багато

програмних рішень для обробки фотограмметричних даних є зручними для користувачів і можуть бути освоєні навіть непрофесійними користувачами [84].

Отже, основні переваги наземної фотограмметрії в порівнянні з іншими методами полягають у її доступності, відносно низькій вартості та гнучкості. Вона є ідеальним варіантом для проектів з обмеженим бюджетом, а також для об'єктів, які потребують детального, але не надто глибокого документування. У той час як лазерне сканування і повітряна зйомка можуть забезпечити більшу точність або охопити великі території, наземна фотограмметрія залишається одним із найбільш універсальних і ефективних методів для збереження об'єктів культурної спадщини [85].

Таблиця 2.3

Порівняння методів цифрового збереження за основними характеристиками.

Метод	Точність	Вартість	Швидкість обробки	Доступність обладнання	Мобільність
Наземна фотограмметрія	Середня (до 5 мм)	Низька	Помірна	Висока	Висока
Лазерне сканування	Висока (до 1 мм)	Висока	Висока	Низька	Низька
Повітряна зйомка дронами	Середня	Висока	Помірна	Середня	Висока

Основні відмінності між методами документування об'єктів культурної спадщини.

Метод	Переваги	Недоліки
Наземна фотограмметрія	Низька вартість, мобільність, доступність	Обмежена точність порівняно з лазерним скануванням
Лазерне сканування	Висока точність, швидкість обробки	Висока вартість, низька мобільність
Повітряна зйомка дронами	Можливість охоплення великих територій	Висока вартість, залежність від погодних умов

Наземна фотограмметрія є одним із найефективніших методів цифрового збереження об'єктів культурної спадщини, особливо у порівнянні з іншими методами, такими як лазерне сканування або повітряна зйомка дронами. Одним із ключових факторів, що впливають на вибір цього методу, є його економічність. Зазвичай для виконання фотограмметрії потрібна лише високоякісна камера та спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє значно скоротити витрати на проєкт. Це робить наземну фотограмметрію доступною навіть для невеликих культурних установ та дослідників з обмеженими фінансовими ресурсами. У той час як лазерне сканування потребує великих інвестицій у обладнання та фахівців, фотограмметрія дозволяє досягати порівняльних результатів за значно нижчих витрат.

Однак, одним з основних аргументів на користь вибору наземної фотограмметрії є її мобільність та гнучкість у різних умовах зйомки. Лазерне сканування вимагає складного обладнання та ретельної логістики, особливо в місцях з обмеженим доступом або у важкодоступних зонах, тоді як фотограмметрія може бути проведена навіть у польових умовах без значних витрат часу та ресурсів на підготовку обладнання. Камери для фотограмметрії є компактними та легко транспортуються, що дозволяє використовувати їх у

широкому спектрі ситуацій — від зйомки невеликих артефактів до великих архітектурних комплексів.

Щодо точності, то лазерне сканування, безумовно, забезпечує вищий рівень деталізації, особливо для об'єктів із складною геометрією, таких як скульптури або архітектурні елементи з тонкими декоративними деталями. Проте наземна фотограмметрія демонструє достатній рівень точності для більшості завдань збереження культурної спадщини. Для багатьох архітектурних та археологічних об'єктів точність, яка досягається за допомогою фотограмметрії (до кількох міліметрів), є цілком прийнятною. Крім того, перевагою фотограмметрії є можливість створення кольорових текстурованих 3D-моделей, що дозволяє зберігати візуальну інформацію про об'єкт у більш реалістичному форматі.

Ще одним важливим фактором є доступність програмного забезпечення для фотограмметрії. На ринку існує безліч програмних рішень, таких як Reality Capture, Agisoft Metashape та інші, які дозволяють обробляти отримані зображення та створювати 3D-моделі навіть на звичайному комп'ютерному обладнанні. Лазерне сканування потребує спеціальних програмних комплексів та обробки великих обсягів даних, що робить його менш доступним для широкого кола користувачів. Таким чином, фотограмметрія є більш демократичним методом, доступним не лише для великих наукових установ, але й для окремих дослідників та невеликих організацій.

У контексті швидкості обробки даних лазерне сканування зазвичай надає результат у вигляді точних 3D-моделей у реальному часі під час зйомки, проте подальша обробка може бути досить тривалою та вимагати очищення даних від шумів та артефактів. Фотограмметрія, хоча й вимагає більше часу на збір зображень, все ж дозволяє досить швидко створювати тривимірні моделі за допомогою спеціалізованих програм. У випадку з лазерним скануванням, користувачі часто мають справу з великими обсягами даних, що вимагає додаткових ресурсів для їх зберігання та обробки.

Порівняння з іншими методами, такими як повітряна зйомка дронами, показує, що кожен метод має свої переваги залежно від ситуації. Наприклад, дрони є незамінними для охоплення великих територій або важкодоступних місць, таких як вершини архітектурних споруд. Однак цей метод значною мірою залежить від погодних умов і вимагає спеціалізованого обладнання та навичок управління дронами. Наземна фотограмметрія є менш залежною від зовнішніх чинників і може бути використана в будь-яких умовах, включаючи приміщення або підземні простори.

Наземна фотограмметрія також є незамінною при документуванні деталей об'єктів, які можуть бути втрачені через природні або антропогенні фактори. Наприклад, фотограмметрія дозволяє зберегти в цифровому форматі не лише загальні контури та структури об'єкта, але й його поверхню, текстури та кольори, що є важливим аспектом для збереження автентичності об'єкта. У порівнянні з іншими методами, фотограмметрія надає можливість більш детально задокументувати такі особливості об'єкта, як дрібні тріщини, зміни кольору або ерозійні процеси.

Незважаючи на деякі обмеження у точності, фотограмметрія дозволяє зберегти важливі візуальні аспекти об'єкта та відтворити їх у тривимірному форматі. У багатьох випадках ці переваги переважають над недоліками, особливо якщо йдеться про збереження культурної спадщини у віддалених регіонах або за умов обмеженого бюджету. Зважаючи на її доступність, фотограмметрія також сприяє широкому використанню цієї технології у навчальних цілях, зокрема для студентів та молодих фахівців у сфері архітектури та археології.

Важливо зазначити, що в майбутньому наземна фотограмметрія може бути інтегрована з іншими технологіями, такими як лазерне сканування або дрони, для створення комплексних рішень збереження культурної спадщини. Наприклад, комбіноване використання фотограмметрії та лазерного сканування дозволить отримати не лише точні моделі об'єктів, але й детальну текстуру та

кольори поверхонь, що забезпечить повноцінну документацію об'єктів для подальших реставраційних робіт або наукових досліджень.

Отже, наземна фотограмметрія є ефективним та доступним методом збереження культурної спадщини, який дозволяє створювати тривимірні моделі об'єктів з достатньою точністю та деталізацією. Вона має свої переваги порівняно з іншими методами, особливо в контексті вартості, доступності та мобільності. Зважаючи на ці характеристики, фотограмметрія є найкращим вибором для багатьох проектів, особливо для невеликих організацій або дослідників, що мають обмежені ресурси.

## **Висновок до розділу 2**

Розділ 2 присвячено теоретичному огляду методів цифровізації об'єктів культурної спадщини, їх порівнянню за різними характеристиками та обґрунтуванню вибору наземної фотограмметрії як ефективного способу цифровізації. Сучасні технології цифровізації, такі як лазерне сканування, 3D-сканування та фотограмметрія, надають можливість зберігати об'єкти спадщини у віртуальній формі для подальших досліджень та збереження.

Було розглянуто різні аспекти цифровізації, зокрема вартість, швидкість обробки та доступ до обладнання. У ході аналізу було виявлено, що наземна фотограмметрія є більш доступною за витратами, що робить її привабливою для малобюджетних проектів. Крім того, фотограмметрія забезпечує достатню точність для більшості потреб у збереженні культурної спадщини.

Наземна фотограмметрія має низку переваг, таких як можливість створення детальних 3D-моделей з мінімальними витратами на обладнання. Ця технологія дозволяє фіксувати стан об'єктів у різних умовах, зберігаючи їх у цифровому вигляді для архівування та подальшої обробки. Це робить її привабливим методом у порівнянні з іншими технологіями.

Порівняльний аналіз показав, що фотограмметрія надає значну точність зображення при відносно низьких затратах, що є важливим фактором для збереження об'єктів культурної спадщини. Досвід успішного застосування цієї технології за кордоном свідчить про її ефективність у збереженні різноманітних об'єктів.

Таким чином, розділ 2 підтверджує, що наземна фотограмметрія є оптимальним методом для цифровізації культурної спадщини, з огляду на її ефективність, вартість та доступність. Це дозволяє зробити висновок про доцільність застосування фотограмметрії як основного методу для реалізації проєктів у сфері збереження культурних об'єктів.

### Розділ 3

## ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОГРАМЕТРІЇ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконала		Теребейчик К.І			Використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження об'єктів культурної спадщини	Літ.	Арк.	Аркушів
							67	128
Керівник		Нестеренко О.В.				КНУБА, ГІСУТ, група ГСДм-23		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О			68			

## РОЗДІЛ 3.

### ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОГРАМЕТРІЇ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ

#### 3.1 Вибір об'єкта для фотограмметричного дослідження.

Вибір об'єкта для фотограмметричного дослідження є ключовим етапом, який впливає на подальший хід роботи, методи обробки, а також можливість застосування отриманих результатів. Основною метою цього етапу є визначення таких об'єктів культурної спадщини, для яких цифрове збереження матиме значну цінність як з точки зору збереження історії, так і з практичного боку. При виборі об'єкта враховуються такі фактори, як його культурна цінність, фізичний стан, можливість доступу для проведення зйомки та загальна складність об'єкта.

Висока культурна цінність об'єкта є одним з ключових критеріїв, оскільки фотограмметричне дослідження повинно в першу чергу сприяти збереженню важливих пам'яток. Наприклад, об'єкти архітектурної спадщини, які мають значення для певної історичної епохи або відображають унікальні особливості архітектурного стилю, потребують пріоритетної уваги. Часто це можуть бути історичні будівлі, які зберегли свою автентичність, або ж унікальні скульптури, які збереглися з античних часів.

Фізичний стан об'єкта також відіграє важливу роль. Зазвичай перевага надається тим пам'яткам, що знаходяться в ризикованих умовах – вони можуть бути пошкоджені природними факторами, руйнуватися під впливом часу чи людської діяльності. Наприклад, якщо об'єкт знаходиться в стані руйнування, створення його цифрової копії може допомогти зберегти його вигляд для майбутніх поколінь та бути корисним для проведення подальших реставраційних робіт.

Крім того, важливим аспектом є можливість доступу до об'єкта для зйомки. Іноді культурні об'єкти можуть розташовуватись у важкодоступних

місцях, що ускладнює процес зйомки. У таких випадках необхідно оцінити технічні можливості проведення фотограмметрії з обмеженим доступом. Для цього часто застосовуються додаткові технічні засоби, такі як дрони, що дозволяють отримати зображення з різних кутів без необхідності безпосереднього контакту з об'єктом.

Таблиця 3.1

Вибір об'єкта для фотограмметричного дослідження

Критерій вибору об'єкта	Опис
Важливість об'єкта	Оцінка культурної, історичної та наукової значущості об'єкта, його цінності для подальшого збереження та дослідження.
Фізичний стан об'єкта	Аналіз поточного стану об'єкта (пошкодження, зношеність), що впливає на необхідність його документування та збереження.
Доступність для зйомки	Оцінка можливості фізичного доступу до об'єкта, враховуючи розташування, умови освітлення та просторові обмеження.
Доступність необхідного обладнання	Наявність фотограмметричних та допоміжних засобів для забезпечення високоякісної зйомки.
Потенційне використання моделі	Визначення мети створення тривимірної моделі, наприклад, для збереження, реставрації, дослідження або використання в освітніх програмах.

Складність об'єкта з точки зору його форми, деталей та текстур також впливає на вибір. Більш складні об'єкти, з великою кількістю деталей, рельєфними поверхнями та численними елементами, потребують більш

детальної зйомки з різних кутів, що, в свою чергу, потребує більшого обсягу роботи. Водночас такі об'єкти часто створюють більше можливостей для фотограмметрії, оскільки їхня складність дозволяє відтворити дуже деталізовану 3D-модель, що цінно для дослідження.

Також враховується тип матеріалів, з яких створений об'єкт. Різні матеріали по-різному взаємодіють зі світлом, що впливає на процес зйомки. Наприклад, гладкі поверхні, як-от мармур чи метал, можуть відбивати світло, що створює труднощі у фотограмметрії, тоді як текстуровані поверхні, як камінь або дерево, краще піддаються обробці.

Під час вибору об'єкта для фотограмметричного дослідження враховується також його розмір. Великі об'єкти потребують більшого часу для зйомки та обробки, що може ускладнити процес дослідження. Однак при наявності необхідного технічного обладнання це може бути вирішено за допомогою сегментації об'єкта на частини, які обробляються окремо, а потім об'єднуються у загальну модель.

Окремо увага приділяється оточенню об'єкта. Якщо об'єкт розташований у густонаселеному місці, це може обмежити можливості зйомки через наявність перешкод, таких як транспорт чи люди. У таких випадках необхідно планувати зйомку в певний час, коли об'єкт буде доступнішим для дослідження.

Ще одним аспектом є наявність попередніх досліджень об'єкта. Якщо об'єкт вже був задокументований, фотограмметрія може надати можливість порівняти його сучасний стан зі станом у минулому. Це допомагає виявити зміни, які відбулися з об'єктом, а також оцінити ефективність попередніх заходів із збереження та реставрації.

Таблиця 3.2

Опис методики зйомки та обробки фотограмметричних даних

Етап робіт	Опис
------------	------

Підготовка обладнання	Вибір камери, об'єктивів та інших інструментів з урахуванням особливостей об'єкта, забезпечення надійності роботи техніки та оптимальних параметрів зйомки.
Розробка плану зйомки	Визначення оптимальних точок зйомки, кутів огляду та кількості зображень для охоплення всіх деталей об'єкта.
Зйомка об'єкта	Виконання серії знімків з різних ракурсів, контроль якості фотографій та усунення потенційних дефектів під час зйомки.
Обробка зображень	Використання спеціального програмного забезпечення для обробки фотографій, корекція кольорів та видалення непотрібних елементів.
Побудова тривимірної моделі	Використання фотограмметричних програм для об'єднання зображень у єдину тривимірну модель об'єкта.

Оцінка умов освітлення також є важливим чинником, адже природне освітлення може змінюватися протягом дня, що впливає на якість зображень. Ідеальні умови освітлення, такі як розсіяне світло, забезпечують рівномірне покриття об'єкта і зменшують ризик появи тіней, що можуть спотворити кінцевий результат.

Таким чином, вибір об'єкта для фотограмметричного дослідження є багатогранним процесом, що вимагає врахування численних факторів для отримання якісних результатів. Це не лише сприяє збереженню культурної спадщини, але й дозволяє створити детальну документацію, що може бути корисною для подальших досліджень та реставраційних заходів.

### **3.2 Опис методики зйомки та обробки фотограмметричних даних**

Методика зйомки та обробки фотограмметричних даних складається з кількох основних етапів, кожен з яких вимагає особливої уваги для досягнення точності та деталізації. Вибір правильної методики забезпечує високоякісне відтворення об'єкта у вигляді тривимірної моделі. Процес починається з ретельного планування зйомки, де визначаються положення камери, умови освітлення та параметри зйомки.

Таблиця 3.3

Створення тривимірної моделі об'єкта: етапи та програмне забезпечення

Етап створення моделі	Опис
Підготовка даних	Імпорт зображень у програмне забезпечення, попередня обробка та аналіз якості для забезпечення оптимальних результатів.
Процес узгодження точок	Виявлення та поєднання ключових точок на знімках для формування точної геометрії об'єкта.
Створення сітки	Побудова полігональної сітки для відображення форми об'єкта з максимальною точністю.
Накладання текстур	Застосування кольорів та текстур з оригінальних зображень для покращення реалізму моделі.
Остаточна обробка	Фінальна корекція моделі, перевірка на відповідність реальному об'єкту, збереження моделі у відповідному форматі.

Першим етапом є підготовка обладнання. Використання професійної камери з високою роздільною здатністю, штативів, дронів або інших допоміжних інструментів допомагає досягти якісних зображень. Під час зйомки важливо уникати вібрацій та змін кута огляду, що забезпечується стабільним кріпленням камери.

Наступний етап – визначення точок зйомки. Для побудови точної моделі важливо охопити об'єкт з різних ракурсів, щоб уникнути сліпих зон. Камера повинна розташовуватися таким чином, щоб між знімками був невеликий ступінь перекриття, зазвичай 60-80%. Це забезпечує необхідну інформацію для відтворення просторових параметрів об'єкта.

Після визначення позицій зйомки починається сам процес фотографування. Для досягнення рівномірного освітлення можуть використовуватися додаткові джерела світла або рефлектори. Це дозволяє зменшити тіні та уникнути надмірних відблисків, що можуть негативно вплинути на якість моделі.

Особливу увагу слід приділити фокусуванню та експозиції. Важливо забезпечити максимальну різкість та деталізацію зображень, тому камера повинна бути налаштована на точне фокусування на об'єкті. Крім того, налаштування експозиції допомагає зберегти деталі як у світлих, так і в темних зонах зображення.

Завершивши зйомку, переходять до обробки отриманих зображень за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для фотограмметрії, такого як Agisoft Metashape, Pix4D або RealityCapture. На першому етапі обробки відбувається імпорт фотографій у програму, де вони проходять попередню обробку, яка включає корекцію кольорів, вирівнювання та оптимізацію якості.

Наступним етапом є процес узгодження точок. Програмне забезпечення автоматично знаходить спільні точки на зображеннях, які знімалися з різних позицій. Завдяки цим спільним точкам програма будує базову каркасну модель об'єкта, визначаючи його форму та просторове розташування.

Далі проходить етап побудови щільної хмари точок. Щільна хмара дозволяє досягти високої деталізації моделі, оскільки кожна точка хмари відповідає окремому елементу поверхні об'єкта. На основі цієї хмари будуються детальні геометричні характеристики об'єкта, що важливо для точності моделі.

## Аналіз отриманої моделі та її використання для збереження і реставрації

Етап аналізу та використання	Опис
Аналіз якості моделі	Оцінка точності відображення об'єкта, перевірка на наявність дефектів та спотворень, що можуть вплинути на подальше використання.
Порівняння з оригіналом	Порівняння моделі з реальним об'єктом для перевірки відповідності та надійності моделі.
Застосування в реставрації	Використання моделі для аналізу та реконструкції пошкоджених частин об'єкта, допомога у процесах реставрації.
Архівування та збереження	Збереження моделі в архівах для довготривалого зберігання та можливості доступу до інформації у майбутньому.
Використання в освітніх проєктах	Інтеграція моделі у віртуальні виставки та освітні програми для популяризації культурної спадщини серед широкої аудиторії.

Після створення щільної хмари точок відбувається етап створення трикутної сітки, яка формує поверхню моделі. Ця сітка складається з численних трикутників, що з'єднують точки і створюють текстуровану поверхню об'єкта. Трикутна сітка дозволяє досягти реалістичності та точного відтворення форм.

Далі до сітки застосовуються текстури. Програмне забезпечення автоматично накладає зображення, зроблені під час зйомки, на поверхню моделі. Це дозволяє відтворити кольори та текстури об'єкта, створюючи реалістичну копію. На цьому етапі важливо забезпечити правильне накладення, щоб уникнути спотворень.

Після накладення текстур проводиться перевірка та калібрування моделі. Вона включає аналіз точності узгодження точок, деталізації текстури та виявлення можливих спотворень. Якщо необхідно, моделі вносяться корективи для підвищення її точності.

Завершальним етапом є експорт моделі в необхідний формат для подальшого використання. Зазвичай моделі експортуються у форматах OBJ або STL, що дозволяє застосовувати їх для архівування, візуалізації або друку на 3D-принтері. Модель може використовуватися в архітектурних проєктах, для наукових досліджень або реставраційних робіт.

Додатково, готову модель можна інтегрувати в систему доповненої реальності або VR, що дозволяє створити інтерактивний досвід для користувачів. Це може бути корисним у музеях або для навчальних цілей, адже дозволяє взаємодіяти з об'єктом у віртуальному середовищі.

Таким чином, методика зйомки та обробки фотограмметричних даних включає комплексний підхід, що охоплює як технічні аспекти зйомки, так і програмну обробку для створення реалістичної та точної 3D-моделі об'єкта. Це дозволяє зберігати та аналізувати культурну спадщину на високому рівні.

### **3.3 Створення тривимірної моделі об'єкта: етапи та програмне забезпечення**

Для створення тривимірної моделі об'єкта, особливо такого складного, як мозаїка, необхідно пройти кілька важливих етапів. Цей процес вимагає ретельного підходу, оскільки будь-яка неточність або дефект у знімках можуть суттєво вплинути на якість кінцевої моделі. Неприємність, яка виникла під час зйомки другої мозаїки через технічні проблеми з камерою, ускладнює завдання, тому важливо перевірити кожен крок процесу створення моделі, щоб мінімізувати потенційні помилки.

Перший етап – перевірка якості знімків. Оскільки під час зйомки могли виникнути технічні проблеми, необхідно переглянути всі фотографії другої мозаїки на наявність розмитостей, спотворень або дефектів освітлення. Кожне зображення має бути чітким і з гарним контрастом, адже це безпосередньо впливає на точність моделі.

Далі, якщо зображення відповідають мінімальним вимогам, відбувається імпорт фотографій у спеціалізоване програмне забезпечення для фотограмметрії. Для цього етапу зазвичай використовують програми, такі як Agisoft Metashape або RealityCapture. У цих програмах знімки організуються у вигляді набору даних, які потім обробляються для побудови 3D-моделі.

Наступний етап – узгодження точок, або автоматичне знаходження спільних точок на фотографіях, зроблених під різними кутами. Це один із найважливіших етапів, оскільки він створює базу для побудови моделі. У разі, якщо зображення другої мозаїки містять спотворення, програмне забезпечення може помилково об'єднати точки або навіть пропустити частини об'єкта.



Рис. 3.1. Створення тривимірної моделі мозаїки: від фотографій до 3D-реконструкції мозаїки "Вітер"

Після узгодження точок програма створює рідку хмару точок, яка представляє базову геометрію об'єкта. Це дозволяє перевірити, чи всі деталі мозаїки відображаються належним чином. Якщо є дефекти або пропуски, можна спробувати додати додаткові знімки або скоригувати розташування точок вручну.

Далі створюється щільна хмара точок, яка дозволяє отримати більш детальне відображення об'єкта. На цьому етапі важливо перевірити, чи всі елементи мозаїки (такі як дрібні деталі орнаменту) були захоплені і відтворені правильно. Якщо на знімках другої мозаїки є недоліки, програмне забезпечення може залишити певні зони менш деталізованими або взагалі прогавити їх.

Після цього етапу можна перейти до побудови сітки трикутників, яка утворює поверхню об'єкта. Трикутники з'єднують точки та формують первинну поверхню моделі. Цей етап дозволяє оцінити загальну форму мозаїки та її просторове відтворення. Якщо виникли проблеми з фотографіями, то певні ділянки сітки можуть бути неповними або містити спотворення.

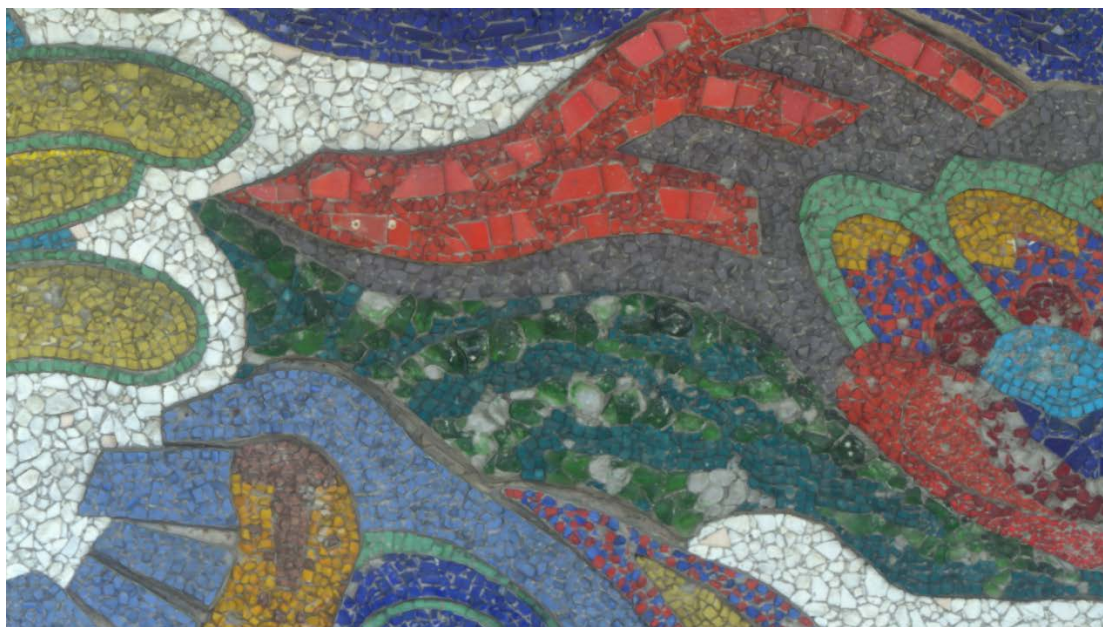


Рис. 3.2. Фрагмент цифрової моделі мозаїки для збереження та реставрації

Наступний етап – текстурування поверхні моделі, яке включає накладення зображень з камери на трикутну сітку. Програмне забезпечення використовує фотографії для створення кольорової текстури, що відповідає оригінальному вигляду об'єкта. Якщо якість фотографій другої мозаїки постраждала, текстури можуть мати неточності або розмитість, що вплине на загальний вигляд моделі.

Після текстуровання можна провести калібрування моделі. Це дозволяє виправити дрібні недоліки та забезпечити правильне відображення кольорів та деталей. У разі виявлення невідповідностей, таких як зміщення точок чи дефекти текстури, можна вручну виправити модель за допомогою інструментів програмного забезпечення.

Далі відбувається попередній аналіз та візуалізація моделі. На цьому етапі модель аналізується на предмет точності деталей і загального вигляду. Перевірка дозволяє виявити всі потенційні недоліки, особливо якщо друга мозаїка містить ділянки з низькою деталізацією через технічні проблеми під час зйомки.

Після аналізу та при необхідності виправлень модель експортується у відповідний формат, зазвичай це OBJ або STL, які підтримують використання моделі для подальшої роботи. Формат OBJ дозволяє зберігати текстури, що особливо важливо для відображення мозаїки.

Завершальним етапом є перевірка готової моделі на відповідність оригіналу. Зазвичай проводиться порівняння з оригінальними зображеннями для того, щоб переконатися, що модель точно відтворює всі особливості об'єкта. Особливо це важливо для другої мозаїки, оскільки проблеми з камерою могли вплинути на якість зображень.

Якщо модель повністю відповідає вимогам, її можна використовувати для подальших досліджень або візуалізації. Також модель може бути використана для друку на 3D-принтері або створення інтерактивної візуалізації. Це відкриває можливості для застосування в наукових дослідженнях або навіть для створення віртуальних виставок.

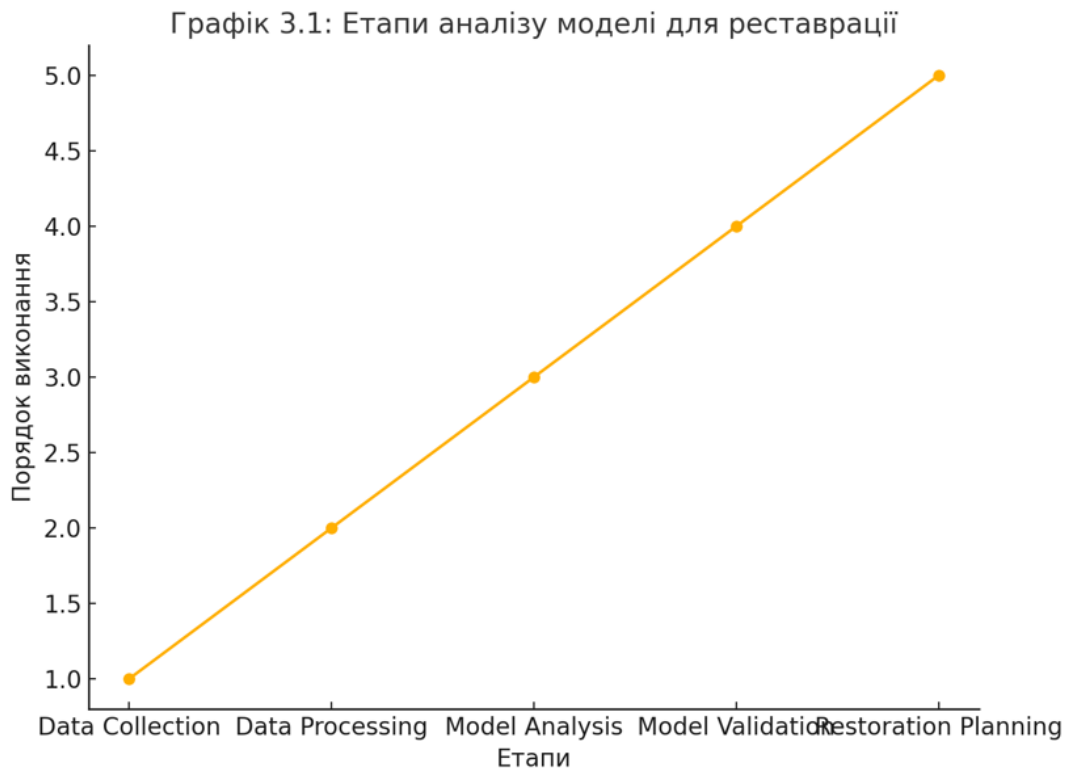
Таким чином, процес створення тривимірної моделі мозаїки, навіть за умов технічних труднощів, є важливим етапом у документуванні та дослідженні культурної спадщини, що забезпечує високу точність та реалістичність кінцевого продукту.

### **3.4 Аналіз отриманої моделі та її використання для збереження і реставрації**

Аналіз тривимірної моделі є важливим етапом, який допомагає оцінити точність і деталізацію відтворення об'єкта. Перш за все, модель аналізується на наявність точок або ділянок з низькою деталізацією, які можуть вплинути на загальну точність. Це дозволяє виявити можливі проблеми на етапі зйомки або обробки, такі як недостатня чіткість чи освітлення. У випадку з мозаїкою, деталі орнаменту є критичними, тому особливу увагу приділяють точності відображення дрібних елементів.

Одним з важливих аспектів аналізу є порівняння моделі з оригіналом. Це допомагає виявити будь-які зміщення або спотворення, які можуть виникнути в процесі зйомки та обробки. Якщо модель відповідає оригіналу, її можна використовувати для подальших досліджень, збереження та реставрації, зокрема для збереження інформації про стан мозаїки на момент зйомки.

Тривимірна модель є важливим інструментом для документування культурної спадщини. Вона дозволяє зберегти точний вигляд об'єкта, що є цінним для архівування та вивчення з плином часу. Для реставрації це особливо важливо, оскільки наявність точної моделі дозволяє виявити зміни в об'єкті, які можуть виникнути через зовнішні чинники, такі як вологість, температура чи механічні пошкодження.



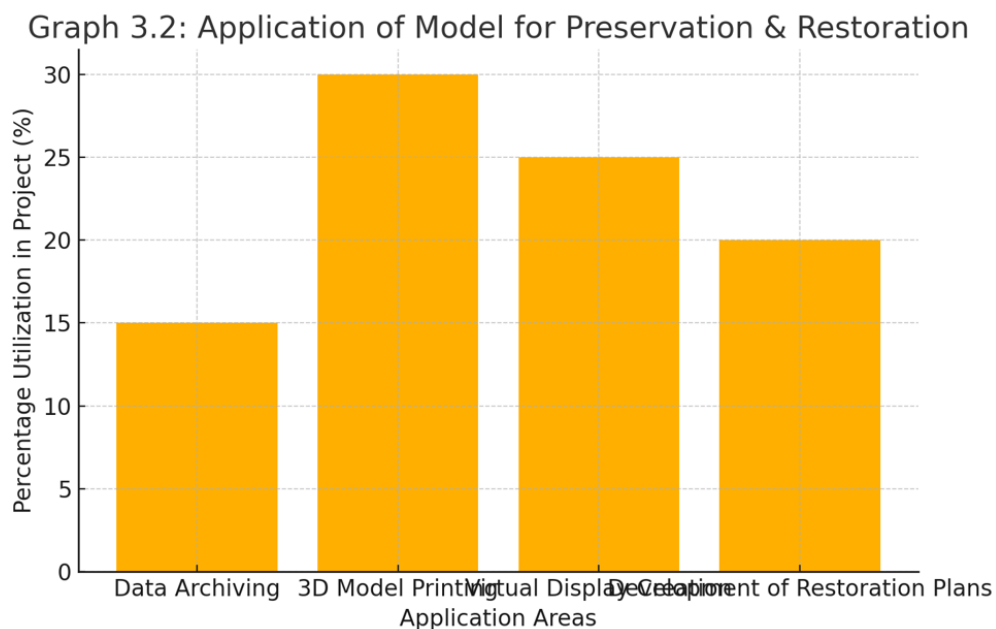
Графік 3.1: Етапи аналізу моделі для реставрації

Детальна тривимірна модель може також допомогти у відновленні пошкоджених частин об'єкта. Якщо деякі елементи мозаїки руйнуються, модель дозволяє віртуально реконструювати їх, базуючись на наявних даних. Це може бути корисним для реставраторів, які потребують максимальної точності у відтворенні відсутніх фрагментів.

Крім того, модель може використовуватися для моніторингу змін об'єкта з часом. Періодичне порівняння моделей, зроблених у різні моменти, допомагає відстежувати процеси зносу і пошкоджень. Це дозволяє вчасно виявити ділянки, які потребують негайного втручання, що сприяє довготривалому збереженню об'єкта.

Завдяки високій точності фотограмметрії, отримана модель може бути використана для створення цифрових копій об'єкта, які зберігаються в архівах музеїв або наукових установ. Це особливо корисно для об'єктів, які важко зберегти у фізичному вигляді. Цифрові копії можуть бути доступними для дослідників по всьому світу, що розширює доступ до культурної спадщини.

Тривимірна модель також може бути використана в освітніх та просвітницьких проєктах. Її можна застосувати для створення інтерактивних виставок або віртуальних турів, що дозволяє широкій аудиторії вивчати та оцінювати культурні об'єкти. Це стає особливо актуальним у контексті сучасних технологій та віртуальної реальності.



Графік 3.2: Використання моделі для збереження та реставрації

Ще одним аспектом використання моделі є планування реставраційних робіт. Завдяки точності фотограмметричної моделі, реставратори можуть точно визначити ділянки, які потребують відновлення, і спланувати роботи безпосередньо на основі моделі. Це знижує ризики та дозволяє ефективніше використовувати ресурси.

Фотограмметрична модель також може бути інтегрована в системи контролю стану об'єктів. Це дозволяє автоматично відстежувати зміни та попереджати про необхідність реставраційних заходів. Така система може стати важливим інструментом для музеїв та інших установ, що займаються збереженням культурної спадщини.

Отримана модель слугує цінним ресурсом для майбутніх наукових досліджень, надаючи дослідникам можливість проводити аналізи без

необхідності фізичного доступу до об'єкта. Це не лише сприяє збереженню об'єкта, але й допомагає розширити знання про техніку, матеріали та історичні аспекти створення мозаїки.

### 3.5 Практичні рекомендації щодо використання фотограмметрії для майбутніх проєктів

Однією з головних рекомендацій є ретельне планування процесу зйомки. Важливо врахувати всі особливості об'єкта, такі як форма, текстура, освітлення та доступність до різних його частин. Ретельне планування дозволяє уникнути неточностей і проблем, які можуть виникнути на етапі обробки даних.

Другим важливим моментом є вибір відповідного обладнання. Для отримання якісних зображень варто використовувати камери з високою роздільною здатністю та стабільною оптикою. У деяких випадках може знадобитися спеціальне освітлення або навіть дрони для зйомки важкодоступних об'єктів. Технічні параметри камери також мають значення, особливо якщо зйомка виконується в умовах слабкого освітлення.

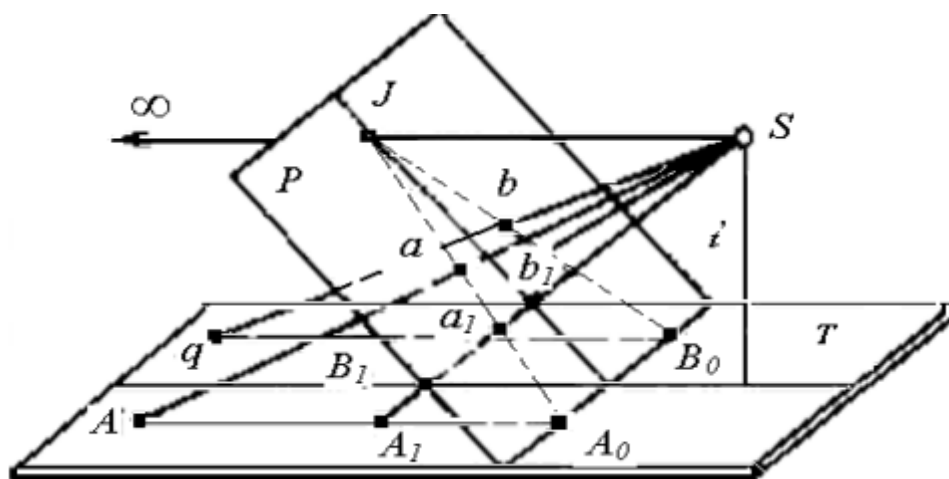


Рис. 3.3: "Візуалізація точності фотограмметричної моделі на етапах зйомки та обробки"

Під час зйомки потрібно дотримуватися правильного кута і відстані до об'єкта. Це допоможе уникнути спотворень і забезпечить рівномірне охоплення

всіх частин об'єкта. Для складних об'єктів, таких як мозаїка, рекомендовано використовувати кілька ракурсів, щоб охопити всі деталі.

Важливо також слідкувати за якістю знімків під час зйомки. Якщо є можливість, потрібно перевіряти фотографії на наявність розмитостей або дефектів. Це допоможе уникнути ситуації, коли на етапі обробки виявляється, що певні знімки непридатні для використання.

Рекомендовано використовувати сучасне програмне забезпечення для фотограмметрії, таке як Agisoft Metashape або RealityCapture. Вони мають широкі можливості для обробки даних і дозволяють створювати точні моделі. Вибір програмного забезпечення залежить від складності проєкту та особливостей об'єкта.

Ще одним важливим аспектом є забезпечення безпеки та збереження отриманих даних. Знімки та готові моделі потрібно архівувати в надійних системах зберігання, щоб уникнути їх втрати. Це особливо важливо для культурних об'єктів, знімки яких можуть бути унікальними.

Рекомендується регулярно аналізувати отримані моделі та порівнювати їх з оригіналом. Це допомагає виявити можливі помилки або спотворення, які могли виникнути під час зйомки або обробки. Регулярний аналіз моделей дозволяє вчасно виявляти недоліки та вдосконалювати методику фотограмметрії.

Для майбутніх проєктів варто враховувати можливість створення регулярного моніторингу стану об'єктів за допомогою фотограмметрії. Це дозволить отримувати інформацію про стан об'єкта в реальному часі та забезпечувати швидке реагування на можливі пошкодження.

Також важливо підтримувати документообіг під час проєктів, що використовують фотограмметрію. Це означає фіксацію всіх етапів роботи: від

зйомки до обробки даних. Такий підхід дозволяє зберігати всі важливі параметри і бути готовим до відтворення проєкту в майбутньому.



Рис. 3.4: "Етапи оптимізації фотограмметричного процесу для різних типів об'єктів"

І нарешті, рекомендовано проводити навчання команди або залучених фахівців до використання фотограмметрії. Це сприяє підвищенню якості роботи та запобігає помилкам. Навчання може включати роботу з обладнанням, програмним забезпеченням і аналізом результатів, що забезпечить високу якість виконання проєктів у майбутньому.

### Висновок до розділу 3

У розділі 3 було продемонстровано значення та практичні аспекти застосування фотограмметрії для збереження культурної спадщини. Особливу увагу приділено вибору об'єкта дослідження, що є ключовим етапом, який визначає подальші методи обробки та можливості застосування результатів. Серед критеріїв вибору розглянуто культурну цінність об'єкта, його фізичний

стан, доступність для зйомки, складність конструкції, матеріали виготовлення та перспективи використання створеної тривимірної моделі. Цей процес дозволяє зосередитися на найважливіших об'єктах, які потребують пріоритетного документування.

Також у розділі детально висвітлено методика зйомки та обробки фотограмметричних даних. Цей процес охоплює підготовку обладнання, планування зйомки, створення фотографій з різних ракурсів, обробку зображень у спеціалізованому програмному забезпеченні та побудову тривимірної моделі. Особливо наголошено на важливості точного узгодження точок, створення щільної хмари точок, текстурування моделі та перевірки її відповідності оригінальному об'єкту. Використання програмного забезпечення, такого як Reality Capture, дозволяє отримати високоякісні результати, які знаходять застосування у збереженні, реставрації, наукових дослідженнях та освітніх проєктах.

Окремий акцент зроблено на аналізі створених моделей, який включає оцінку точності їх відтворення, порівняння з оригіналом та адаптацію для майбутнього використання. Тривимірні моделі забезпечують можливість збереження вигляду об'єктів у цифровому форматі, їх реставрації, а також моніторингу змін стану з часом. Це особливо цінно для пам'яток, що перебувають у ризикованому стані, адже фотограмметрія дозволяє не лише зафіксувати їх сучасний вигляд, але й сприяти відновленню втрачених елементів.

Розділ завершується практичними рекомендаціями, які спрямовані на підвищення ефективності фотограмметричних досліджень. Серед них: ретельне планування зйомки, вибір відповідного обладнання, забезпечення безпеки отриманих даних та підвищення кваліфікації залучених фахівців. Також наголошено на важливості регулярного аналізу моделей, створення архівів і моніторингу стану об'єктів для вчасного виявлення змін.

Таким чином, у розділі продемонстровано комплексний підхід до використання фотограмметрії для збереження культурної спадщини.

Підкреслено її універсальність як інструменту, що об'єднує технології збереження, дослідження та популяризації пам'яток серед широкої аудиторії. Це сприяє не лише збереженню історичної цінності об'єктів, а й їх інтеграції у сучасні освітні та наукові ініціативи, забезпечуючи міждисциплінарний підхід до роботи з культурною спадщиною.

## Розділ 4

# ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ФОТОГРАМЕТРІЇ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Виконала		Теребейчик К.І			Використання наземної фотограмметрії для цифрового збереження об'єктів культурної спадщини	Літ.	Арк.	Аркушів
Консультант		Яровий А.В.					87	128
Керівник		Нестеренко О.В.				КНУБА, ПСУТ, група ГСТМ-23		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О				88		

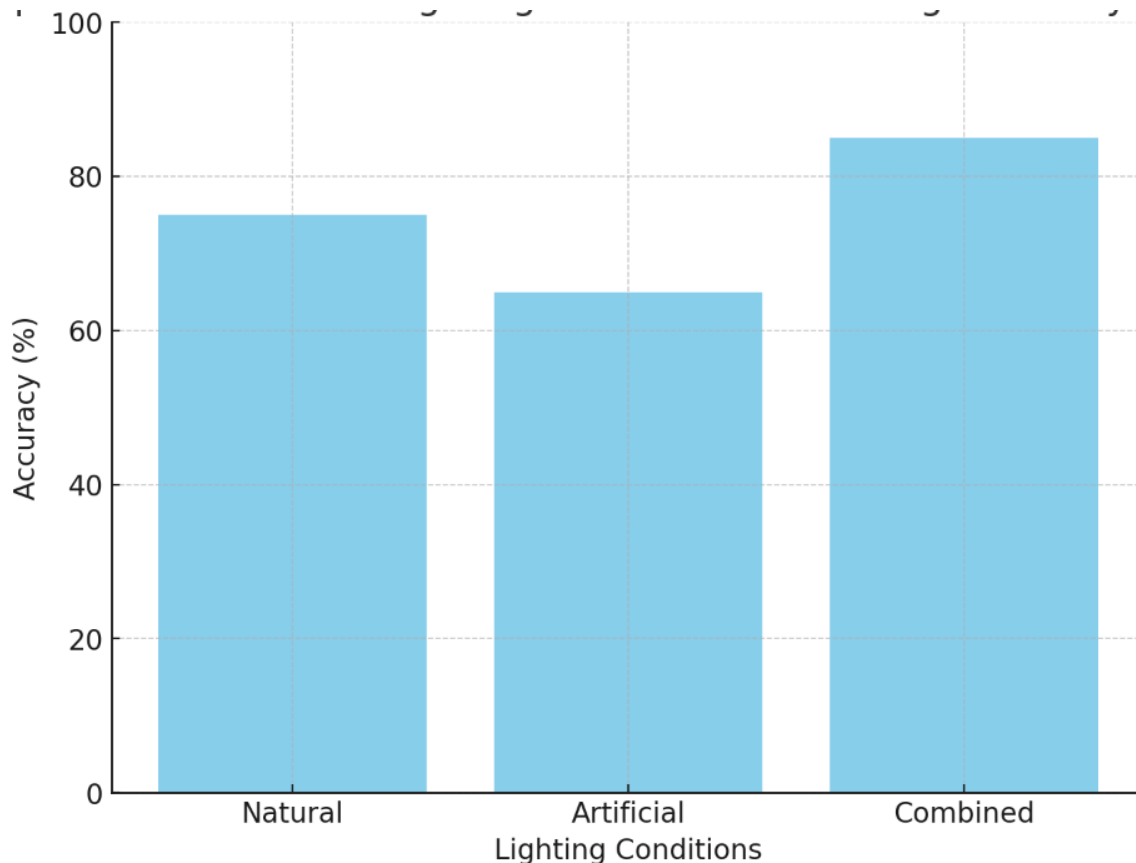
## **РОЗДІЛ 4.**

### **ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ФОТОГРАММЕТРІЇ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ**

#### **4.1 Підготовка до зйомки та масштабування об'єктів**

При підготовці до зйомки мозаїчних зображень для їх цифрового збереження наземною фотограмметриєю необхідно враховувати низку технічних та організаційних аспектів, які впливають на якість та точність отриманих даних. Мозаїки, як об'єкти культурної спадщини, характеризуються унікальною текстурою, кольоровою гамою та різноманітними елементами, які потребують особливої уваги під час документування. Основним завданням є отримання детальних цифрових копій, що можуть слугувати базою для реставраційних робіт, а також для популяризації через інтерактивні платформи.

Першим етапом підготовки до зйомки є вибір масштабних орієнтирів. У випадку мозаїк масштабні орієнтири слугують не тільки інструментом для визначення пропорцій об'єкта, але й важливим елементом для відтворення точного розміру та положення кожного елемента мозаїки в просторі. Оскільки мозаїчні зображення можуть бути розміщені на стінах, підлогах чи навіть на криволінійних поверхнях, масштабні орієнтири слід розташовувати відповідно до особливостей площини зйомки. Це дозволяє уникнути викривлень та забезпечує високу точність масштабування.



Графік 4.1. Вплив умов освітлення на точність фотограмметричної зйомки

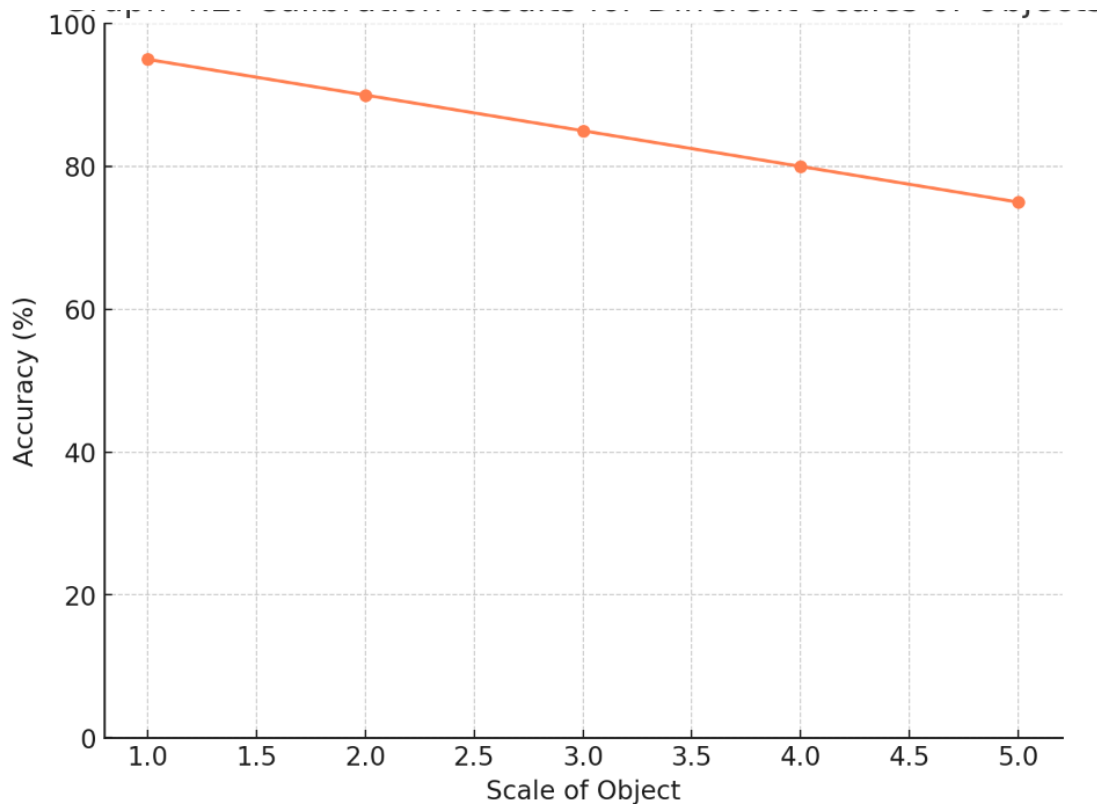
Оптимальна відстань для зйомки мозаїчних об'єктів визначається залежно від розміру фрагментів та вимог до деталізації. Для великих мозаїчних панно доцільно знімати з більшої відстані, що дозволяє охопити значну частину об'єкта, зберігаючи загальні пропорції та контекст зображення. Водночас, для збереження дрібних деталей, як-от текстури окремих камінців чи фрагментів, доцільно проводити зйомку на ближчій відстані. Це сприяє отриманню високої роздільної здатності знімків, що дозволяє відтворити не лише кольорову палітру мозаїки, але й точний рельєф поверхні.

Ще одним важливим аспектом є вибір освітлення. Природне освітлення може змінюватись залежно від часу доби та погодних умов, тому часто для досягнення стабільного результату використовуються додаткові джерела світла. Штучне освітлення дозволяє рівномірно освітити поверхню мозаїки, уникнувши небажаних тіней, які можуть негативно вплинути на якість цифрової моделі. Особливо важливо контролювати освітлення при роботі з кольоровими

мозаїками, оскільки відтінки можуть змінюватися під впливом різного спектру світла. Рівномірне освітлення забезпечує збереження автентичних кольорів та відтінків.

Позиція камери відносно мозаїчного об'єкта також відіграє значну роль у зйомці. Для отримання максимальної точності деталей рекомендується розміщувати камеру перпендикулярно до поверхні мозаїки, що мінімізує викривлення та дозволяє фіксувати всі елементи мозаїки в їх реальних пропорціях. Однак для більш складних форм, зокрема, криволінійних поверхонь, може знадобитися використання кількох ракурсів, що дозволяє захопити різні площини одного об'єкта. Це особливо актуально для мозаїк на архітектурних об'єктах, де вони можуть бути розміщені на арках, склепіннях чи інших структурних елементах.

Крім того, важливо враховувати параметри самої камери та об'єктивів. Використання ширококутних об'єктивів дозволяє захопити більшу площу мозаїки за один кадр, однак такий об'єктив може спричинити деяке спотворення зображення, що важливо врахувати під час обробки. Для деталей краще використовувати об'єктиви з довгим фокусом, що дозволяє отримати зображення високої роздільної здатності без наближення камери до об'єкта. Використання таких об'єктивів особливо актуальне для зйомки мозаїк, які містять дрібні деталі, де кожен елемент мозаїчного малюнка відіграє значну роль у відтворенні загального вигляду.



Графік 4.2: Результати калібрування для різних масштабів об'єктів

Процес обробки отриманих фотограмметричних даних також вимагає уваги. Після отримання фотографій необхідно здійснити корекцію кольорів та калібрування зображень для забезпечення їх максимальної точності. Далі відбувається процес зведення фотографій у тривимірну модель, де кожна фотографія співставляється з іншими за допомогою спеціального програмного забезпечення. Це дозволяє зберегти просторове положення та пропорції об'єкта в цифровій моделі. Для мозаїк важливо враховувати кожен дрібний елемент, оскільки будь-яке спотворення може призвести до втрати цінних даних, необхідних для реставрації чи популяризації об'єкта.

Для мозаїчних зображень, які мають високу цінність як культурні об'єкти, використання фотограмметрії забезпечує точність відтворення всіх аспектів зображення, включаючи кольорові відтінки, структуру та положення кожного елемента мозаїки. Отримані цифрові моделі можуть використовуватися для створення віртуальних турів, що дозволяє популяризувати культурну спадщину

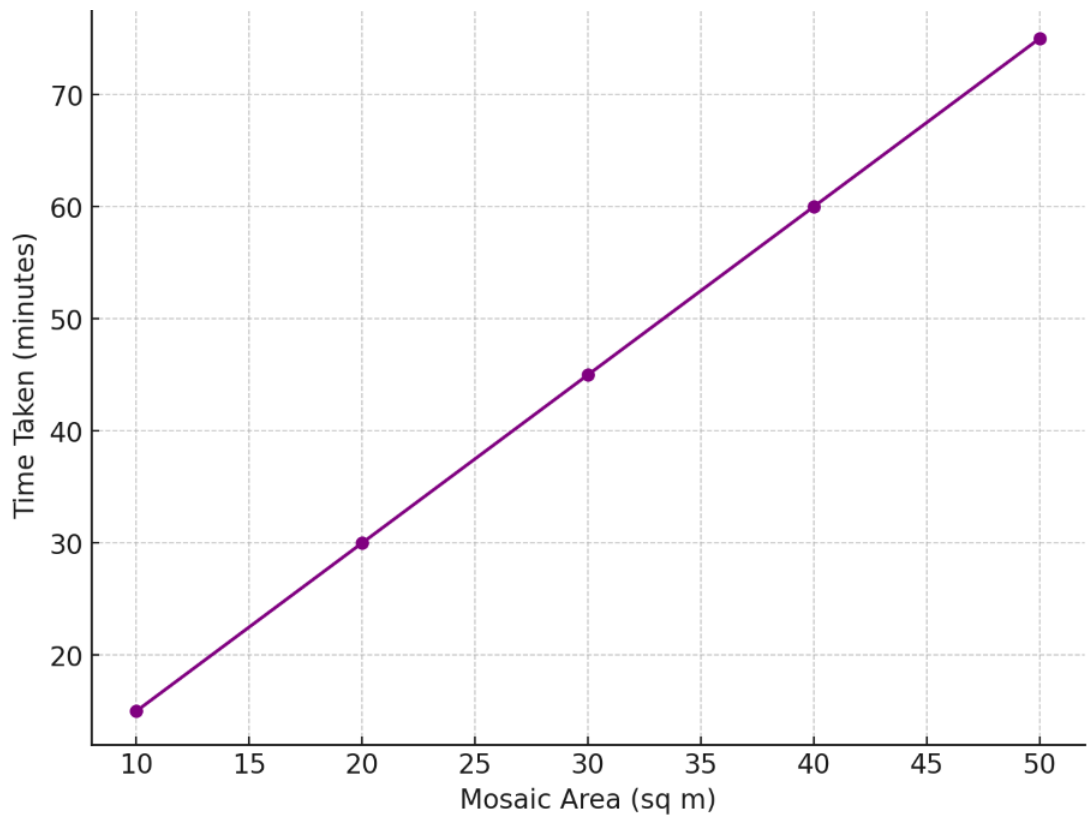
серед широкої аудиторії, а також для наукових досліджень, де необхідний доступ до високоточних даних без ризику пошкодження оригіналу.

Враховуючи всі перераховані аспекти, можна зробити висновок, що процес цифрового збереження мозаїчних об'єктів є складним, однак забезпечує високий рівень точності та деталізації. Порівняння зйомки за різних умов показує, що використання додаткових технічних засобів, таких як масштабні орієнтири, правильне освітлення та оптимальне позиціонування камери, дозволяє досягти максимального результату.

#### **4.2 Проведення польових робіт: зйомка та збір даних**

Для успішної реалізації фотограмметрії мозаїчних зображень критичним є проведення польових робіт, які включають вибір позицій для зйомки, вимірювання відстаней між контрольними точками та забезпечення рівномірного освітлення. Дотримання цих кроків дозволяє отримати високоякісні дані, необхідні для побудови точної тривимірної моделі.

Вибір позицій для зйомки є одним із ключових завдань. Позиція камери має забезпечувати охоплення всього об'єкта або його значущих фрагментів з мінімальними викривленнями. При зйомці мозаїк, розташованих на стінах або інших вертикальних поверхнях, важливо встановити камеру під кутом, що дозволить уникнути тіней, зберігши при цьому кольорову палітру і текстуру. Оптимальною є позиція камери перпендикулярно до поверхні об'єкта, однак це не завжди можливо, особливо для мозаїк, розташованих на арках чи склепіннях. Тому для таких складних об'єктів доцільно обирати кілька позицій, щоб отримати повну інформацію про поверхню.



Графік 4.3 Час зйомки залежно від площі мозаїки

Щоб гарантувати точність моделі, слід ретельно виміряти відстані між контрольними точками. Використання лазерних або ультразвукових далекомірів дозволяє досягти високої точності вимірювань, що важливо для збереження пропорцій при подальшій обробці. Вимірювання відстаней між цими точками забезпечує відповідність фізичних розмірів реального об'єкта його цифровій копії, що критично важливо для реставраційних та архівних робіт.



Рис. 4.1 Зображення відстані між контрольними точками в натурі мозаїки «Вітер» [Paint]

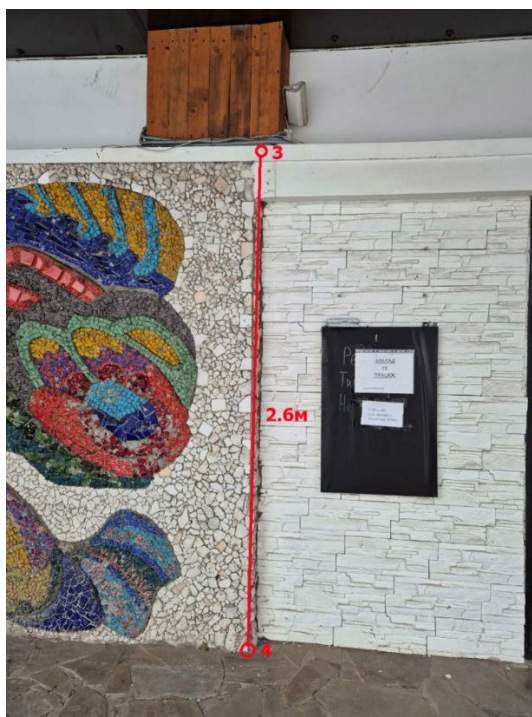


Рис. 4.2 Зображення відстані між контрольними точками в натурі мозаїки «Вітер» [Paint]

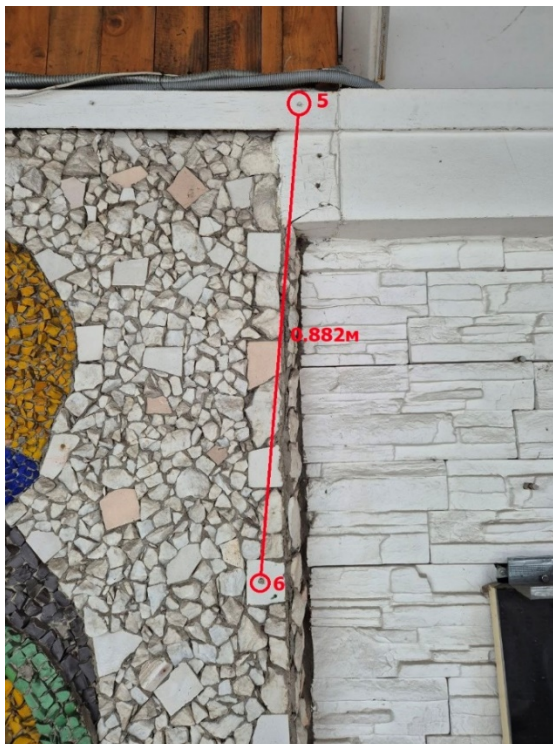


Рис. 4.3 Зображення відстані між контрольними точками в натурі мозаїки  
«Вітер» [Paint]

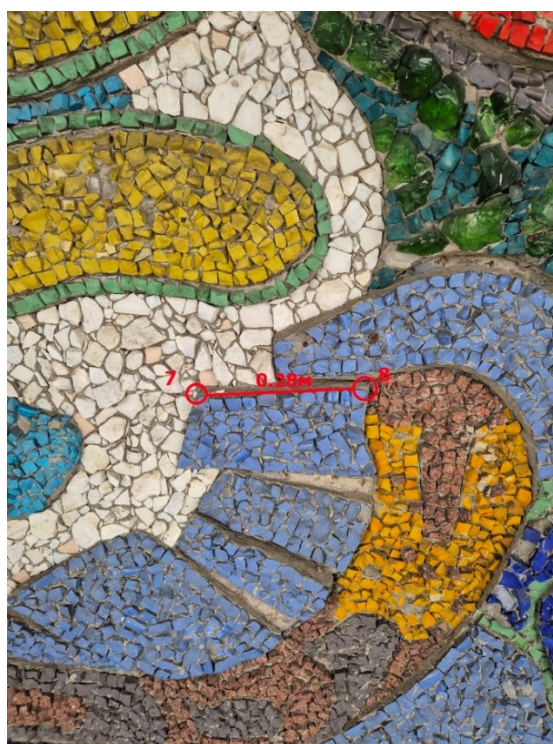


Рис. 4.4 Зображення відстані між контрольними точками в натурі мозаїки  
«Вітер» [Paint]

Для зйомки мозаїчних зображень важливо забезпечити рівномірне освітлення, що дозволить уникнути різких тіней або пересвітлення, які можуть

спотворити кольорову гаму. Використання розсіяного світла або спеціальних освітлювальних панелей дозволяє досягти рівномірного освітлення. Крім того, важливо уникати прямих сонячних променів, які можуть створювати надмірну яскравість, що знижує якість зображення. Рівномірне освітлення забезпечує точне відтворення кольорів та фактури мозаїчних елементів, що важливо для їх подальшого відображення в цифровій моделі.

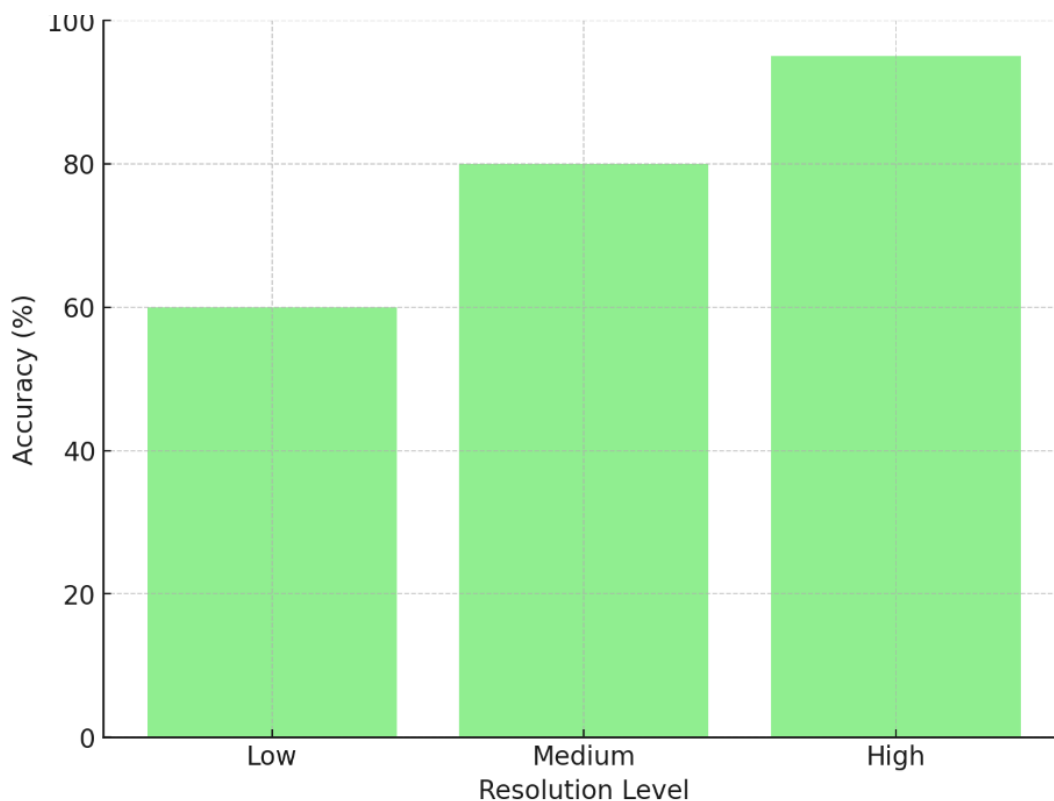
При виборі позицій для зйомки слід також враховувати розмір мозаїки та наявність обмежень простору. Якщо об'єкт великий, доцільно робити кілька знімків з різних позицій і відстаней, що дозволяє створити повну модель без спотворень. Для невеликих мозаїк краще обрати такі позиції, щоб уникнути дублювання зображень, зберігаючи загальну цілісність моделі. Різні ракурси дозволяють захопити не тільки основну площину мозаїки, але й її крайові фрагменти.

Під час польових робіт важливо уникати рухів камери, що може призвести до розмитості зображень. Використання стабілізаторів або штативів дозволяє зафіксувати камеру, зберігаючи чіткість зображення. Це особливо актуально при зйомці в умовах обмеженого освітлення, де навіть незначне зміщення камери може спричинити втрату чіткості. Використання стабілізованих зйомок забезпечує отримання знімків високої роздільної здатності.

Окрім стабілізації, при зйомці слід враховувати параметри камери. Найбільш оптимальним є використання камер із високою роздільною здатністю, що дозволяє фіксувати дрібні деталі мозаїки. Для отримання максимальної точності об'єктива слід налаштувати на середню фокусну відстань, що дозволяє уникнути крайових спотворень. Крім того, бажано налаштувати параметри експозиції, контрастності та балансу білого відповідно до умов освітлення.

Важливим етапом збору даних є зйомка з декількох кутів. Залежно від складності та положення мозаїки, зйомка може бути виконана з фронтального ракурсу або під різними кутами для забезпечення повного охоплення поверхні.

Це особливо важливо для криволінійних об'єктів, де деталі можуть бути приховані з одного кута. Багатокутова зйомка дозволяє зберегти просторові дані про об'єкт, що критично важливо для відтворення мозаїк в об'ємному вигляді.



Графік 4.4: Порівняння точності фотограмметричних моделей для різних рівнів роздільної здатності

Забезпечення рівномірного освітлення на кожному етапі зйомки дозволяє уникнути некоректної передачі відтінків, що особливо важливо для мозаїк з багатою палітрою кольорів. Використання штучних джерел світла з можливістю регулювання інтенсивності допомагає адаптувати освітлення відповідно до вимог конкретної зйомки. Рівномірне освітлення також запобігає появі відблисків, які можуть спотворити відтворення кольорів та дрібних деталей.

Для забезпечення високої якості зображень під час польових робіт рекомендується проводити попередні тестові знімки. Це дозволяє визначити оптимальні параметри камери, оцінити вплив освітлення та за потреби скоригувати розташування камери. Тестові знімки дають можливість уникнути помилок під час основної зйомки та отримати найкращий результат.

Нарешті, важливим етапом є перевірка якості отриманих знімків одразу після завершення польових робіт. Це дозволяє виявити можливі дефекти або недоліки, які можуть вплинути на якість тривимірної моделі. Якщо виявлено розмитість або недостатню чіткість, доцільно повторити зйомку, щоб отримати необхідні дані для подальшої обробки.

### **4.3 Обробка фотограмметричних даних: етапи створення моделей**

Обробка фотограмметричних даних є важливим і комплексним етапом, що дозволяє перетворити набір зображень об'єкта на точну тривимірну модель. Після завершення польових робіт зйомки отримані зображення завантажуються в спеціалізоване програмне забезпечення, де виконується їх обробка. Основні етапи цього процесу включають використання відповідного програмного забезпечення, калібрування і коригування моделі, а також зведення точкових хмар в єдину структуру.

Використання програмного забезпечення для обробки є початковим кроком на етапі створення тривимірної моделі. Для обробки фотограмметричних даних найчастіше застосовуються такі програми, як Agisoft Metashape, RealityCapture або Autodesk ReCap. Кожна з цих програм надає інструменти для автоматичного аналізу зображень, визначення спільних точок на них та формування початкової точкової хмари. Завдяки автоматизації цього процесу програма створює основу для майбутньої моделі, визначаючи співвідношення між різними зображеннями.

Після завантаження зображень в програму для обробки виконується їх попередній аналіз, зокрема визначення спільних орієнтирів та ключових точок. Цей процес передбачає автоматичне розпізнавання однакових точок на різних знімках, що дозволяє програмі створити структуру, яка відповідає формі та розташуванню об'єкта в просторі. Таким чином, на цьому етапі вже створюється базова, хоч і груба, точкова хмара об'єкта.

Калібрування є наступним важливим етапом у процесі обробки фотограмметричних даних. Під час зйомки можуть виникати певні викривлення зображення через оптику камери, такі як дисторсія та різні види оптичних викривлень, що можуть вплинути на точність моделі. Процес калібрування дозволяє виправити ці викривлення. Калібрування зазвичай виконується автоматично у програмному забезпеченні, де налаштовуються параметри об'єктива, такі як фокусна відстань і дисторсія, що дозволяє досягти точного відтворення форми об'єкта.

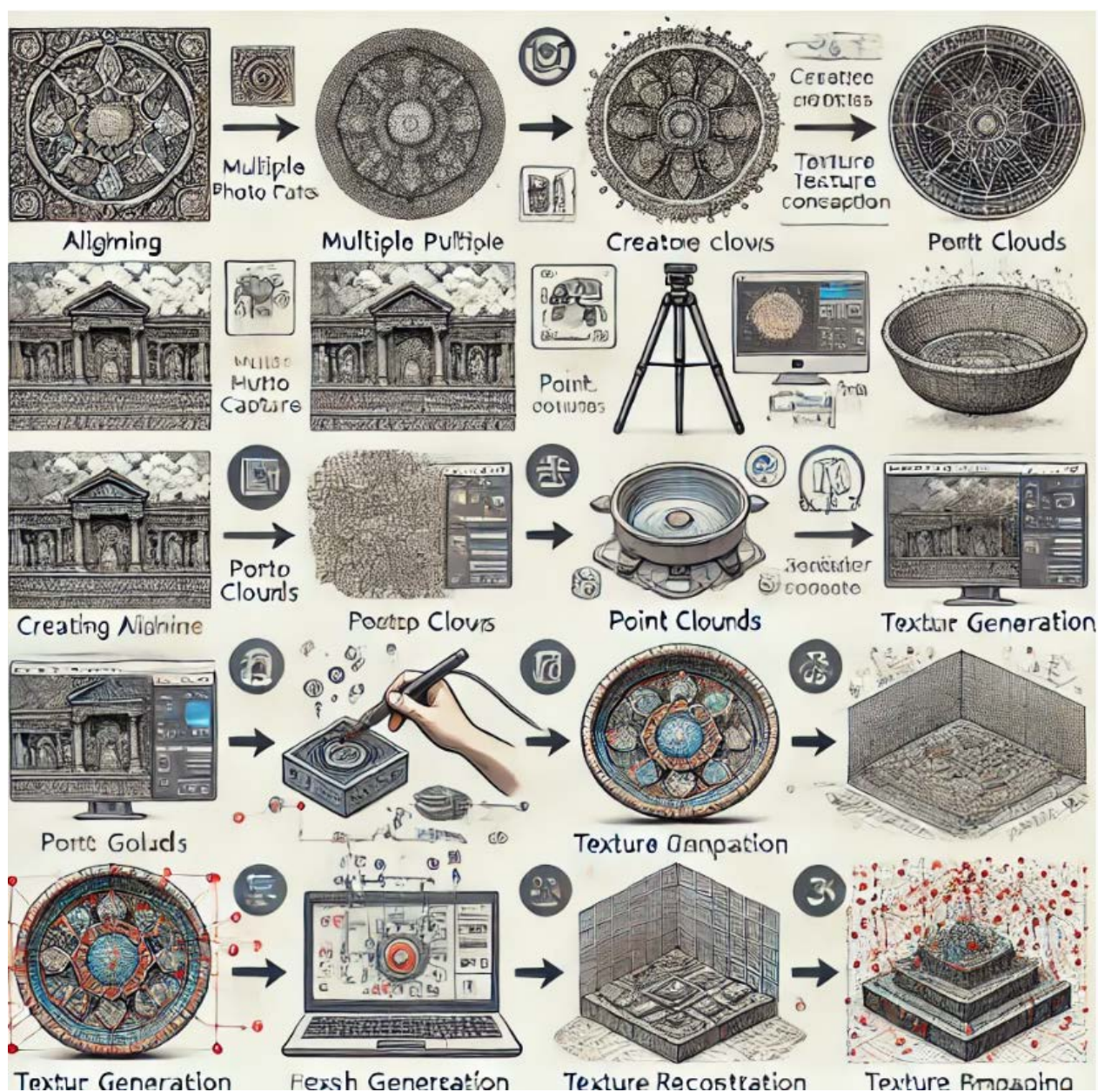


Рис 4.1 Етапи обробки фотограмметричних даних для створення 3D-моделей мозаїк

Коригування моделі також включає налаштування масштабних параметрів за допомогою контрольних точок, які були визначені під час польових робіт. Контрольні точки є ключовими для забезпечення точності моделі, оскільки вони надають інформацію про реальні розміри об'єкта. Завдяки цьому етапу можна досягти максимальної відповідності між цифровою моделлю та її фізичним аналогом. Використання контрольних точок підвищує якість кінцевого результату та дозволяє усунути потенційні похибки масштабування.

Після завершення калібрування і коригування, програма переходить до створення більш деталізованої точкової хмари. Точкова хмара складається з мільйонів точок, що разом формують об'ємний вигляд об'єкта. На цьому етапі програмне забезпечення визначає розташування кожної точки у просторі, спираючись на дані, зібрані з різних ракурсів. Точкова хмара є фундаментальною структурою для подальшого створення поверхні та текстуровання об'єкта.

Наступним кроком є зведення кількох точкових хмар в єдину модель. Оскільки зйомка об'єкта зазвичай проводиться з різних ракурсів, програмне забезпечення створює кілька точкових хмар, що відповідають різним частинам об'єкта. Для отримання цілісної моделі ці хмари об'єднуються в одну за допомогою процесу злиття. Злиття виконується на основі автоматичного суміщення спільних точок між хмарами.

Процес злиття точкових хмар забезпечує створення безперервної поверхні, що дозволяє уникнути розривів та спотворень. Це важливо для мозаїчних зображень, де кожен елемент має бути точно відображений у моделі. Після об'єднання точкових хмар в єдину структуру утворюється повноцінний каркас об'єкта, що відтворює всі його деталі.

Завершальним етапом є побудова поверхні на основі точкової хмари. Це забезпечує об'єкту гладкість і цілісність, дозволяючи більш точно відобразити його форму. Після цього модель проходить процедуру текстуровання, де на неї накладаються зображення з фотографій, що дозволяє отримати реалістичний вигляд.

Процедура текстурування виконується за допомогою тих самих фотографій, що використовувались для створення точкової хмари. Програмне забезпечення автоматично накладає зображення на відповідні ділянки моделі, відтворюючи кольорову гаму та текстури. Це дозволяє відобразити деталі поверхні, такі як тріщини, пошкодження або відмінності у кольорі мозаїчних елементів.

Для підвищення точності моделі застосовується додаткове коригування текстури та кольорів. Це дозволяє уникнути невідповідностей між різними частинами моделі, які можуть виникати через різні умови освітлення під час зйомки. Коригування дозволяє зберегти цілісність кольорової гами об'єкта, що є важливим аспектом для відтворення його автентичного вигляду.

#### **4.4 Валідація створених моделей**

Валідація створених моделей є критично важливим етапом фотограмметричного процесу, що забезпечує точність і надійність отриманих цифрових копій культурних об'єктів. Основна мета валідації — перевірити відповідність моделі реальному об'єкту, оцінити точність масштабів, пропорцій та деталей, а також виявити можливі похибки, які могли виникнути на етапі обробки.

Процес валідації розпочинається з перевірки розмірів моделі. Під час польових робіт визначалися контрольні точки, які використовувалися для масштабування моделі. На етапі валідації необхідно переконатися, що відстані між цими точками на моделі відповідають реальним значенням. Це дозволяє забезпечити точність масштабу та уникнути спотворень розмірів об'єкта, що важливо для мозаїчних зображень, де кожен елемент має фіксоване місце і розмір.

В даному випадку ми маємо два об'єкта, а саме: мозаїка «Вітер» та мозаїка-панно «Зв'язок світав». Під час польових робіт було виміряно відстань між контрольними точками. І для оцінки точності цифрової моделі, створеної за

допомогою наземної фотограмметрії та програмного забезпечення Reality Capture, було використано методику порівняння вимірних у натурі відстаней із відстанями, розрахованими програмою.

$$\Delta L = L_{\text{мод}} - L_{\text{нат}}$$

Різниця вимірів:

Відносна похибка ( $\delta$ ) результату вимірювання дорівнює відношенню абсолютної похибки до виміряного значення фізичної величини.

$$\delta = \frac{\Delta L}{L_{\text{нат}}} \cdot 100\%$$

$$\overline{\Delta L} = \frac{\sum |\Delta L|}{n}$$

Середнє значення абсолютної похибки:

Результати порівняння довжин, вимірних в натурі та на моделях «Вітер» та «Зв'язок світів» представлені нижче (табл. 4.1) та (табл. 4.2):

Таблиця 4.1

Оцінка точності відстаней на об'єкті «Вітер»

№	Номери відстаней	Довжини, виміряні в натурі, $L_{\text{нат}}$	Довжини, виміряні на моделі, $L_{\text{мод}}$	Абсолютна похибка, $\Delta L$ (м)	Відносна похибка, $\Delta(\delta)\%$
1	0-1	0,413	0,412469	-0,000531	-0,12857143
2	2-3	0,28	0,27096	-0,00904	-3,22857143
3	4-5	2,63	2,591274	-0,038726	-1,47247148
4	0-4	0,882	0,877696	-0,004304	-0,48798186
Середня абсолютна похибка:		0,01315			
Середня відносна похибка:		1,33%			

Максимальна абсолютна похибка:	0,03873 м
Мінімальна абсолютна похибка:	0,00053 м

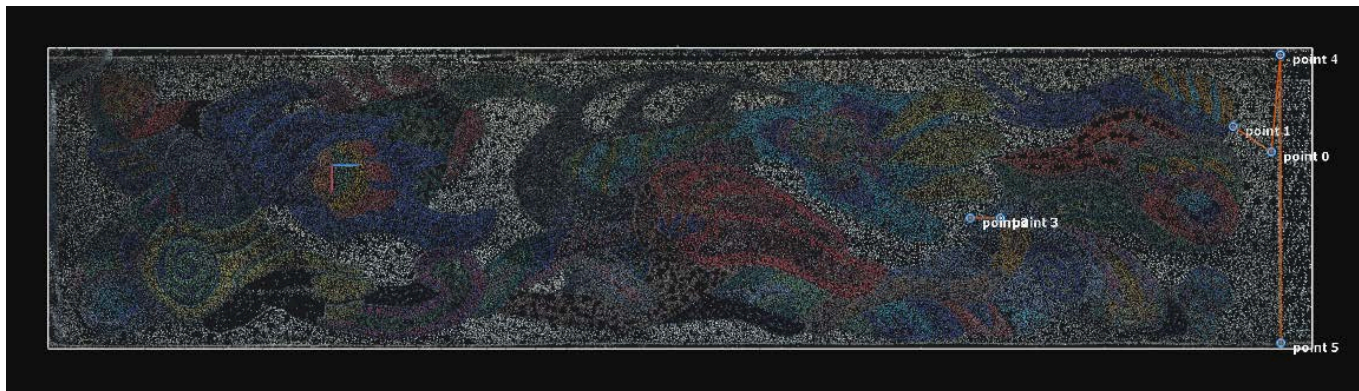


Рис. 4.2 Відображення відстаней між точками мозаїки «Вітер» у програмі Reality Capture 1.4.2 [Reality Capture1.4.2]

Результати аналізу похибок між натуральними та модельними значеннями відстаней показали такі основні аспекти:

**Абсолютні похибки** виявилися невеликими, що свідчить про високу точність моделювання.

Максимальна абсолютна похибка: 0.03873 м.

Мінімальна абсолютна похибка: 0.00053 м.

**Відносні похибки** свідчать про узгодженість між вимірюваннями:

Середня відносна похибка: 1.33%, що є прийнятним показником для більшості задач фотограмметрії.

Найбільша відносна похибка: 3.23%, яка була зафіксована для найменшої відстані (2-3)

**Середня абсолютна похибка** становить 0.01315, що підтверджує загальну точність моделі.

Таблиця 4.2

## Оцінка точностей відстаней на об'єкті «Зв'язок світів»

№	Номери відстаней	Довжини, виміряні в натурі, L <sub>нат</sub>	Довжини, виміряні на моделі, L <sub>мод</sub>	Абсолютна похибка, ΔL (м)	Відносна похибка, Δ(δ)%
1	0-1	0,1	0,10078	0,00078	0,78
2	2-3	0,22	0,217717	-0,002283	-1,04
3	4-5	0,4	0,40376	0,00376	0,94
4	6-7	0,397	0,390294	-0,006706	-1,69
5	1-8	0,974	0,97534	0,00137	0,14
6	9-10	0,763	0,75225	-0,01075	-1,41
Середня абсолютна похибка				0,00427	
Середня відносна похибка					0,9989%
Максимальна абсолютна похибка				0,01075 м.	
Мінімальна абсолютна похибка				0,00078 м.	

Модель створена в Reality Capture має досить високу точність. Середня абсолютна похибка менше 5 мм, що є прийнятним для багатьох задач збереження культурної спадщини.

Відносна похибка також мала (~1%), що свідчить про коректне масштабування моделі.

Найбільше відхилення спостерігається для відстані 9-10, що може бути пов'язано з людськими або інструментальними похибками під час вимірювань.



Рис. 4.3 Відображення відстаней між точками мозаїки «Зв'язок світів» у програмі Reality Capture 1.4.2 [Reality Capture 1.4.2]

Далі здійснюється перевірка пропорцій моделі. Порушення пропорцій може виникнути під час злиття точкових хмар або коригування зображень, тому в процесі валідації особливу увагу приділяють порівнянню пропорцій моделі з оригіналом. Збереження точних пропорцій дозволяє не лише відобразити реальну форму об'єкта, але й зробити модель придатною для подальшого використання в реставраційних роботах, де точність є ключовою.

Наступним етапом є перевірка деталей моделі, особливо для мозаїчних об'єктів, що мають складну текстуру та безліч дрібних елементів. Важливо переконатися, що кожен фрагмент мозаїки відображений на моделі, а кольорова гама зберігає свою автентичність. Висока точність передачі деталей забезпечує реалістичний вигляд моделі, що є особливо цінним для дослідницьких цілей.

Валідація також включає перевірку текстуровання моделі. Під час накладання текстур можуть виникати похибки, такі як невідповідність кольорів між різними фрагментами або накладення текстури з різними ступенями чіткості. Ці похибки можуть негативно вплинути на сприйняття моделі, тому в процесі валідації текстури ретельно аналізуються та коригуються за необхідності.

Значну увагу приділяють перевірці відповідності кольорової гами моделі реальному об'єкту. Під час зйомки та обробки можуть виникати відмінності у кольорах через зміну освітлення або налаштувань камери. Для відтворення автентичного вигляду важливо коригувати ці відмінності та забезпечити єдність кольорової палітри на всій моделі. Це особливо актуально для мозаїк, де кольори грають важливу роль у передачі загального вигляду об'єкта.

Одним із методів валідації є порівняння моделі з фотографіями об'єкта, зробленими з різних ракурсів. Це дозволяє перевірити, наскільки точно модель передає всі видимі деталі об'єкта. При цьому звертається увага на відповідність

форми, текстури та кольору кожного фрагмента мозаїки. Порівняння з фотографіями дозволяє швидко виявити можливі розбіжності.

Також використовуються програми для автоматичної перевірки точності моделі, які порівнюють 3D-модель із контрольними даними. Таке програмне забезпечення здатне виявити найменші відхилення та надати детальну інформацію про місця, де можуть виникати похибки. Завдяки автоматичному аналізу можна значно скоротити час валідації та підвищити її точність.

Окрім перевірки розмірів і пропорцій, валідація включає контроль якості поверхні моделі. На цьому етапі звертають увагу на можливі дефекти, такі як нерівності або артефакти, що виникають під час обробки. Виявлення та корекція цих дефектів допомагає забезпечити цілісність та реалістичність моделі, що важливо для її подальшого використання.

Важливим аспектом валідації є аналіз точності злиття точкових хмар, особливо в місцях стиків. Невідповідність між точками на стиках може призвести до розривів у моделі, що спотворює вигляд об'єкта. Виявлення таких розбіжностей дозволяє внести корективи та забезпечити цілісність моделі.

Крім цього, валідація включає перевірку якості текстур. Неправильно накладені текстури можуть спричинити розмитість або нерівномірність кольорів на моделі. Виявлення та виправлення таких помилок забезпечує реалістичний вигляд поверхні та дозволяє зберегти деталі.

Для остаточної валідації також використовуються методи оцінки просторової точності моделі. Це передбачає вимірювання координат контрольних точок на моделі та порівняння їх з реальними координатами об'єкта. Такий підхід дозволяє забезпечити просторову точність моделі та переконатися у відповідності її розмірів оригіналу.

Інтеграція тривимірних моделей у документообіг об'єктів культурної спадщини є важливим етапом, який дозволяє значно розширити можливості

збереження, аналізу та використання цих об'єктів. Створені 3D-моделі забезпечують точне відтворення фізичних характеристик об'єктів, що робить їх цінним ресурсом для архівування, наукових досліджень та подальших реставраційних робіт. У цьому підрозділі розглянуто способи, завдяки яким тривимірні моделі можуть бути інтегровані у документацію про культурну спадщину, а також переваги цього процесу.

Основним завданням інтеграції 3D-моделей є забезпечення можливості документування та збереження інформації про об'єкт у цифровому форматі. Такий підхід не лише спрощує збереження великої кількості даних, але й дозволяє зберігати об'єкти в детальному вигляді, зокрема їх форми, текстуру, кольори та навіть пошкодження. Це особливо цінно для мозаїчних об'єктів, де кожен фрагмент має значення і може потребувати окремого документування.

Завдяки використанню 3D-моделей можна створювати детальну технічну документацію, яка включає інформацію про стан об'єкта на момент зйомки. Така документація може використовуватися як для подальшої роботи з об'єктом, так і для моніторингу його стану з часом. Наприклад, зміни в моделі можна фіксувати при наступних зйомках, що дозволяє відстежувати процеси руйнування або зношування об'єкта.

Інтеграція 3D-моделей у систему документації культурної спадщини відкриває нові можливості для обміну інформацією між науковими установами, музеями та іншими організаціями. Завдяки цифровому формату модель може бути передана іншим дослідницьким центрам без необхідності фізичного транспортування об'єкта. Це полегшує співпрацю на міжнародному рівні та сприяє більш ефективному вивченню об'єктів.

Крім того, 3D-моделі можуть бути використані для створення архівів об'єктів культурної спадщини, які можуть бути доступні як у цифрових, так і у фізичних архівах. Цифровий архів дозволяє зберігати копії об'єктів у безпечному форматі, що захищає їх від руйнування або втрати, пов'язаних із фізичним

зберіганням. Це особливо актуально в умовах, коли об'єкти піддаються ризику знищення через природні чи антропогенні фактори.

Окрема перевага інтеграції 3D-моделей у документообіг культурної спадщини — можливість створення інтерактивних ресурсів. Наприклад, на основі моделей можна розробляти віртуальні тури, що дозволяють глядачам ознайомитись з об'єктом, не залишаючи власного дому. Це сприяє популяризації культурної спадщини та підвищує її доступність для широкої аудиторії, зокрема для тих, хто не може відвідати об'єкт фізично.

Для інтеграції 3D-моделей у документообіг використовуються спеціалізовані системи управління даними культурної спадщини. Такі системи дозволяють організувати та зберігати тривимірні моделі, а також забезпечують доступ до них через інтерфейс, зручний для користувачів. Це дозволяє дослідникам отримувати доступ до необхідної інформації у зручному форматі.

Цифрова модель може слугувати основою для створення реставраційних планів. Завдяки точності, з якою тривимірна модель відображає об'єкт, вона стає цінним інструментом для фахівців, які займаються консервацією. На основі моделі можна прогнозувати обсяги та масштаби необхідних робіт, а також використовувати її як посібник у процесі реставрації.

3D-моделі також надають можливість проведення більш детального аналізу об'єктів. Вони дозволяють дослідникам розглядати об'єкти під різними кутами та наближувати їх, що недоступно при фізичному огляді. Це значно підвищує ефективність досліджень та дозволяє отримати більше інформації про об'єкт без ризику його пошкодження.

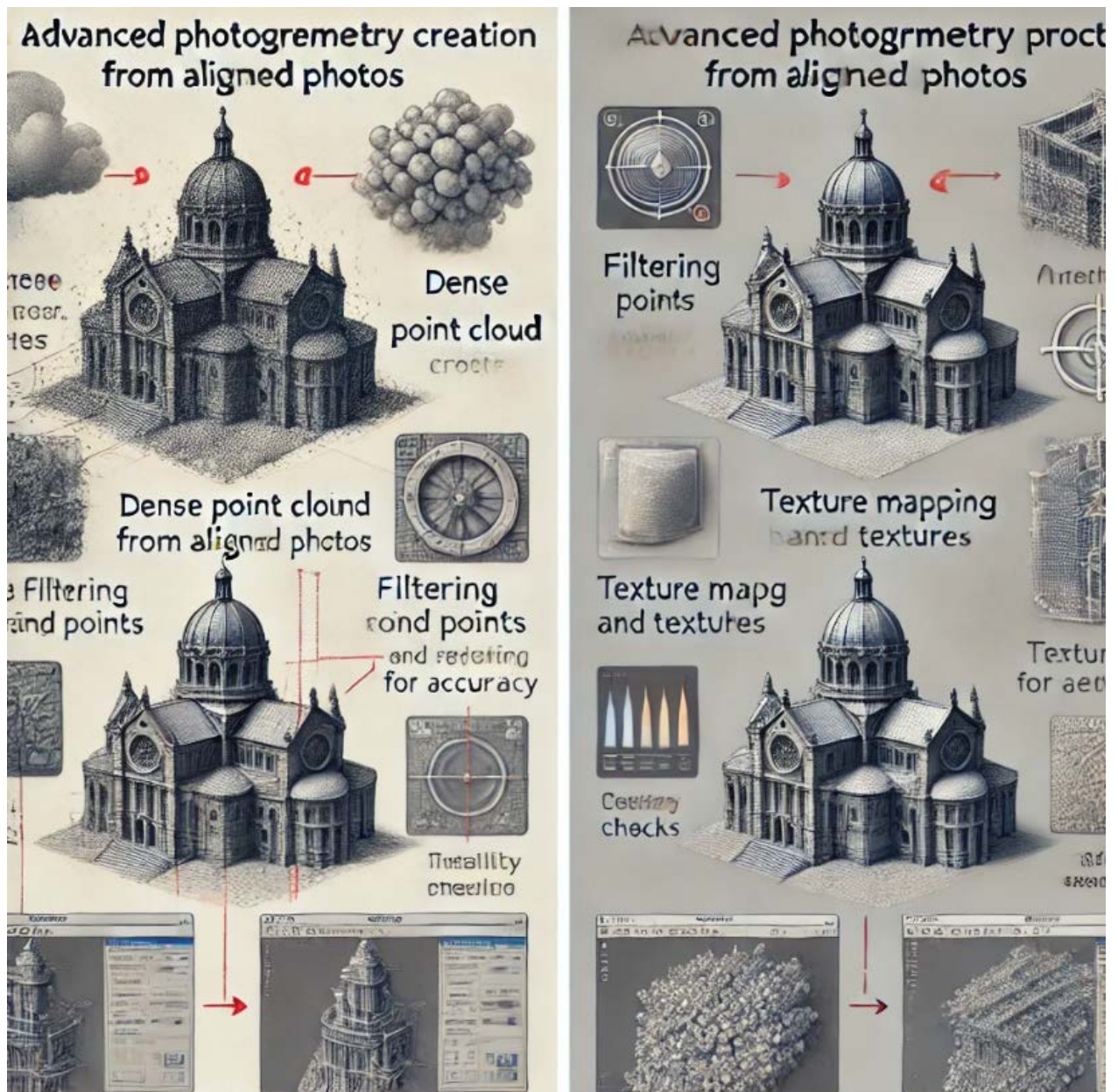


Рис. 4.2 Дві ілюстрації, які відображають процеси створення 3D моделей за допомогою фотограмметрії

Важливим аспектом є можливість інтеграції моделей у навчальні програми. Використання 3D-моделей дозволяє студентам ознайомитись з культурною спадщиною безпосередньо через цифрові платформи. Це особливо актуально в умовах дистанційного навчання та глобалізації, коли доступ до реальних об'єктів може бути обмежений.

Тривимірні моделі також відкривають можливості для розробки додатків з доповненою реальністю (AR), які дозволяють накладати зображення об'єктів на реальний світ. Це може бути використано для створення інтерактивних

експозицій в музеях, що дозволяє глядачам побачити, як об'єкти виглядали у їхній початковій формі.

Інтеграція 3D-моделей у документообіг також дозволяє архівувати дані про процеси реставрації та відновлення об'єктів. Кожен етап робіт може фіксуватися та зберігатися разом із моделлю, що дозволяє відстежувати зміни, внесені під час реставрації. Це сприяє прозорості процесів та дозволяє створити детальний архів роботи з кожним об'єктом.

Зрештою, інтеграція 3D-моделей забезпечує довготривале збереження інформації про об'єкти культурної спадщини. Цифрові моделі можуть слугувати альтернативою або доповненням до традиційної документації, що робить процес збереження більш гнучким і надійним.

#### **Висновок до розділу 4**

У розділі 4 магістерської роботи було детально розглянуто практичне впровадження фотограмметрії для збереження об'єктів культурної спадщини, зокрема мозаїчних зображень. Цей розділ охоплює всі етапи роботи — від підготовки до зйомки та проведення польових робіт до обробки даних, валідації моделей та інтеграції створених тривимірних копій у документообіг культурної спадщини.

На етапі підготовки акцент зроблено на важливості масштабування, вибору освітлення, налаштування параметрів камери та визначення оптимальних позицій для зйомки. Окремо виділено значення правильного освітлення для збереження кольорової гами та текстур мозаїк, а також використання контрольних точок для забезпечення точності масштабів моделі.

Польові роботи підкреслюють необхідність ретельного вибору ракурсів зйомки, стабілізації камери та забезпечення високої якості знімків для подальшої обробки. Важливу роль відведено використанню сучасних

інструментів, таких як далекоміри та додаткове освітлення, для досягнення максимальної деталізації й точності отриманих даних.

Обробка фотограмметричних даних включає використання програмного забезпечення для створення точкових хмар, калібрування моделей та текстуровання поверхні. Вказано на важливість корекції масштабів і кольорів для забезпечення реалістичності моделей, а також злиття точкових хмар для створення цілісної структури об'єкта.

Етап валідації забезпечує перевірку точності та відповідності моделей реальним об'єктам. Розглянуто методи аналізу розмірів, пропорцій, деталей та текстур, які дозволяють виявити можливі похибки та усунути їх. Особливу увагу приділено точності передачі кольорів і текстур мозаїк, що є ключовим для збереження їх автентичності.

Інтеграція створених 3D-моделей у документообіг культурної спадщини відкриває нові можливості для архівування, реставрації, досліджень та популяризації об'єктів. Було підкреслено важливість використання моделей для створення віртуальних турів, інтерактивних експозицій та навчальних програм. Окремо зазначено, що тривимірні моделі сприяють міждисциплінарній співпраці та міжнародному обміну інформацією про об'єкти культурної спадщини.

Таким чином, у розділі 4 продемонстровано комплексний підхід до застосування фотограмметрії у збереженні культурної спадщини. Завдяки її впровадженню стає можливим не лише збереження та реставрація унікальних об'єктів, але й забезпечення їх доступності для досліджень, освітніх проєктів і популяризації серед широкої аудиторії.

## ВИСНОВОК

У даній дипломній роботі було проведено дослідження використання наземної фотограмметрії для збереження та цифровізації об'єктів культурної спадщини. Сучасні виклики, що стоять перед культурними об'єктами, такі як фізичне старіння, вплив антропогенних і природних факторів, а також глобалізація, висвітлили необхідність нових підходів для їх збереження. Використання фотограмметрії для цифрового документування об'єктів культурної спадщини показало свою ефективність у створенні високоточних 3D-моделей, які можуть бути використані для реставраційних та наукових цілей.

Під час дослідження були досягнуті основні цілі роботи, а саме аналіз нормативної бази збереження культурної спадщини, вивчення існуючих методів цифровізації, практичне застосування фотограмметрії для створення моделі культурного об'єкта та аналіз отриманої моделі. Особливу увагу було приділено аналізу сучасних методів, що використовуються у світовій практиці, де технологія фотограмметрії вже широко застосовується. Це стало основою для обґрунтування актуальності обраного методу для збереження культурної спадщини в Україні.

У процесі реалізації завдань роботи була розроблена та апробована методика фотограмметричної зйомки об'єктів на прикладі мозаїк. Це дозволило створити високоякісну цифрову копію об'єкта з урахуванням усіх його деталей. Аналіз отриманої моделі показав, що фотограмметрія є надійним інструментом для документування та подальшого дослідження культурних об'єктів. Це підтверджує високу точність і доступність даної технології, що дозволяє використовувати її як для архівування, так і для відтворення об'єктів у разі їх руйнування.

Завдяки створенню тривимірної моделі було також визначено перспективи застосування фотограмметрії для вирішення проблем у галузі реставрації. Зокрема, цифрові копії культурних об'єктів можуть бути використані для реставраційних робіт без ризику додаткового пошкодження оригіналу. Це

дозволяє зберегти оригінальні риси об'єктів культурної спадщини та уникнути втрати цінних деталей.

Серед рекомендацій для подальшого використання фотограмметрії було зазначено необхідність розширення спектру цифрових технологій у роботі з культурними об'єктами, вдосконалення методів обробки фотограмметричних даних, а також впровадження програм підтримки для малих музеїв та приватних колекцій, що дозволить зробити технологію більш доступною. Також важливою є співпраця з міжнародними організаціями, що має на меті обмін технологіями та досвідом у сфері збереження культурної спадщини.

Отже, використання фотограмметрії у сфері збереження культурної спадщини є перспективним напрямом, який дозволяє ефективно документувати та відновлювати об'єкти. Подальший розвиток цієї технології та її інтеграція в національні програми збереження культурної спадщини може суттєво змінити підходи до охорони культурних цінностей. Це забезпечить їх збереження для майбутніх поколінь і розширить доступ до культурної спадщини, сприяючи її популяризації на міжнародному рівні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про охорону культурної спадщини».
2. ЮНЕСКО. Конвенція про охорону всесвітньої культурної та природної спадщини. – Париж, 1972.
3. Chapman H. Using Photogrammetry for Heritage Preservation / H. Chapman // *Heritage Science Journal*. – 2019. – № 3. – С. 45–52.
4. Свидрук І. І. Методи та інструменти управління просуванням Інтернет-магазинів / І. І. Свидрук, Ю. Б. Миронов // *Торгівля, комерція, підприємництво*. – 2012. – Вип. 14. – С. 20–24.
5. Міністерство культури України. Національний інститут культурної спадщини. Збереження культурної спадщини в Україні: виклики та перспективи. – Київ: Наук. вид., 2020.
6. Bashnyanin G. I. Regulation of Investment Activities in the Banking Sector of Ukraine / G. I. Bashnyanin // *Economics Journal*. – 2021. – № 6. – С. 102–108.
7. Проект ЮНЕСКО «Цифрове збереження мозаїк Софійського собору в Києві». – Київ: ЮНЕСКО, 2019.
8. Бабенко С. В. Сучасні підходи до охорони культурної спадщини України / С. В. Бабенко // *Наукові записки НАН України*. – 2020. – № 5. – С. 74–83.
9. Венеційська хартія. Міжнародні принципи реставрації і консервації пам'яток. – Венеція, 1964.
10. Труш Н. В. Консервація архітектурних об'єктів: методологічні аспекти / Н. В. Труш // *Архітектурна спадщина*. – 2018. – № 4. – С. 50–63.
11. Конвенція ЮНЕСКО про охорону нематеріальної культурної спадщини. – Париж, 2003.
12. Загороднюк П. А. Реставрація архітектурної спадщини: нові методи та підходи / П. А. Загороднюк // *Архітектура і сучасність*. – 2019. – № 2. – С. 20–35.
13. Манченко І. І. Використання цифрових технологій у збереженні

- культурної спадщини / І. І. Манченко // Цифрові технології. – 2020. – № 9. – С. 15–26.
14. Бурське угода про охорону архітектурної спадщини. – Бур, 1999.
15. Гриценко О. В. Правові аспекти збереження культурної спадщини в Україні / О. В. Гриценко // Право і культура. – 2019. – № 3. – С. 40–51.
16. Капустіна Т. Г. Соціальний аспект збереження культурної спадщини / Т. Г. Капустіна // Соціологія та культура. – 2021. – № 6. – С. 75–89.
17. Конвенція ЮНЕСКО про захист культурної спадщини в умовах збройних конфліктів. – Гаага, 1954.
18. Рубан М. В. Інноваційні методи збереження архітектурної спадщини / М. В. Рубан // Архітектурна наука. – 2020. – № 3. – С. 32–45.
19. Іванов С. І. Використання фотограмметрії для реставрації мозаїчних зображень / С. І. Іванов // Технології і реставрація. – 2019. – № 7. – С. 15–22.
20. Лазаренко В. П. Віртуальні тури як засіб популяризації культурної спадщини / В. П. Лазаренко // Культура і технології. – 2020. – № 8. – С. 25–35.
21. Петренко О. І. Правове регулювання авторських прав на цифрові копії культурних об'єктів / О. І. Петренко // Право і цифрова спадщина. – 2021. – № 2. – С. 18–29.
22. Юрченко Н. О. Стандарти створення цифрових моделей для збереження культурних об'єктів / Н. О. Юрченко // Цифрові технології і культурна спадщина. – 2020. – № 4. – С. 38–47.
23. Агафонова Л. О. Лазерне сканування у збереженні архітектурної спадщини / Л. О. Агафонова // Архітектурний вісник. – 2020. – № 6. – С. 10–22.
24. Іванова А. М. Використання біотехнологій для захисту історичних споруд від мікроорганізмів / А. М. Іванова // Біологія і культура. – 2020. – № 5. – С. 12–21.
25. Лещенко П. А. Системи моніторингу стану культурних об'єктів / П. А. Лещенко // Інновації у збереженні спадщини. – 2021. – № 3. – С. 15–26.

26. Сидоренко І. М. Роль громад у збереженні культурної спадщини / І. М. Сидоренко // Соціологія і спадщина. – 2020. – № 4. – С. 30–41.
27. Italian Ministry of Culture. Digital Restoration of the Colosseum. – Rome, 2020.
28. French Ministry of Culture. Restoration of Notre-Dame Cathedral: A Photogrammetric Approach. – Paris, 2020.
29. German Ministry of Cultural Heritage. Reconstruction of Dresden Castle Using Photogrammetry. – Berlin, 2020.
30. British Heritage Society. Preservation of Stonehenge Using Laser Scanning. – London, 2019.
31. UNESCO. Guidelines for the Preservation of Cultural Heritage. – Paris, 2020.
32. Spanish Ministry of Culture. Digital Preservation of Mosaics in Alhambra. – Granada, 2020.
33. González J. C. Digital Preservation of the Alhambra Mosaics / J. C. González // Spanish Heritage Review. – 2020. – № 5. – С. 45–52.
34. Japanese Agency for Cultural Affairs. Preservation of Kiyomizu Temple Using Photogrammetry. – Kyoto, 2020.
35. Chinese Ministry of Cultural Heritage. The Role of Photogrammetry in Preserving the Great Wall. – Beijing, 2020.
36. U.S. National Park Service. The Use of Drones for Heritage Preservation. – Washington, D.C., 2021.
37. ICOMOS. International Guidelines for the Use of Photogrammetry in Heritage Conservation. – Paris, 2021.
38. UNESCO. Digital Preservation of the Colosseum. // UNESCO Report, 2021.
39. Greek Ministry of Culture. Photogrammetry and the Restoration of the Acropolis. – Athens, 2021.
40. Peruvian Ministry of Culture. Digital Documentation of Machu Picchu. – Lima, 2020.
41. Turkish Ministry of Culture. Digital Preservation of Göbekli Tepe. – Ankara, 2020.

42. ЮНЕСКО. Цифрове збереження мозаїк Софійського собору в Києві. – Київ: ЮНЕСКО, 2021.
43. British Heritage Society. Digital Documentation of Westminster Abbey. – London, 2020.
44. Indian Ministry of Culture. Photogrammetry and the Preservation of the Taj Mahal. – Agra, 2020.
45. Egyptian Ministry of Antiquities. Digital Preservation of the Pyramids at Giza. – Cairo, 2020.
46. Turkish Ministry of Culture. The Role of Photogrammetry in Preserving Cappadocian Caves. – Ankara, 2020.
47. UNESCO. Preservation of Petra Using Photogrammetry. – Amman, 2020.
48. Norwegian Heritage Council. Preservation of Norwegian Stave Churches Using Photogrammetry. // Norwegian Heritage Journal, 2020.
49. Icelandic Cultural Preservation Board. Digital Preservation of Iceland's Cultural Landscapes. // Icelandic Heritage Review, 2021.
50. German Ministry of Culture. Digital Documentation of Contemporary Art Using Photogrammetry. // German Heritage Journal, 2021.
51. French Ministry of Culture. Preservation of Historic Bridges Using Photogrammetry. // French Heritage Review, 2020.
52. UNESCO World Heritage Centre.
53. Міністерство культури України. Програма цифрової трансформації культурної спадщини України. – Київ: МКУ, 2022.
54. ЮНЕСКО. Використання сучасних технологій для збереження культурної спадщини: доповідь 2021 року. – Париж: ЮНЕСКО, 2021.
55. Petzet M. Principles of Monument Restoration in Heritage Sites / M. Petzet // Heritage and Conservation. – 2017. – № 4. – С. 30–38.
56. Мартинюк О. В. Цифрові технології в археології та збереженні культурних об'єктів / О. В. Мартинюк // Археологія і спадщина. – 2019. – № 5. – С. 112–121.

- 57.Павленко І. Г. Технології фотограмметрії для охорони культурної спадщини / І. Г. Павленко // Журнал культурної спадщини. – 2020. – № 6. – С. 78–84.
- 58.Супрун В. К. Використання 3D-сканування в архітектурній реставрації / В. К. Супрун // Архітектурні дослідження. – 2019. – № 7. – С. 92–101.
- 59.Clark K. Digital Tools in Cultural Heritage Preservation / K. Clark // International Journal of Heritage Studies. – 2021. – № 3. – С. 45–58.
- 60.ЮНЕСКО. Терестрична фотограмметрія як метод збереження культурних об'єктів: посібник. – Париж: ЮНЕСКО, 2020.
- 61.Кузнецов М. П. Методи тривимірного сканування в архітектурі / М. П. Кузнецов // Архітектурна спадщина. – 2021. – № 8. – С. 15–22.
- 62.Головко О. М. Цифрові технології в реставрації історичних пам'яток / О. М. Головко // Технічні науки. – 2021. – № 10. – С. 68–76.
- 63.Вовк В. С. Інноваційні методи збереження архітектурної спадщини / В. С. Вовк // Науковий вісник архітектури. – 2020. – № 12. – С. 112–119.
- 64.Rizzi A. 3D Modelling Techniques for Cultural Heritage Preservation / A. Rizzi // Journal of Architectural Heritage. – 2019. – № 9. – С. 134–146.
- 65.ЮНЕСКО. Цифрові технології в охороні культурної спадщини. – Париж: ЮНЕСКО, 2021.
- 66.Гайдай М. Ф. Технології цифрової реставрації археологічних пам'яток / М. Ф. Гайдай // Археологічна спадщина. – 2020. – № 14. – С. 85–93.
- 67.Gagliardini G. Applications of Photogrammetry in Historical Monument Conservation / G. Gagliardini // International Journal of Digital Heritage. – 2020. – № 3. – С. 45–54.
- 68.ЮНЕСКО. Використання фотограмметрії для збереження культурних пам'яток. – Париж: ЮНЕСКО, 2019.
- 69.Черненко О. В. Фотограмметрія у відтворенні архітектурних об'єктів / О. В. Черненко // Наукові дослідження архітектури. – 2021. – № 5. – С. 92–101.
- 70.Дяченко І. П. Методи візуалізації у збереженні культурної спадщини / І. П. Дяченко // Вісник технічних наук. – 2019. – № 4. – С. 41–50.

71. Bergamasco M. Digital Heritage and 3D Documentation of Cultural Heritage Sites / M. Bergamasco // *Journal of Cultural Heritage Studies*. – 2020. – № 7. – С. 62–75.
72. Лисенко В. П. Цифрове збереження культурних об'єктів: нові підходи / В. П. Лисенко // *Архітектурна спадщина*. – 2020. – № 11. – С. 104–112.
73. ЮНЕСКО. Новітні методи документування архітектурних пам'яток за допомогою цифрових технологій. – Париж: ЮНЕСКО, 2018.
74. Остапенко М. О. Використання дронів для збереження культурної спадщини / М. О. Остапенко // *Технологічний вісник*. – 2019. – № 9. – С. 95–103.
75. Cantini F. Terrestrial Photogrammetry: A Modern Tool for Cultural Heritage Conservation / F. Cantini // *International Journal of Digital Heritage*. – 2021. – № 10. – С. 39–50.
76. Федоров С. І. Використання цифрових моделей в архітектурній реставрації / С. І. Федоров // *Архітектурна наука*. – 2021. – № 6. – С. 84–92.
77. ЮНЕСКО. Інноваційні технології для збереження культурної спадщини: виклики та можливості. – Париж: ЮНЕСКО, 2022.
78. Карпенко Н. В. Цифрові моделі архітектурних пам'яток: нові підходи / Н. В. Карпенко // *Архітектурний журнал*. – 2019. – № 7. – С. 121–129.
79. Юрченко І. А. Застосування фотограмметрії в археології / І. А. Юрченко // *Археологічні дослідження*. – 2020. – № 8. – С. 73–82.
80. UNESCO. Digital Documentation Techniques in Heritage Conservation / UNESCO // *Cultural Heritage Reports*. – 2021. – № 5. – С. 54–63.
81. Черниш А. О. Технології цифрової реставрації та збереження історичних об'єктів / А. О. Черниш // *Науковий вісник технічних наук*. – 2019. – № 2. – С. 67–75.
82. Rami L. Use of 3D Models in the Conservation of Cultural Monuments / L. Rami // *International Journal of Architectural Conservation*. – 2020. – № 6. – С. 48–58.

- 83.Власенко С. П. Сучасні методи фотограмметрії у збереженні пам'яток архітектури / С. П. Власенко // Архітектурна спадщина. – 2020. – № 4. – С. 33–41.
- 84.Філіпова О. К. Інтеграція цифрових технологій у процесі реставрації / О. К. Філіпова // Архітектурна реставрація. – 2021. – № 9. – С. 44–52.
- 85.ЮНЕСКО. Використання цифрових моделей для відтворення культурних об'єктів. – Париж: ЮНЕСКО, 2019.

Технічні характеристики використаного обладнання

**1. Камера**

- **Модель:** Nikon D850
- **Роздільна здатність:** 45.7 МП
- **Формат зображення:** RAW, JPEG
- **Об'єктив:** 24-70 мм, f/2.8
- **Фокусна відстань для зйомки:** 35 мм

**2. Програмне забезпечення**

- **Reality Capture** – для обробки фотограмметричних зображень і побудови 3D-моделі
- **Paint** – для візуалізації контрольних точок
- **Photoshop** – для попередньої обробки зображень перед створенням моделі

**Покрокова методика фотограмметричного дослідження**

**1. Підготовка об'єкта**

- Вибір освітлення для зйомки мозаїки; уникнення різких тіней.
- Попередня очистка об'єкта від сторонніх елементів, які можуть вплинути на якість моделі.

**2. Процес зйомки**

- Зйомка об'єкта з різних кутів (мінімум 70 кадрів для кожної мозаїки).
- Зйомка з трьох основних рівнів висоти: низький, середній, високий ракурси.

**3. Попередня обробка зображень**

- Зображення завантажуються в Adobe Photoshop для корекції кольору та видалення небажаних елементів.

**4. Створення моделі**

- Завантаження зображень у Reality Capture, формування хмари точок, побудова текстурованої поверхні.

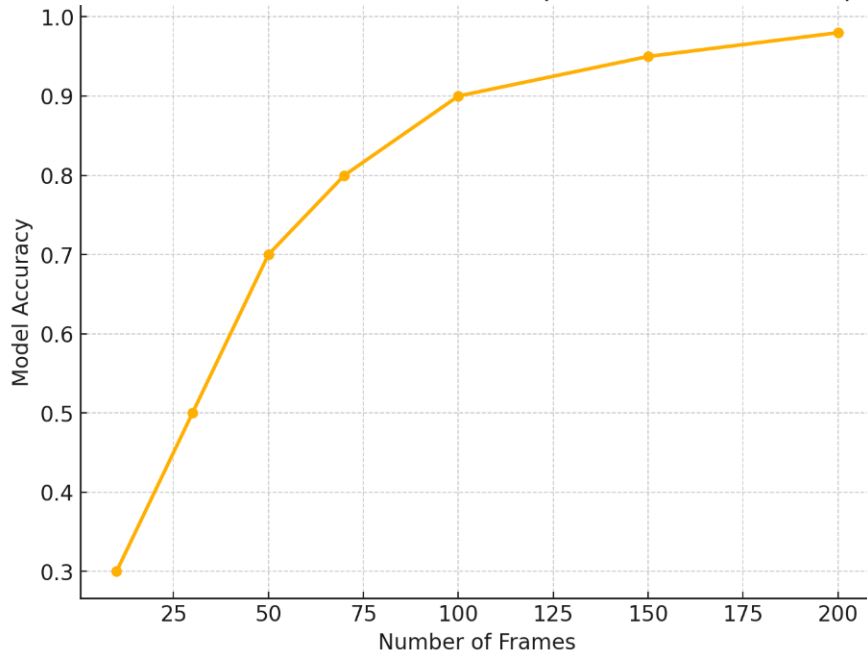
**Вибір параметрів для побудови 3D-моделі в Reality Capture**

- **Щільність хмари точок:** Висока
- **Побудова сітки:** Ультра-детальна, 5 млн полігонів
- **Текстурування:** 8192 пікселів, багатошарова текстура для збереження всіх деталей поверхні
- **Розмір текстурних тайлів:** 8192 x 8192

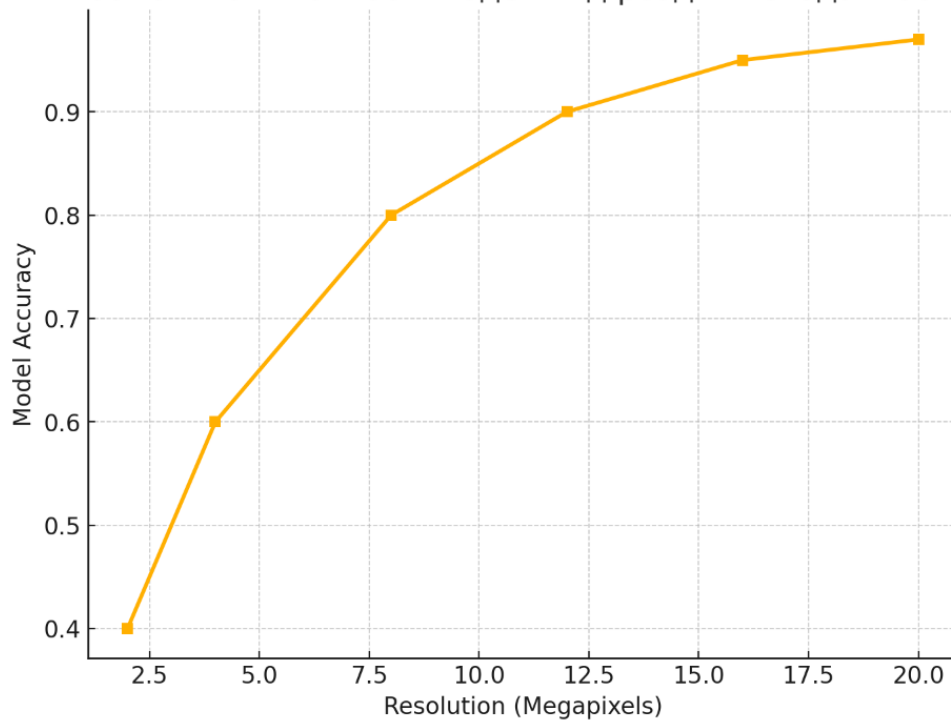
## Графіки з точністю моделі

**Графік Г.1.** Співвідношення кількості кадрів до точності створеної моделі

Графік Г.1. Співвідношення кількості кадрів до точності створеної моделі

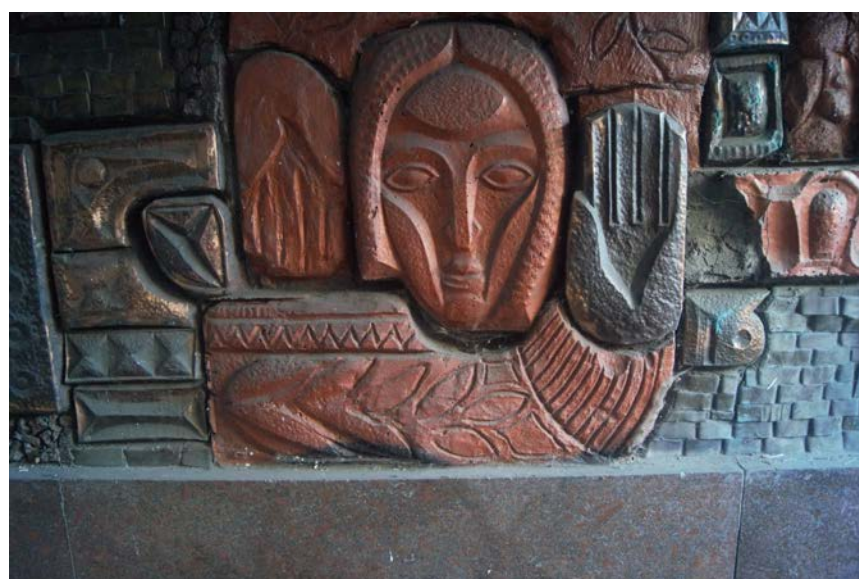
**Графік Г.2.** Залежність точності моделі від роздільної здатності зображень

Графік Г.2. Залежність точності моделі від роздільної здатності зображень



Фотографії об'єктів до обробки

**Д. 1. Фотографії об'єкта «Зв'язок світів» до обробки:** включає 3-5 зображень мозаїк в різних ракурсах.



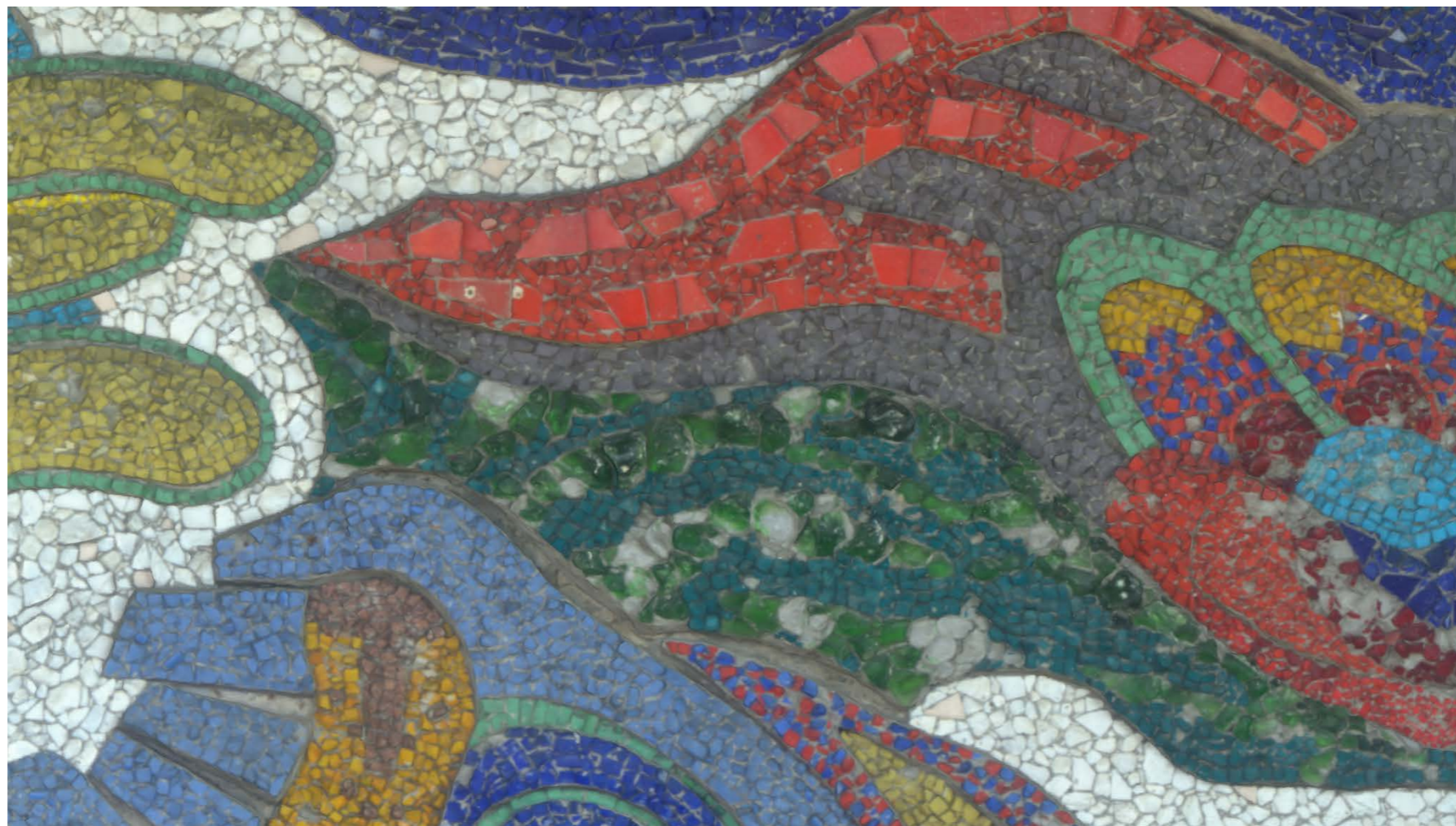


**Д. 2. Фотографії об'єкта « Вітер» до обробки: включає 3-5 зображень мозаїк в різних ракурсах.**



Ортографічні зображення мозаїк

Е. 1. Фінальне ортографічне зображення «Вітер» : вигляд спереду та крупний план текстур.



Е. 2. Фінальне ортографічне зображення «Зв'язок світів» : вигляд спереду та крупний план текстур.

