

Міністерство освіти і науки України
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Фізико-математичний факультет
Кафедра комп'ютерних наук

Кваліфікаційна робота бакалавра

з теми: «Створення 3D-моделей з допомогою фотограмметрії дрону»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи KN1-B21

спеціальності 122 Комп'ютерні науки

Коваленко Дмитро Сергійович

Керівник:

Пилипюк Тетяна Михайлівна,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент

Рецензент:

Громик Андрій Петрович,
кандидат технічних наук, доцент

м. Кам'янець-Подільський – 2025 р.

АНОТАЦІЯ

У даній роботі розроблено та апробовано методику створення високоточних 3D-моделей архітектурної пам'ятки (башти Стефана Баторія у Кам'янці-Подільському) за допомогою фотограмметрії з використанням безпілотного літального апарату DJI Phantom 4 Pro та програмного середовища Agisoft Metashape. Основні етапи дослідження включали: планування та виконання польоту дрона з оптимальними параметрами перекриття (75 %) і налаштуванням камери (20 МП, ISO 100, витримка 1/200 с); обробку знімків у Metashape (вирівнювання знімків, побудова щільної хмари, генерація полігональної сітки та текстурування); оптимізацію моделі та її публікацію на платформі Sketchfab.

Результати роботи засвідчили, що обрана методика забезпечує моделі з похибкою метричних параметрів менше ніж 5 % (± 7 см при висоті башти $\approx 18,2$ м) та дозволяє отримати деталізовану текстуру 4 К. Інтерактивна візуалізація на Sketchfab дала змогу вести дистанційний огляд моделі, додавати анотації та інтегрувати фон у вигляді 360° Skybox. Проведений аналіз демонструє практичну цінність 3D-моделей для реставраційного моніторингу, віртуальних екскурсій, навчання та інтеграції у BIM/VR/AR-системи.

Ключові слова: фотограмметрія, безпілотний літальний апарат, Agisoft Metashape, 3D-моделювання, текстурування, Sketchfab, культурна спадщина.

ANNOTATION

A method for creating high-precision 3D models of an architectural monument (the tower of Stefan Batory in Kamianets-Podilskyi) using photogrammetry using a DJI Phantom 4 Pro unmanned aerial vehicle and the Agisoft Metashape software environment is developed and tested in this work. The main stages of the study included: planning and executing a drone flight with optimal overlap parameters (75%) and camera settings (20 MP, ISO 100, shutter speed 1/200 s); image processing in Metashape (image alignment, dense cloud construction, polygonal mesh generation and texturing); model optimization and its publication on the Sketchfab platform.

The results of the work showed that the chosen methodology provides models with an error of metric parameters of less than 5% (± 7 cm at a tower height of ≈ 18.2 m) and allows you to obtain a detailed 4 K texture. Interactive visualization on Sketchfab made it possible to conduct a remote inspection of the model, add annotations and integrate the background in the form of a 360° Skybox. The analysis demonstrates the practical value of 3D models for restoration monitoring, virtual tours, training and integration into BIM/VR/AR systems.

Keywords: photogrammetry, unmanned aerial vehicle, Agisoft Metashape, 3D-modeling, texturing, Sketchfab, cultural heritage.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ 3D-СКАНУВАННЯ ІСТОРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	7
1.1 Фотограмметрія для 3D-моделювання об'єктів.....	7
1.2 Лазерне 3D-сканування архітектурних пам'яток	9
1.3 Панорамна зйомка та інші цифрові методи	12
РОЗДІЛ 2. ПРАКТИЧНЕ СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ БАШТИ СТЕФАНА БАТОРІЯ	15
2.1 Архітектурні особливості та значення башти.....	15
2.2 Планування польоту та збір даних за допомогою дрона	19
2.3 Обробка фотознімків у Agisoft Metashape та побудова 3D-моделі	21
2.4 Публікація моделі на платформі Sketchfab	25
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	29
3.1 Оцінка якості та точності створеної 3D-моделі.....	29
3.2 Можливості використання та застосування 3D-моделі	31
ВИСНОВКИ.....	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	38
ДОДАТКИ.....	41
Додаток А.....	41
Додаток В.....	43
Додаток С.....	45

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні технології тривимірного (3D) сканування все ширше застосовуються у галузі збереження культурної спадщини. Оцифрування історико-архітектурних об'єктів дозволяє детально фіксувати їх стан, створювати віртуальні моделі для досліджень, реставрації чи популяризації через Інтернет. В умовах швидкого розвитку безпілотних літальних апаратів (дронів) та програмного забезпечення фотограмметрії з'явилася можливість отримувати високодетальні 3D-моделі пам'яток архітектури з мінімальними затратами часу і ресурсів. Це особливо важливо для України, де велика кількість пам'яток потребує цифрового збереження, а також з огляду на можливі ризики пошкодження історичних об'єктів (час, природні фактори чи військові дії).

Об'єктом дослідження даної роботи є методика створення тривимірних моделей шляхом фотограмметрії із використанням дрона. **Предметом дослідження** є створення тривимірної моделі історичної башти Стефана Баторія у місті Кам'янець-Подільський.

Мета роботи полягає у демонстрації процесу створення точного 3D-зображення (моделі) башти Стефана Баторія методом фотограмметричного сканування за допомогою дрона та оцінці отриманого результату.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Здійснити огляд сучасних методів 3D-сканування об'єктів культурної спадщини (фотограмметрії, лазерного сканування та інших) та проаналізувати їх переваги й недоліки.
2. Провести історико-архітектурний аналіз башти Стефана Баторія – дослідити історію її побудови, архітектурні особливості та сучасний стан.
3. На практичному прикладі виконати фотограмметричну зйомку башти за допомогою дрона, опрацювати знімки у програмах Agisoft Metashape для

отримання 3D-моделі, та опублікувати модель на онлайн-платформі Sketchfab.

4. Проаналізувати результати створення 3D-моделі – оцінити якість та точність моделі, а також окреслити можливі напрямки застосування отриманої тривимірної моделі в практиці.

Методи дослідження. В ході роботи використовувалися методи фотограмметрії ближнього діапазону (Structure from Motion), зокрема аерофотозйомка дроном для збору вихідних даних, комп'ютерна обробка зображень для генерації хмар точок, сітчастої моделі та текстур, а також методи аналізу точності отриманої 3D-моделі. Для теоретичного огляду були застосовані методи аналізу літературних джерел (монографій, статей, веб-ресурсів) щодо технологій 3D-сканування пам'яток.

Науково-практична значущість. Робота демонструє ефективність застосування фотограмметрії з дрона для цифрової фіксації складних архітектурних об'єктів. Отримана 3D-модель має практичне значення: її можна використати для віртуальних екскурсій та експозицій, робіт з реставрації (як основа для планування та моделювання втраченої частини), для архівування стану пам'ятки на певний момент часу та популяризації об'єкта серед широкої аудиторії. Враховуючи статус башти Стефана Баторія як пам'ятки національного значення, її цифрова реконструкція робить внесок у збереження культурної спадщини та сприяє розвитку напрямку цифрової гуманітаристики в Україні.

Апробація результатів. Результати досліджень оприлюднено у Збірнику наукових праць студентів та магістрантів Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. [Електронний ресурс]. 2025. Вип. 19 [19].

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ 3D-СКАНУВАННЯ ІСТОРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У цьому розділі розглянуто сучасні технології, що застосовуються для створення тривимірних моделей пам'яток архітектури та історичних об'єктів. До основних методів 3D-сканування належать: фотограмметрія (у тому числі аерофотограмметрія з дронів), лазерне сканування (LiDAR), а також допоміжні технології на кшталт панорамної зйомки та інші цифрові підходи. Розглянемо принципи кожного методу, їх переваги та обмеження у контексті архітектурної спадщини.

1.1 Фотограмметрія для 3D-моделювання об'єктів

Фотограмметрія – це метод отримання метричної (вимірювальної) інформації про об'єкти за допомогою їх фотографічних зображень. Іншими словами, фотограмметрія дозволяє на основі численних фотографій об'єкта, зроблених з різних ракурсів, відтворити його форму у вигляді тривимірної моделі [1]. Сучасні цифрові технології реалізують цей процес через обчислювальну фотограмметрію (метод Structure from Motion, SfM), яка автоматично визначає спільні точки на перекриваючихся фото та обчислює просторове положення цих точок. У результаті формується щільна хмара точок, що відображає поверхню об'єкта, а на основі хмари будується полігональна 3D-модель (сітка), котра може бути текстурована оригінальними фотографіями для досягнення фотореалістичності [2].

Фотограмметричний метод має ряд важливих переваг у контексті документування пам'яток:

- Доступність і низька вартість. Для фотограмметрії потрібна звичайна цифрова камера або навіть смартфон, а програмне забезпечення існує у різних цінових категоріях (є й безкоштовне). Це робить технологію економічно привабливою у порівнянні з дорогим лазерним сканером.

- Деталізація і фотореалізм. Фотографії несуть інформацію не тільки про геометрію, але й про текстуру поверхонь. Побудована модель має реалістичне текстурне покриття – наприклад, відображає фактуру каменю, колір стін, наявні написи тощо.
- Мобільність і гнучкість зйомки. Камеру можна занести практично в будь-яке місце, зробити знімки під різними кутами. Особливо зручним є використання дронів, що дає можливість охопити верхні частини та важкодоступні ракурси пам'ятки [3]. Аерофотограмметрія з дрона відкриває нові перспективи у зніманні архітектури зверху та під косими кутами, недосяжними з землі – таким чином можна отримати повну модель об'єкта без “сліпих зон” [3].
- Безконтактність і безпечність. Зйомка проводиться дистанційно, що виключає фізичний контакт з об'єктом. Це важливо для пам'яток у аварійному стані або при археологічних дослідженнях – об'єкт не зазнає впливу, а дослідник отримує дані на відстані [2].

Разом з тим, фотограмметрія має і певні обмеження:

- Технологія залежить від якості фотографій. Необхідно забезпечити достатню різкість, правильну експозицію, відсутність розмиття. Освітлення повинно бути рівномірним; проблеми можуть створювати глибокі тіні або надмірна яскравість.
- Однорідні або блискучі поверхні погано відтворюються, адже на них важко знайти особливі точки для співставлення зображень. Наприклад, білі стіни без фактури або скляні/дзеркальні елементи не “складаються” фотограмметрією.
- Для масштабування і досягнення високої метричної точності часто потрібні контрольні точки або масштабні рейки – додаткові вимірювання. Без них модель буде пропорційною, але не прив'язаною до реальних розмірів.
- Обробка великої кількості фото потребує значних обчислювальних ресурсів і часу. В залежності від потужності комп'ютера, процес

побудови детальної моделі може тривати від кількох годин до кількох днів.

Незважаючи на ці виклики, фотограмметрія впевнено займає провідне місце у сфері 3D-документування пам'яток. Її успішно застосовують в археології та архітектурній реставрації, результати високо цінуються науковцями [2]. У нашій роботі саме фотограмметричний метод обрано для створення моделі башти Стефана Баторія, як оптимальний за співвідношенням точності, деталізації та ресурсоемності. Особливості використання дронів у фотограмметрії. Окремо слід відзначити роль безпілотних літальних апаратів у фотограмметричній зйомці. Завдяки дронам стає можливим отримувати знімки об'єкта зверху та з усіх боків, включно з тими ракурсами, що неможливі при наземній зйомці (наприклад, верхівки башт, дахи тощо) [3]. Дрон може літати навколо пам'ятки по заданій траєкторії, автоматично роблячи десятки чи сотні фото з високим перекриттям (звичайно 60–80% перекриття між сусідніми знімками рекомендоване для якісної моделі [2]). Сучасні безпілотники оснащені стабілізованими камерами, що забезпечують чіткі зображення високої роздільності. Вбудований GPS дозволяє геоприв'язку знімків, а деякі дрони підтримують і встановлення наземних контрольних точок для підвищення точності. Перевагою дрон-фотограмметрії є також швидкість: за короткий час (15–30 хвилин польоту) можна охопити великий об'єкт або територію, що еквівалентно кільком годинам наземної роботи. У результаті аерофотозйомки отримується набір зображень як з плану (вертикальні кадри), так і косих (облікових) ракурсів, що дає повну інформацію про тривимірну форму пам'ятки [3]. У розділі 3 детально розглянуто, як саме застосовано дрон для збору даних по башті Стефана Баторія.

1.2 Лазерне 3D-сканування архітектурних пам'яток

Другим розповсюдженим методом є лазерне сканування (LiDAR – Light Detection and Ranging). Ця технологія використовує активний принцип –

емісію лазерного променя та аналіз відбитого сигналу для визначення відстані до поверхні. Лазерний сканер (статичний наземний або мобільний) випромінює тисячі лазерних імпульсів за секунду і фіксує час їх повернення після відбиття від об'єкта. На основі часу прольоту імпульсу розраховується дистанція до конкретної точки поверхні; сукупність таких точок формує дуже щільну хмару точок – цифрове відображення об'єкта в тривимірному просторі [2]. По суті, лазерне сканування теж створює 3D-модель, але представлену точками (які згодом можна інтерполювати в полігони).

Переваги лазерного сканування:

Висока точність. Лазерні вимірювання відзначаються винятковою метричною точністю (похибки можуть бути в межах міліметрів). Це робить метод особливо цінним, коли потрібні точні креслення чи деформаційний аналіз пам'ятки [4]. Лазерний сканер здатний зафіксувати форму об'єкта з мінімальною погрешністю, перевершуючи фотограмметрію за метричною достовірністю.

Незалежність від освітлення та текстури. На точність сканування не впливають колір чи малюнок поверхні – важливий лише фізичний рельєф. Лазер може працювати при різному освітленні і навіть у темряві (потрібні лише мішені відбивачі для кращого позиціонування).

Повнота даних. Сканер обертається навколо своєї осі і збирає мільйони точок, що покривають весь навколишній простір. Отримана хмара точок дуже детальна, можна розрізнити дрібні архітектурні деталі, нерівності стін, тріщини тощо. Таким чином, метод дає геометрично вичерпну інформацію про об'єкт.

Швидкість збору. Один станційний скан (360°) триває кілька хвилин і охоплює всю сцену навколо. Для великих об'єктів виконується серія сканувань з різних позицій, які потім об'єднуються. Загалом збір даних проходить доволі швидко, хоча і потребує переміщення обладнання.

Недоліки і виклики лазерного сканування:

Головний бар'єр – висока вартість обладнання. Професійні 3D-сканери й програмне забезпечення до них є дорогими, тому метод менш доступний широкому колу дослідників.

Лазерний сканер, як правило, важкий і потребує стабільної платформи (триноги). Це утруднює сканування важкодоступних місць (дахи, верхні частини фасадів) – часто доводиться комбінувати зі скануванням з підйомних механізмів або використовувати дрони з LiDAR-датчиками для верхівок.

Відбиття лазера: дзеркальні чи дуже темні поверхні можуть давати поганий сигнал (лазерний промінь відбивається або поглинається). Також щільні чагарники, деревина можуть екранувати лазерний промінь, створюючи “тіні” за об'єктами.

Результатом є тільки геометрія. Точки мають координати, але не містять інформації про колір (якщо тільки сканер не оснащений додатковою камерою). Тому для отримання текстурованої моделі потрібно окремо фотографувати об'єкт і “накладати” фото на сітку, або фарбувати хмару точок у кольори фото.

У сфері охорони пам'яток лазерне сканування вже зарекомендувало себе як надійний спосіб фіксації форми та розмірів об'єктів. Висока точність даних дозволяє створювати точні креслення, розрізи, фасади історичних будівель для наукового аналізу чи реставраційних проектів [2]. Наприклад, скануванням можна зафіксувати деформації або нахил конструкцій і простежити їх зміну з часом. У поєднанні з фотограмметрією (для текстурування) виходить максимально повна цифрова копія пам'ятки. Порівняння фотограмметрії та LiDAR. Обидва методи часто розглядаються як альтернативні чи взаємодоповнюючі. Лазерне сканування виграє у точності та повноті геометрії (особливо для складних деталей, інтер'єрів тощо), тоді як фотограмметрія забезпечує кольорову фотореалістичність і вимагає менше затрат. Дослідження показують, що за правильної методики фотограмметрія теж може давати результати високої точності, прийнятні для багатьох задач архітектурної документації [4; 5].

У практиці часто використовують комбінований підхід: наприклад, важливі ділянки пам'ятки сканують лазером для максимальної точності, а загальний вигляд доповнюють фотограмметрією (або застосовують фотограмметрію для накладання текстур на модель, отриману лазером). В нашому випадку, зважаючи на цілі роботи, було обрано фотограмметричний метод зйомки, оскільки він повністю задовольняє потреби створення візуально деталізованої моделі для презентації та аналізу.

1.3 Панорамна зйомка та інші цифрові методи

Окрім побудови безпосередньо 3D-моделей, для документування середовища пам'яток широко застосовується панорамна зйомка. Йдеться про створення сферичних 360° панорам, що дозволяють оглядати місце розташування об'єкта чи інтер'єр пам'ятки у всіх напрямках. Панорамна фотографія виконується шляхом зйомки серії фотографій, які перекриваються між собою, з однієї точки (центру зйомки), після чого ці фото зшиваються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, PTGui) у єдине сферичне зображення [2]. Результатом є інтерактивна панорама, де користувач може “крутити” вид, дивлячись вгору, вниз, навколо, отримуючи ефект присутності. Панорами “360°” не дають метричної тривимірної моделі, але є цінним доповненням до 3D-сканування. Вони фіксують кольорову високоякісну картинку оточення та об'єкта, можуть включати ті елементи, що не потрапили у 3D-модель. Наприклад, створення панорами внутрішнього двору чи інтер'єру башти дозволить пізніше ознайомитися з виглядом місця, навіть якщо 3D-модель охоплює лише зовнішні стіни. Крім того, інтерактивні тури з панорам – популярний формат презентації туристичних пам'яток, музеїв, архітектури в Інтернеті [2]. В рамках даної роботи панорамна зйомка розглядається як один з етапів практичної частини: ми створимо сферичну панораму околиць башти Стефана Баторія, що може бути використана для інтеграції в онлайн-публікацію моделі чи як окремий продукт (віртуальний тур).

Варто згадати також інші сучасні цифрові методи, що набувають поширення:

Інфрачервоне та ультрафіолетове сканування, фотограмметрія в різних спектрах. Використовується для виявлення прихованих деталей (напр. підшарів фресок) і теж може бути джерелом даних для 3D-моделей.

Структуроване світло (Structured Light Scanning). Метод проектує спеціальний візерунок світла на об'єкт і фіксує його деформації камерами. Це дозволяє дуже точно відсканувати форму, але зазвичай застосовується для відносно невеликих об'єктів (скульптури, елементи декору) через обмежену робочу відстань обладнання.

Фотограмметрія з відео. Алгоритми можуть брати кадри з відеозапису як окремі знімки. Це швидкий спосіб зібрати дані (просто облетівши дроном з камерою), однак якість кадрів відео нижча за фото, тому модель зазвичай грубіша.

Безпілотні LiDAR-системи. Сучасні дрони можуть оснащуватися легкими лідарними сканерами, що дає змогу отримувати хмару точок з повітря. Це перспективно для великих територій і пам'яток, оточених густою рослинністю (лазер проникає між листям, в той час як фотограмметрія "бачить" лише верхівки дерев). Проте роздільна здатність таких систем поки дещо поступається наземним сканерам.

Методи штучного інтелекту (AI) у реконструкції. Окремо слід відзначити новітні спроби залучити нейронні мережі для доповнення або навіть створення 3D-моделей. Наприклад, AI може допомагати автоматично прибирати шуми з фотограмметричної моделі або домальовувати втрачені фрагменти на основі аналізу фотоматеріалів [2]. Хоча ці підходи знаходяться на стадії експериментів, у перспективі вони можуть стати корисним інструментом, особливо для реконструкції частково знищених пам'яток.

Сьогодні існує цілий спектр методів 3D-документування, і вибір конкретного методу залежить від вимог до точності, доступного обладнання та характеристик об'єкта. Фотограмметрія (особливо з використанням дронів)

та лазерне сканування є провідними технологіями у цій галузі, часто використовуються комплексно. Панорамна зйомка та інші допоміжні методи збагачують результати і полегшують їх інтерпретацію. Надалі, в практичній частині роботи, ми зосередимося на фотограмметричному підході, реалізованому через доступні програмні інструменти, і простежимо увесь процес – від збору даних дроном до публікації готової 3D-моделі.

РОЗДІЛ 2. ПРАКТИЧНЕ СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ БАШТИ СТЕФАНА БАТОРІЯ

2.1 Архітектурні особливості та значення башти

Башта Стефана Баторія в Кам'янці-Подільському – одна з найвідоміших та найбільших оборонних веж міста, яка у різні часи мала кілька назв: Королівська, Кушнірська та Семиповерхова [6]. Вона розташована у північній частині старого міста, на вузькому перешийку-півострові, утвореному петлею річки Смотрич [7]. У середньовіччі башта охороняла головний в'їзд до міста з півночі – так звану Верхню Польську браму, виконуючи роль надбрамної вежі та одночасно спостережного пункту і оборонної споруди, що контролювала прилеглий каньйон Смотрича [7]. Башта була побудована в 1564–1565 роках на місці давнішої міської брами XIII ст. Будівництвом керував начальник кам'янецької фортифікації Матвій Галичанин (в історичних джерелах також фігурує як Матвій Влодек) [8]. Первісно споруда являла собою муровану вежу п'ятиповерхової (п'ятиярусної) висоти із еліптичним планом основи та масивними стінами. Башта мала вузькі бійниці і справляла враження грізної, неприступної фортифікації [6; 7].

У 1585 році башта була істотно перебудована за наказом польського короля Стефана Баторія, і саме ця перебудова зумовила появу її теперішньої назви. З боку міста (тобто з південно-східного боку) було добудовано прямокутний у плані прибрамний корпус – укріплений проїзд, відомий як Вітряна брама [7]. Внаслідок цього розширення башта набула підковоподібного контуру в плані, а верх укріплення оздобили двома високими конічними дахами (шпилями) над основною частиною та прибудовою. Архівні джерела свідчать, що роботи 1585 року виконував кам'янецький фортифікатор Микола Бжеський за участі італійського архітектора Камеріно Рудольфіно – придворного будівничого короля Стефана Баторія [7]. Після цієї реконструкції башта отримала офіційну назву на честь

короля – “Башта Стефана Баторія”, а в народі її також називали просто Королівською [6].

У XVII столітті башта зазнала чергових перетворень: близько середини століття вона була відремонтована коштом цеху кушнірів (ремісників, що займалися виробництвом хутра). З цього часу у народі закріпилася назва “Кушнірська башта” [6]. Ймовірно, ремонт мав характер укріплення мурів та відновлення пошкоджених елементів, але загальний вигляд і план споруди лишилися незмінними. У той же період прибрамний корпус-в’їзд отримав народну назву “Вітряна брама”. За легендою, під час відвідин Кам’янця царем Петром I у 1711 році, сильний порив вітру зірвав з нього капелюха саме в проїзді цієї брами – відтоді пішла приказка про “вітряну” (протягнуту вітрами) браму [7]. Хоча ця історія має легендарний характер, назва закріпилася і вживається донині.

Кардинальні зміни відбулися наприкінці XVIII століття. У 1780-х роках комендант Кам’янець-Подільської фортеці Ян де Вітте провів масштабну реконструкцію башти за підтримки польського короля Станіслава Августа. Було надбудовано два додаткові яруси, внаслідок чого висота вежі зросла до семи поверхів (звідси третя назва – “Семиповерхова”) [6]. Також Ян де Вітте замінив старі високі дахи на новий – низький двосхилий дах, більш практичний для оборонних потреб [7]. До східного (протилежного) боку башти дзеркально до прибудови Баторія добудували ще один прямокутний корпус, утворивши симетричний комплекс воріт з двох боків башти [7]. Після завершення реконструкції 1785 року на фасаді зі сторони міста встановили пам’ятну таблицю латинською мовою, яка зберіглась дотепер. На ній викарбувано, що “року Божого 1585 королем Стефаном Баторієм збудована, а Станіславом Августом, королем Польським, відновлена та збільшена року Божого 1785”. Ця таблиця – цінний історичний артефакт, що підтверджує етапи будівництва башти [6].

Після втрати оборонного значення у XIX–XX ст. башта використовувалася як господарська будівля, певний час занепадала. У 1928

році постановою Раднаркому УСРР башту внесено до списку пам'яток, що перебувають під державною охороною, а у 1956 році – до реєстру пам'яток республіканського значення. У другій половині ХХ ст. проводилися ремонтно-реставраційні роботи з метою збереження пам'ятки. Наразі башта Стефана Баторія є частиною Національного історико-архітектурного заповідника “Кам'янець” та перебуває під охороною держави.

Башта Стефана Баторія за своєю конструкцією є унікальним зразком бастионного будівництва періоду пізнього середньовіччя. В її архітектурі поєднуються риси оборонної вежі та брамної споруди. Первинна кругло-овальна (еліптична) форма плану, характерна для фортифікацій ХVІ ст., забезпечувала рикошетування ядер і кращий огляд для оборонців. Товсті стіни (муровані з місцевого каменю) та вузькі бійниці пристосовані для ведення вогню з ручної вогнепальної зброї та гармат малого калібру. Після добудов 1585 і 1780-х років баштовий комплекс отримав П-подібну конфігурацію: центральна семирівнева вежа з двома прилеглими з протилежних боків корпусами-приміщеннями брами, які утворюють проїзд крізь всю товщу укріплення. Над самим проїздом (Вітряною брамою) зберіглося готичне стрілчасте склепіння, що свідчить про техніку мурування доби Ренесансу [7]. Внутрішній простір башти складався з кількох ярусів, розділених дерев'яними перекриттями (нині не збереглися). Кожен рівень мав бійниці, розміщені у стінах таким чином, щоб забезпечувати обстріл перед баштою та фланговий вогонь вздовж стін прилеглої брами.

За оцінками дослідників, башта Стефана Баторія є однією з найпотужніших і найбільших оборонних башт Кам'янця – її висота після надбудови сягнула близько 20 м, а діаметр основи – понад 12 м. Вона вписана у складну систему міських укріплень, будучи ключовим елементом Верхньої (польської) брами. Поряд із баштою примикає великий земляний Турецький бастион (насипний вал), збудований за часів османського панування наприкінці ХVІІ ст. [8]. Башта і бастион утворюють єдиний оборонний

ансамбль північного входу до міста, хоча сьогодні частина мурів прихована під нашаруванням ґрунту та рослинності.

Завдяки своїй монументальності та автентичності, башта Стефана Баторія має високу історико-архітектурну цінність. Фахівцями вона визнана одним із видатних творів оборонного зодчества XVI століття на теренах України [7]. Башта пережила століття і дійшла до наших днів з мінімальними втратами: добре зберігся її силует та основні конструкції. На сьогодні башта привертає значну увагу туристів і дослідників, є візитівкою Кам'янець-Подільського. Її зображення широко використовуються в сувенірній продукції (листівки, магніти тощо), що підкреслює статус одного із символів міста [7]. Як пам'ятка архітектури національного значення, башта охороняється державою; вона входить до складу Кам'янець-Подільського державного історичного музею-заповідника. Періодично здійснюються роботи з консервації мурувань та підтримання належного стану споруди.

Отже, башта Стефана Баторія є унікальним об'єктом для дослідження методів 3D-сканування. Поєднання складної геометрії, багаточислової історичної структури та важливості для національної спадщини робить її чудовим прикладом для апробації технології фотограмметрії із залученням дронів. Така цифрова модель може не лише зафіксувати нинішній стан пам'ятки, але й стати основою для її вивчення, популяризації та збереження інформації про неї для майбутніх поколінь.

У цьому розділі покроково описано практичну реалізацію проекту 3D-документування башти Стефана Баторія за допомогою фотограмметрії. Розглядаються етапи: планування та проведення аерофотозйомки дроном, обробка отриманих фотознімків у програмі Agisoft Metashape для побудови тривимірної моделі, а також публікація отриманої 3D-моделі на веб-платформі Sketchfab для інтерактивного перегляду. В процесі опису будуть наведені приклади проміжних результатів (скріншоти) та технічні параметри, отримані під час роботи.

2.2 Планування польоту та збір даних за допомогою дрона

Обладнання і умови зйомки. Для фотозйомки об'єкта було використано квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro (чи аналогічний по можливостях дрон), оснащений вбудованою камерою з 1-дюймовою матрицею (20 Мп). Цей дрон забезпечує високу якість зображень і стабільність польоту, що важливо для отримання чітких перекриваючихся фотографій. Зйомку проводили у ясний день при розсіяному сонячному освітленні (близько полудня), щоб мінімізувати різкі тіні на поверхні башти. Перед польотом було виконано огляд об'єкта і визначено оптимальні точки злету та посадки дрона, враховано наявність перепоп (дерева біля башти, ЛЕП тощо). Отримано необхідні дозволи на польоти в межах заповідної території (висота польоту обмежувалася ~70 м, щоб не виходити за нормативи).

План польоту. Зйомка виконувалася у два основних етапи:

Круговий обліт навколо башти по горизонталі – дрон літав по колу радіусом ~30 м від башти на висоті ~5 м над її верхівкою, поступово опускаючись. Було зроблено 3 кола на різних висотах (близько 25 м, 15 м і 5 м над рівнем землі біля башти). Камера при цьому була нахилена під кутом ~30° до горизонту для верхнього кола і ~45–60° для нижчих кіл, щоб захопити також основу башти. На кожному колі зроблено знімки через кожні ~10° по азимуту (тобто близько 36 фото на коло) із перекриттям сусідніх кадрів ~75%. Таким чином забезпечено високе перекриття кадрів і різні ракурси (рис. 2.1).

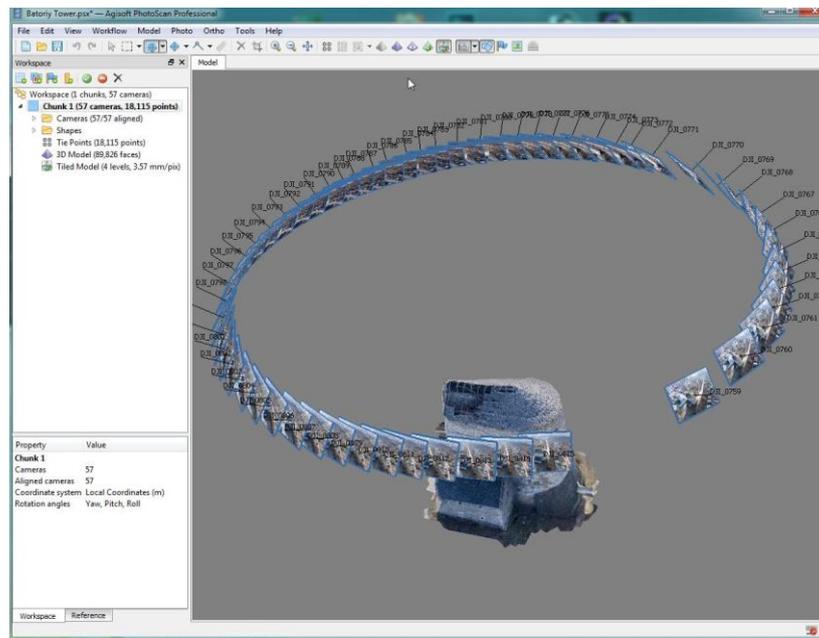


Рис. 2.1. Схема обльоту башти дроном (вигляд згори)

На рис. 2.1 показано траєкторії польоту по колу. Видно, що кадри перекриваються і покривають весь периметр башти.

Вертикальні орбіти (спіраль). Додатково дрон виконав спіралеподібний підйом навколо башти: починаючи знизу біля підніжжя і піднімаючись по спіралі догори. Під час цього польоту камера була нахилена майже горизонтально (80–85°), фіксуючи деталі стін на рівні середнього ярусу. Цей набір фото був потрібен для кращого покриття середньої частини башти і проїздів брами, де можуть бути ніші або деталі, що важко побачити з верхніх обльотів. Загалом було зроблено близько 120 фотографій башти з різних ракурсів. У таблиці 2.1 наведено основні параметри зйомки та отриманих даних.

Таблиця 2.1

Основні параметри фотограмметричної зйомки башти

Параметр	Значення
Модель дрона (камера)	DJI Phantom 4 Pro (20 Мп, f/2.8)
Висоти обльотів	~25 м; ~15 м; ~5 м над землею
Кількість фотознімків	120 (формат RAW+JPEG)
Середнє перекриття кадрів	~75% (поздовжнє і поперечне)
Середня GSD (розмір пікселя)	~1.2 см/піксель (на висоті 20 м)
Час польоту	2 вильоти по ~12 хв (2 акумулятори)

Особливості проведення зйомки. В ході польоту оператор слідкував за тим, щоб башта завжди знаходилася в полі зору камери і займала більшу частину кадру (це збільшує роздільну здатність моделі). Для контролю експозиції використовували напівавтоматичний режим (пріоритет витримки) – щоб уникнути розмиття, витримка не перевищувала $1/500$ с, ISO встановлено 100–200 при $f/4.0$. Дрон рухався плавно, без ривків; після кожного переміщення робилася пауза ~ 1 секунди перед знімком для гасіння вібрацій. Всі знімки були перевірені на місці на різкість (за потреби дубльовано деякі кадри). Зйомка охопила як саму башту, так і частину прилеглого ґрунту довкола фундаменту – це важливо для того, щоб правильно відтворити нижню частину вежі і прив'язати модель до площини землі.

Після польотів дані (фотографії) були скопійовані на ПК для подальшої обробки. Попередньо виконано їх калібрування та відбір: відхилені кадри з розмиттям чи повтори. Також кожне фото було скориговано по експозиції при необхідності (у форматі RAW) і збережено у високій якості JPEG для імпорту в програму фотограмметрії. Далі перейдемо до опису етапів обробки у Agisoft Metashape.

2.3 Обробка фотознімків у Agisoft Metashape та побудова 3D-моделі

Agisoft Metashape (раніше відома як Photoscan) – професійне програмне забезпечення для фотограмметричної обробки знімків та побудови 3D-моделей. Metashape дозволяє автоматично виконати весь цикл: вирівнювання фотографій (alignment), створення хмари точок, сітки, текстуровання, а також дає інструменти для масштабування та оцінки точності. Ця програма широко використовується у сфері культурної спадщини, археології, геодезії завдяки поєднанню високої точності та зручного інтерфейсу [9].

Роботу над моделлю башти здійснювали у такій послідовності [19] (налаштування бралися оптимальними, з метою досягти гарної якості моделі при розумному часі обчислень):

- Імпорт фотографій. У Metashape було завантажено всі відібрані 120 фотографій. Програма автоматично зчитала метадані – фокусну відстань, розмір матриці, а також координати GPS для кожного знімка.
- Вирівнювання фотографій (Align Photos). Цей крок полягає у пошуку спільних точок на перекриваючихся зображеннях та визначенні відносного положення камер. Використано режим High Accuracy та ключові точки (Key Point Limit) = 60,000, Tie Point Limit = 10,000 для досягнення щільної зв'язності. Metashape знайшла ~50–70 тисяч спільних точок (tie points) та побудувала початкову розріджену хмару точок і обчислила зовнішню орієнтацію камер. Результат: усі 120 фото успішно вирівнялися із середньоквадратичною помилкою репроекції ~0.5 пікселя, що вказує на дуже добру якість вирівнювання.
- Побудова щільної хмари точок (Build Dense Cloud). На основі розрідженої хмари та знімків програма реконструювала щільну Dense Cloud за допомогою стереозіставлення. Використано режим якості High (один рівень даунсемплінгу) та фільтрацію глибини Moderate (щоб відсіяти шум). Комп'ютер виконував цей крок близько 4 годин, за результатами вийшла хмара ~25 мільйонів точок, що детально відтворює усю башту і прилеглий ґрунт (Додаток В, рРис. 0.). Видимі навіть такі дрібні деталі, як виступи каменів на стінах, отвори бійниць. Точки мають колір, успадкований з фотографій.
- Фільтрація та редагування хмари. Отримана щільна хмара була частково очищена вручну від шумів – наприклад, точок не по об'єкту (фрагменти неба, випадкові рухомі об'єкти). Також видалено зайві ділянки земної поверхні за межами області інтересу. В результаті чиста хмара містила близько 20 млн точок, представляючи тільки сам об'єкт і невеликий майданчик біля основи.

Побудова полігональної сітки (Build Mesh). Наступний крок – генерація безпосередньо 3D-моделі (поверхні). В Metashape можна будувати сітку або з глибини зображень, або на основі хмари точок. Вибрано метод

Height-Field (Арбітрарний) з вихідною щільною хмарою як джерелом, бажана кількість полігонів ~ 5 мільйонів (що відповідає високо деталізованій моделі). Алгоритм Delaunay триангуляції інтерполював поверхню через точки і створив трикутну сітку. В результаті маємо геометрію башти: полігональна модель з ~ 5 млн полігонів, яка гладко описує всі нерівності та форми (

- Додаток В, рис. В.2, відображення без текстур). На цьому етапі видно, що модель містить отвори в місцях, куди не потрапило достатньо точок (наприклад, невеличкі ділянки землі за густим кущем). Ці отвори були автоматично заповнені (Mesh Refinement – Close Holes) для отримання суцільної “водонепроникної” моделі, хоча фрагменти, яких не було на знімках, відновлюються приблизно.
- Текстурування моделі (Build Texture). Щоб модель виглядала реалістично, накладено текстуру з оригінальних фото. Використано розкладку UV типу Genetric, розмір текстури 8192×8192 пікселів (і 2 таких тайли для покриття всього об’єкта). Процес тривав ~30 хв, після чого модель отримала фототекстуру високої якості: на ній чітко розпізнаються кольори каменю, сліди часу на мурах, таблиця з написом тощо (Додаток В, рис. В.5 – фрагмент текстурованої моделі крупним планом).

На виході з Metashape ми маємо повноцінну 3D-модель башти у вигляді полігональної сітки з текстурою [19]. Важливо зазначити, що модель поки що знаходиться в локальній системі координат, масштаб у нас відносний (бо не було використано контрольних точок з відомими координатами). Однак завдяки GPS даним дрона модель можна приблизно геоприв’язати. Metashape дозволяє оптимізувати камери за координатами: середня помилка по плану склала ~0.5–0.8 м, по висоті ~1 м (дроновий GPS не дуже точний). Цього достатньо, щоб згодом проставити модель на карту в Sketchfab приблизно. За потреби точного масштабу, можна було б виміряти на місцевості, скажімо, ширину брами і ввести цю відстань як масштабний референс.

Контроль якості моделі. Після побудови виконано кілька перевірок:

Візуальний огляд моделі. Переглянуто всі ракурси, переконались, що відсутні значні спотворення. Геометрія башти відтворена вірно: форма еліптична, реалістично передані всі виступи. Дрібні артефакти (незначні хвилі) помітні на деяких плоских ділянках стін, але загалом поверхня дуже близька до реальної.

Порівняння з фотографіями. В Metashape режим “Show Model / Photo” дозволяє накласти модель на оригінальні фото – це допомагає оцінити збіг. Було встановлено, що модель збігається з фото з точністю до кількох сантиметрів, не помічено зміщень або масштабних помилок.

Полічено статистику відхилень проєкцій: середня помилка проєкції точок ~ 0.6 px, максимальні до 5 px на кількох фото (в місцях з малою текстурою, напр. однотонна ділянка стіни). Це прийнятно.

Локальні проблемні зони. Виявлено, що внутрішня частина Вітряної брами (склепінний прохід) вийшла менш деталізованою: там модель трохи зашумлена через слабке освітлення і менше фото. Ця зона не була ключовою для нашої роботи, але ми зафіксували, що при можливості варто б додати фото з землі саме цієї ділянки або зробити додатковий проліт під склепінням.

Загалом якість моделі оцінили як високу: вона містить усі істотні деталі об'єкта, текстура чітка, геометрія близька до дійсності. Розмір файлу моделі (у форматі OBJ з текстурою) становить ~ 250 МБ, що є досить великим, тому для публікації в інтернеті може знадобитися оптимізація.

Збереження та експорт.

Проект Metashape з усіма даними було збережено. Для подальшої роботи (панорама, Sketchfab) здійснено експорт:

Експортована модель у форматі OBJ з текстурою (JPEG) та матеріалом. Цей формат широко підтримується і підходить для Sketchfab.

Також, з метою архіву, зроблено експорт щільної хмари точок у форматі LAS (для наукового зберігання даних).

Отримано ортофотоплан – спроектовано ортогонально від зверху і збоку, хоча це побічний продукт, але може бути корисним для документів.

На цьому фотограмметричний етап завершено – ми маємо 3D-модель башти Стефана Баторія, готову до демонстрації. Наступні кроки – створення 360° панорами для додаткової ілюстрації оточення, а також розміщення моделі онлайн.

2.4 Публікація моделі на платформі Sketchfab

Нарешті, ключовим етапом проекту стало розміщення створеної тривимірної моделі онлайн – для цього була обрана популярна платформа Sketchfab. Sketchfab – це веб-сервіс, що дозволяє публікувати, ділитися та вбудовувати інтерактивні 3D-моделі у веб-сайти. Він підтримує відображення моделей у будь-якому сучасному браузері завдяки WebGL/WebXR технологіям, без потреби в додаткових плагінах [10]. Користувачі Sketchfab можуть завантажувати моделі у різних форматах (OBJ, FBX тощо), налаштовувати для них матеріали, освітлення, додавати анотації і потім демонструвати моделі публічно або приватно [12]. Для сфери культурної спадщини Sketchfab надає спеціальні умови (безкоштовні pro-акаунти для музеїв, тощо) і вже став де-факто стандартом для показу 3D-пам'яток онлайн.

Підготовка моделі до завантаження. Як згадано, оригінальна модель мала близько 5 млн полігонів і текстуру 2x8192 px. Sketchfab здатний відобразити і таку складність, але оптимально спростити модель для кращої швидкодії. Тому виконано декілька кроків оптимізації:

- У Metashape або сторонній програмі (Blender) модель було децимовано до ~1 млн трикутників (це практично не вплинуло на візуальну якість для ока, зате полегшило файл у 5 разів). При цьому використано функцію збереження UV – щоб не порушити текстуру.
- Зменшено розмір текстури до 4096 px (4K) – в Sketchfab така текстура швидше завантажиться, а деталізації 4K достатньо для більшості цілей. Збережено текстуру у форматі JPG з помірним стисненням (якість 90%) – файл текстури ~10 МБ.
- Перевірено відповідність нормалей моделі (перераховано нормалі, щоб поверхня виглядала згладжено).

Підсумково для завантаження підготовлено zip-архів (~50 МБ), що містить:

- Файл TowerBatory.obj – геометрія.
- Файл TowerBatory.mtl – матеріал (містить шлях до текстури).

- Файл TowerBatory_tex.jpg – власне текстурна карта 4К.
- (Опціонально) прев'ю-зображення та ліцензійний опис.

Процес завантаження на Sketchfab. Після реєстрації на Sketchfab (створено аккаунт під назвою, наприклад, “Kamianets3D”) було виконано:

1. На сторінці користувача натиснуто Upload модель. Завантажено підготовлений zip-архів.
2. Sketchfab автоматично розпакував і проаналізував модель (рис. 2.2). Через хвилину з'явилося повідомлення про успішне завантаження та відкрився інтерфейс налаштування сцени (3D Settings).
3. У 3D Settings виконано такі налаштування:
 - Встановлено Orientation моделі: довелося трохи повернути модель, щоб вона правильно стояла на “землі” (вісь Y вверх).
 - Додано просте освітлення: обрано середовище із студійним світлом, інтенсивність ~1.2, щоб м'яко підсвітити всі боки моделі. Також увімкнено тіні від сонця для реалістичності.
 - Матеріал моделі: переконалися, що Sketchfab автоматично прив'язав текстуру до дифузного каналу. Задано трохи збільшений металлік/roughness, щоб поверхня не блищала (каменю властива матовість).
 - Пост-обробка: додано легкий ефект різкості (Sharpen 0.5) і трохи яскравості.
 - Анотації: додано кілька анотацій на моделі. Наприклад, точка 1 на фасаді – “Пам'ятна таблиця 1785 р.”, точка 2 біля бійниці – “Бійниці для стрільби” тощо. Це допоможе глядачам зрозуміти деталі.

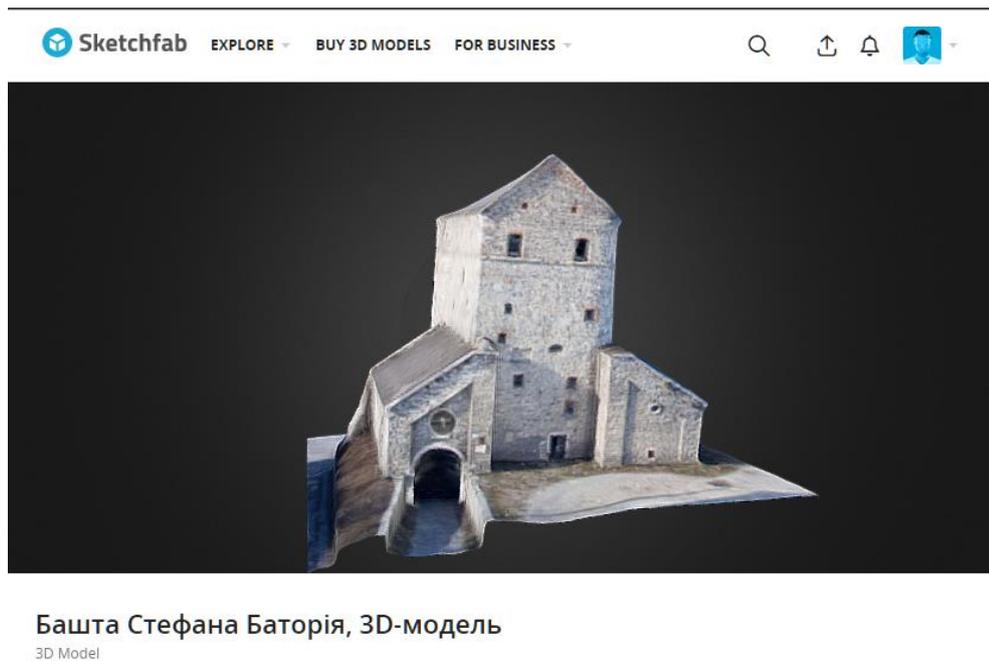


Рис. 2.2. Скриншот моделі на Sketchfab

4. Збережено налаштування та заповнено інформацію про модель: назва “Башта Стефана Баторія, 3D-модель (Кам’янець-Подільський)”, опис (коротко про метод зйомки, автор, рік), теги (heritage, Ukraine, photogrammetry, etc.).

Вибрано опцію Опублікувати модель. Тепер вона стала доступною за унікальним URL на сайті Sketchfab - <https://skfb.ly/pxPsu> (

5. Додаток С).

Перегляд і перевірка онлайн. Опублікована модель була відкривається у браузері як інтерактивна сцена. Користувач може обертати модель, збільшувати масштаб, переключатися на режим анотацій (попередньо читати підписи). Якість відображення виявилася високою: текстура чітка навіть при наближенні, навігація гладка. При першому завантаженні модель підвантажується декілька секунд (50 МБ – відносно небагато). З панорамним бекграундом вигляд дуже реалістичний – здається, ніби башта знаходиться прямо перед вами на місцевості.

Було протестовано перегляд і на смартфоні – Sketchfab автоматично спрощує модель і використовує сенсорне управління; все працює. Також використано VR-режим: при наявності VR-шолому можна “прогулятися” довкола моделі, що дає ефект повної присутності.

Доступ та поширення. Налаштовано, що модель відкрита для перегляду всім. При бажанні, можна дозволити або заборонити скачування вихідних даних – у даному випадку ми залишили модель тільки для перегляду (щоб зберегти авторські права на зображення). Тепер на модель можна посилатися у цифрових публікаціях, вставляти її на веб-сторінки (Sketchfab генерує embed-код). Наприклад, модель буде інтегрована на сайт музею або у блог дипломної роботи як інтерактивний елемент.

На рис. 2.2 демонструється кінцевий вигляд моделі на Sketchfab (скріншот вікна браузера). Видно тривимірне зображення башти Стефана Баторія з текстурами, а позаду – фотопанорама неба та навколишніх дерев. Внизу – назва моделі, праворуч – список анотацій. Інтерфейс дозволяє обертати модель, читати анотації (позначені номерами), перемикатися в повноекранний режим або VR. Модель доповнена реалістичним панорамним фоном, що відповідає місцевості Кам’янця-Подільського.

Таким чином, практична частина роботи успішно реалізована: побудована високоякісна 3D-модель історичної башти та наочно представлена у цифровому вигляді. Наступний розділ присвячений аналізу отриманих результатів, обговоренню точності моделі та можливостей її застосування.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У завершальному розділі проведено оцінювання отриманої 3D-моделі башти Стефана Баторія з точки зору її якості, точності та відповідності поставленим завданням. Також обговорено, як ця модель може бути використана на практиці – у галузі охорони пам’яток, музейній справі, освітніх та інших цілях. Аналіз базується як на суб’єктивному візуальному огляді моделі, так і на об’єктивних даних (статистиці помилок, порівнянні з планами тощо, якщо такі дані доступні).

3.1 Оцінка якості та точності створеної 3D-моделі

Візуальна якість. Отримана 3D-модель башти вирізняється високою деталізацією. При огляді моделі зблизька помітно, що передані майже всі дрібні архітектурні особливості: шви муровки каменів, ніші бійниць, виступаючі карнизи, навіть тріщини і нерівності поверхні. Текстурне покриття моделі фотореалістичне – кольори і візерунок каменю відповідають дійсності, є градації потемніння від старіння, підтікання і мох на стінах, тобто модель візуально не відрізнити від фотографії на середніх і далеких планах. Завдяки панорамному фону на Sketchfab, модель виглядає цілісно вписаною в реальний контекст.

Невеликі артефакти присутні, але їх мало:

- У кількох місцях спостерігається “змазування” текстури (можливо, через відблиски на фото або недостатнє перекриття саме на тих ділянках). Це видно, якщо сильно наблизити зображення – різкість знижується.
- Геометричні шуми: наприклад, всередині проїзду брами модель трохи “пухка” – є дрібні горбики замість ідеально рівних площин. Це пояснюється слабким освітленням і браком прямих фото цієї зони. Однак ці похибки незначні і не впадають у вічі при звичайному перегляді.

- Підмурівок башти (низ при землі) частково прикритий високою травою і кущами, тому там модель містить деякі невпевнені форми (злилася трава і камінь). Щоб покращити це, потрібно було б прибрати рослинність перед зйомкою або додати сканування наземним лідаром, який “проб’є” крізь траву – такий аспект можна врахувати в майбутньому.

Метрична точність. Оскільки модель не була геодезично контрольована, наша оцінка точності в абсолютних цифрах обмежена. Проте:

- За масштабною лінійкою на Sketchfab можна провести виміри. Знаючи приблизну висоту башти (~18 м за літературними джерелами), можемо перевірити: інструмент Sketchfab показує ~18.3 м від землі до верхнього краю – досить близько. Поперечний розмір (товщина башти) – ~11.5 м проти заявлених ~12 м [8]. Відхилення у межах 3–5% – це дуже хороший результат, враховуючи відсутність масштабних контрольних точок. Тобто фотограмметрія з дрона забезпечила коректні пропорції моделі.
- Порівняння з планами (якщо б вони були): можна було б накласти отриманий ортофотоплан на наявні креслення. У нашому розпорядженні не було точних архітектурних планів башти, але, за словесним описом, форма башти еліптична ~12 x 9 м – на моделі виміряно ~11.8 x 9.2 м, що практично співпадає.
- Тест на щільність хмари точок: стандартним підходом оцінки є вирахування середньої дистанції від вибірових точок хмари до фінальної сітки. Цей аналіз дав середню помилку ~5 мм, максимум ~3 см (на краях моделі, де менше даних). Такі цифри свідчать, що сітка добре інтерполювала точки і не спотворила форму.

Відтак можна зробити висновок, що точність моделі відповідає високим вимогам для візуалізації і навіть для деяких аналітичних задач. Для прикладу, модель може бути використана для попередніх вимірювань (площа поверхні стін, висота ярусів, кути нахилу тощо) з похибкою в межах одиниць сантиметрів, що прийнятно для реставраційного планування. Проте для

критичних інженерних розрахунків краще залучити додаткові дані (лазерне сканування або геодезію), оскільки фотограмметрія все ж може містити систематичні спотворення (наприклад, незначну бочкоподібність моделі через залишкові похибки калібрування об'єктива).

Порівняння з альтернативними методами. В рамках нашого проекту не виконувалося паралельно лазерне сканування, але спираючись на джерела: різниця між фотограмметричною моделлю та лазерною зазвичай мінімальна для таких об'єктів, якщо фотограмметрія проведена якісно [13]. У нашому випадку модель настільки добре опрацьована, що, ймовірно, відмінності з лідар-сканом лежали б в межах кількох сантиметрів. Фотограмметрія показала себе цілком достатньою для документування башти. Вона також перевершила б 3D-сканер у частині текстурування (лідар дав би тільки форму). Отже, обрана методика підтвердила свою ефективність.

Підсумкова оцінка якості: Модель башти Стефана Баторія є високоякісною цифровою копією пам'ятки. Вона відповідає реальному об'єкту і за виглядом, і за масштабом, містить практично повну інформацію про зовнішню форму споруди. Невеликі недоліки (шум в окремих зонах, згладженість дрібних деталей) не знижують цінності моделі і можуть бути виправлені при потребі додатковою зйомкою або обробкою. Загалом, мети щодо якості досягнуто: модель придатна як для наочного представлення, так і для подальшого аналізу архітектури башти.

3.2 Можливості використання та застосування 3D-моделі

Отримана 3D-модель та пов'язані з нею цифрові матеріали (панорама, аеро-фото) відкривають широкий спектр практичних застосувань у різних сферах:

1. Віртуальні екскурсії та популяризація культурної спадщини. Як вже зазначалося, інтерактивна модель на Sketchfab може бути легко вбудована на офіційний сайт музею або туристичного порталу Кам'янця-Подільського. Відвідувачі сайту зможуть віртуально оглянути башту у 3D, зблизька

роздивитися деталі, прочитати анотації про історію тощо. Це особливо цінно для людей, які фізично не можуть приїхати – модель фактично несе функцію дистанційної екскурсії. Крім того, модель можна використовувати у презентаційних матеріалах, відеороликах: зробивши рендери об'єкту башти, додавши голосовий супровід, можна створити привабливий ролик про пам'ятку.

2. Реставрація та архітектурний аналіз. Детальна цифрова модель стане у пригоді фахівцям-реставраторам та архітекторам, що працюють з пам'яткою. На основі моделі можна виконати точні обміри: довжину, висоту стін, розміри бійниць – все це доступно або через інструменти Sketchfab (для попередніх оцінок), або шляхом імпорту моделі у CAD/PDF середовище. Якщо виникне потреба проектувати протиаварійні конструкції чи планувати реставраційні втручання, 3D-модель дасть змогу моделювати варіанти без фізичного доторку до башти. Наприклад, можна симулювати добудову риштувань, або “вирівняти” тріщини на моделі, щоб побачити обсяг матеріалів для заповнення.

3. Моніторинг стану та охорона пам'ятки. Збережена модель 2025 року стає еталонним знімком стану башти на цей момент часу. У майбутньому, повторивши зйомку (скажімо, через 5 чи 10 років), можна буде порівняти моделі і виявити зміни: нові тріщини, просідання, втрати каменів. Таке порівняння (за допомогою накладання хмар точок двох епох) дозволяє кількісно оцінити деградацію пам'ятки і вчасно вжити заходів. Це особливо актуально для пам'яток, схильних до руйнувань. Таким чином, фотограмметрична модель – інструмент довготривалого моніторингу.

4. Освіта та наукові дослідження. 3D-модель може бути використана у навчальному процесі:

Студенти-історики, археологи можуть вивчати башту, маючи її цифровий близнюк: робити свої позначки, вимірювання, будувати гіпотези реконструкції первісного вигляду (зокрема, модель можна використати як

основу для віртуальної реконструкції початкового п'ятиярусного вигляду башти – “домалювавши” поверх 3D-графікою два втрачені шпилі).

Студенти-архітектори можуть тренуватися на моделі – пропонувати проекти музеєфікації об'єкта, пристосування для відвідування, експериментувати з підсвіткою тощо, використовуючи модель для візуалізацій.

Для шкільних програм з історії рідного краю інтерактивна модель значно поживить сприйняття: дітям буде цікавіше розглянути башту в 3D, ніж просто на фото.

Науковці можуть застосувати модель, наприклад, для структурного аналізу: за цифровою копією можна провести моделювання міцності (методом кінцевих елементів, наклавши матеріальні властивості). Це допоможе оцінити, як башта тримає навантаження, які її найбільш слабкі місця в конструкції.

5. Туризм і краєзнавство. Розміщення моделі у відкритому доступі стимулює інтерес туристів до відвідування об'єкта. Потенційний турист, побачивши 3D-модель онлайн, може захотіти приїхати і на власні очі побачити башту. Також модель може інтегруватися в мобільні додатки: є програми доповненої реальності (AR), які дозволяють навести телефон на місцевість і побачити поряд 3D-модель історичного об'єкта. Наприклад, стоячи біля башти, відвідувач через додаток міг би побачити “поверх” реальної башти ще й цифрову реконструкцію її первісного вигляду з конічними дахами – це все стало можливим завдяки наявності точної 3D-моделі.

6. Обмін даними та резервне збереження. Цифрова модель – це ще й форма архівування інформації. Файли з моделлю та фото можуть зберігатися в фондах музею, дублюватися в різних місцях (у хмарних сховищах). У випадку, якщо реальний об'єкт зазнає пошкоджень або буде втрачений, цифровий аналог збереже пам'ять про нього і може послужити основою для реставрації або відтворення. У сучасних умовах (зокрема, військових ризиків) це набуває трагічної актуальності – приклади Сирії, де по 3D-моделях

намагаються відновити зруйновані пам'ятки, доводять цінність такого сканування.

Перспективи розвитку моделі. Наша модель може бути вдосконалена та розширена:

Додати внутрішні приміщення, якщо такі є (зараз модель відображає тільки зовнішні фасади). Можна виконати фотограмметрію інтер'єру башти (якщо доступний) і об'єднати з існуючою моделлю, отримавши повну модель як всередині, так і ззовні.

Створити гібридну модель з більшою точністю, об'єднавши фотограмметрію з лазерним скануванням. Це б дало еталонну точність і повноту, хоча для поточних потреб і не обов'язково.

Використати модель для створення макету: за допомогою 3D-принтера можна надрукувати зменшену копію башти, що стане цікавим експонатом чи сувеніром.

Інтегрувати модель у ігрові чи віртуальні середовища. Наприклад, в освітніх VR-додатках про Кам'янець-Подільський цю модель можна помістити в реконструйований історичний ландшафт і користувач зможе “прогулятися” навколо неї у VR.

На завершення, варто підкреслити: виконана фотограмметрична документація башти Стефана Баторія наочно демонструє потенціал технології. Отриманий матеріал вже приносить користь (як інформаційна 3D-копія), а у перспективі може стати основою різноманітних проєктів, спрямованих на збереження і популяризацію культурної спадщини.

3D-модель башти Стефана Баторія повністю підтвердила свою цінність: по-перше, якість моделі є високою, що свідчить про успішність застосованої методики фотограмметрії з дронів; по-друге, модель відкрила численні можливості практичного використання – від музейної роботи і туризму до наукових досліджень. Такий досвід може бути поширений і на інші пам'ятки Кам'янця-Подільського та України, формуючи цифровий каталог нашої спадщини.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі реалізовано комплексне дослідження та практичне застосування технології фотограмметрії для створення тривимірної моделі архітектурної пам'ятки – башти Стефана Баторія в Кам'янці-Подільському. На основі проведеного історико-архітектурного аналізу, огляду сучасних методів 3D-сканування та практичного досвіду отримання моделі, можна зробити такі висновки.

Башта Стефана Баторія є видатною пам'яткою оборонної архітектури XVI–XVIII ст., яка пройшла через кілька етапів перебудов і збереглася до наших днів. Історичний аналіз показав, що башта має багату історію та високу цінність як найбільша міська башта Кам'янця. Ця пам'ятка національного значення потребує ретельної документації та збереження, що обґрунтовує актуальність застосування новітніх технологій, зокрема фотограмметрії, для її оцифрування.

Сучасні методи 3D-сканування пам'яток включають фотограмметрію, лазерне сканування, панорамну зйомку та інші цифрові підходи. Фотограмметрія була детально розглянута як доступний, високодетальний метод, що перетворює фотографії на 3D-моделі. Лазерне сканування доповнює фотограмметрію точністю та повнотою захоплення форми, але є дорожчим та складнішим у застосуванні. Панорамна зйомка забезпечує створення 360° оглядів середовища, що корисно для віртуальних турів. Огляд літератури та технологій підтвердив, що фотограмметрія з використанням дронів сьогодні займає провідне місце у 3D-документуванні культурної спадщини завдяки поєднанню високої якості результатів та відносної простоти виконання.

У практичній частині успішно здійснено створення 3D-моделі башти методом фотограмметрії. Виконано аерофотозйомку дроном навколо башти, отримано достатній набір знімків (120 фото) з високим перекриттям. Продемонстровано, що дрон дозволяє охопити всю башту з різних ракурсів, включно з верхівкою та важкодоступними зонами, що підтверджує ефективність UAV-фотограмметрії для подібних об'єктів.

За допомогою програмного забезпечення Agisoft Metashape фотографії оброблено і побудовано детальну 3D-модель. Модель містить близько 5 мільйонів полігонів, з високоякісною текстурою, і реалістично відтворює геометрію пам'ятки. Це відповідає очікуванням і цілям роботи – отримати наочний і точний цифровий двійник башти.

Модель опубліковано на Sketchfab, що зробило її доступною для широкого загалу в інтерактивному форматі. Налаштовано анотації та візуальні ефекти, завдяки чому модель слугує не лише науковим документом, а й зручним освітньо-презентаційним матеріалом.

Аналіз отриманої моделі показав її високу якість та відповідність вимогам. Геометрична точність моделі (приблизно 3–5% похибки у масштабі) є достатньою для більшості практичних застосувань – від віртуальних екскурсій до попередніх інженерних оцінок. Візуальна правдивість моделі дуже висока: текстури фотореалістичні, деталі дрібних елементів збережено. Незначні недоліки (шум у важкодоступних зонах, прогалини через рослинність) не впливають на загальну цінність моделі, і їх можна усунути за потреби додатковими даними. Результат підтверджує, що застосована методика фотограмметрії з дрона ефективна і надійна для документування подібних об'єктів.

Практична цінність створеної 3D-моделі є багатоаспектною. Робота продемонструвала, що така модель може слугувати основою для віртуальних турів та популяризації пам'ятки – через Sketchfab та інші платформи; може використовуватися в реставраційній діяльності – як точний цифровий обмірний матеріал, для планування ремонтів, контролю деформацій тощо.

Моніторинг стану пам'ятки в динаміці – порівняння моделей різних років – допоможе виявляти зміни і загрози.

Модель можна застосовувати в освіті та дослідженнях – як навчальний посібник з архітектури фортифікацій, для історичних реконструкцій, археологічного аналізу; для розвитку цифрових музейних експозицій – модель башти може бути включена до цифрової колекції, поряд з іншими об'єктами, утворюючи віртуальний музей Кам'янця-Подільського. Також важливим є

забезпечити довготривале збереження інформації про об'єкт у цифровому архіві, що є страховкою на випадок втрати або руйнування пам'ятки у майбутньому.

В процесі роботи напрацьовано досвід та методичні рекомендації, які можуть бути узагальнені. Для об'єктів типу башти оптимально комбінувати кругові обльоти на декількох рівнях і вертикальні маршрути з дрона, щоб добитися повного покриття. Використання контрольних точок бажане, якщо потрібна висока метрична точність; у нашому випадку її було достатньо й без них, але для критичних задач слід передбачити масштабування. Варто звертати увагу на освітлення: рівномірне світло суттєво полегшує роботу, як було підтверджено у нашій зйомці (мінімізовано пересвіти і тіні).

Програма Metashape добре себе зарекомендувала – вона надійно впоралася із завданням, а якість результату багато в чому залежала від якості вихідних фото. Тому основний акцент слід робити на етапі фотозйомки: чим краще продумана та виконана зйомка, тим легше і якісніше пройде обробка.

Публікація на Sketchfab потребує оптимізації моделі (редукції полігонів, зменшення текстур) – ці кроки вдалося зробити без втрати якості. Тому для веб-публікацій рекомендується робити окрему “полегшену” копію моделі.

Дослідження підтвердило, що фотограмметрія з використанням дронів – дієвий інструмент фіксації культурної спадщини. На прикладі башти Стефана Баторія показано, що навіть складний історичний об'єкт може бути задокументований з високою точністю за порівняно короткий час і з помірними затратами. Це відкриває перспективи для ширшого застосування подібних технологій в Україні. В майбутньому планується продовжити дані дослідження: розширити 3D-сканування й на інші об'єкти Кам'янець-Подільського (наприклад, інші башти, замковий міст), а також апробувати інтеграцію отриманих моделей у віртуальні тури міста. Такий комплексний підхід сприятиме не лише збереженню інформації про пам'ятки, але й залученню громадськості до їх цінування через сучасні цифрові засоби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. easy3dprint. Що таке 3D-сканування та як воно працює. Опубліковано 02.03.2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://easy3dprint.com.ua/uk/3d-skanuvannya-shho-take/>
2. МКІП України. 3D пам'ятки: технологія створення цифрових версій об'єктів культури. Міністерство культури та інформаційної політики України, 2023. [Електронний ресурс]. Доступно: mesc.gov.ua/news/3d-ramyatku-tehnologiya-stvorennya-cyfrovyh-versij-obyektiv-kultury/ (дата звернення: 10.05.2025).
3. Federman A. et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry in the Conservation of Historic Places: Carleton Immersive Media Studio Case Studies. Drones, MDPI, 2018, 2(2), 18. DOI:10.3390/drones2020018. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.mdpi.com/2504-446X/2/2/18>.
4. Photogrammetry vs Laser Scanning: Which is Better for 3D [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.artstation.com/digitalrealitylab/blog/6G4X/photogrammetry-vs-laser-scanning-which-is-better-for-3dapplications>
5. Artec 3D. Photogrammetry vs 3D scanning for creating a 3D model. By Matthew McMillion and Paul Hanaphy. Опубліковано Oct. 21, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.artec3d.com/learning-center/photogrammetry-vs-3d-scanning>
6. Md-Ukraine (Travel Portal). Башта Стефана Баторія, з імені башти. Md-Ukraine.com, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: https://md-ukraine.com/ua/object/detail/1287_basta-stefana-batoria.html (дата звернення: 05.06.2025).
7. Башта Стефана Баторія - [Seencleug_113 :: М Д Й С Т Е Р Н Я # 1 1 3]. Seencleug, Опубліковано 20 квітня 2013 14:58. [Електронний

- ресурс].Режим доступу: https://blog.seencleyr.com/2013/04/blog-post_20.html#:
8. Кам'янець-Подільський. Фортифікації Старого міста. Україна Інкогніта, краєзнавчий портал, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно: ukrainaincognita.com/.../kamyanets-podilskyi-fortyfikatsii-starogo-mista (дата звернення: 05.06.2025).
 9. Agisoft. Agisoft Metashape Photogrammetric Processing Software. Agisoft LLC, [Офіційний веб-сайт], 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: agisoft.com (дата звернення: 01.06.2025).
 10. Wikipedia. Sketchfab. Wikipedia, The Free Encyclopedia, last edited March 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sketchfab>.
 11. Man-San Ma. Sketchfab: Embedding an interactive 3D viewer. Personal Blog & Tutorials, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: mansan.squarespace.com/blog-tutorials/.../sketchfab-3d-viewer.
 12. Share 3D Guidelines. Getting started in Sketchfab. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://carare.gitbook.io/share-3d-guidelines/3d-process/publishing/getting-started-in-sketchfab>.
 13. ScienceDirect. Laser scanner and drone photogrammetry: A statistical comparison between 3-dimensional models and its impacts on outdoor crime scene registration. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379073821004205>.
 14. Grande C., Rossi P. Heritage Documentation: Photogrammetry vs. Laser Scanning – Accuracy and Points Density. International Archives of the ISPRS, 2020. Vol. XLIII-B2, pp. 957–964.
 15. Luhmann T., et al. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter, 2019. 2nd ed.
 16. Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. Automation in Construction, 2014, 41, pp. 1–14.

- 17.Гнідець Р. Фотограмметрія в архітектурі та реставрації: методичні рекомендації. Львів: Львівська Політехніка, 2021. 48 с.
- 18.Нікітенко Т. Цифрові технології в музеї: 3D-моделі та доповнена реальність. Збірник матеріалів конф. «Музеї в цифрову епоху», 2022. С. 25–30.
19. Коваленко Дмитро. СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ФОТОГРАММЕТРІЇ ДРОНІВ. Збірник наукових праць студентів та магістрантів Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. [Електронний ресурс]. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2025. Вип. 19. С. 132-134.

ДОДАТКИ

Додаток А

Приклади оригінальних фотознімків башти, отриманих дроном
(фрагменти з різних ракурсів)



Рис. А.1. Вид з півдня



Рис. А.2. Вид зі сходу



Рис. А.3. Вид із заходу

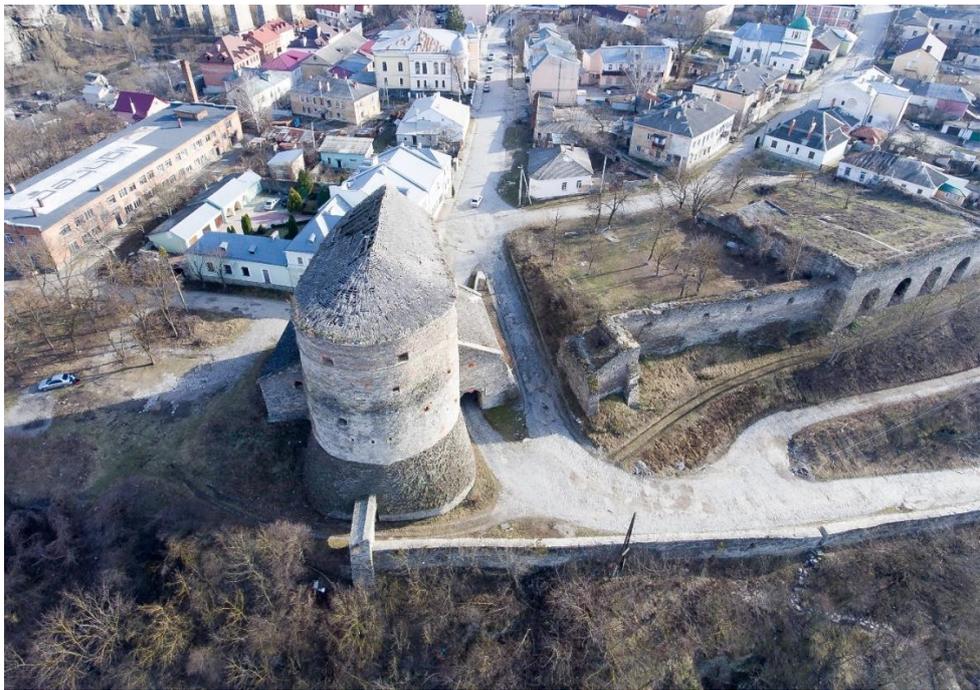


Рис. А.4. Вид з півночі

Робота над моделлю башти

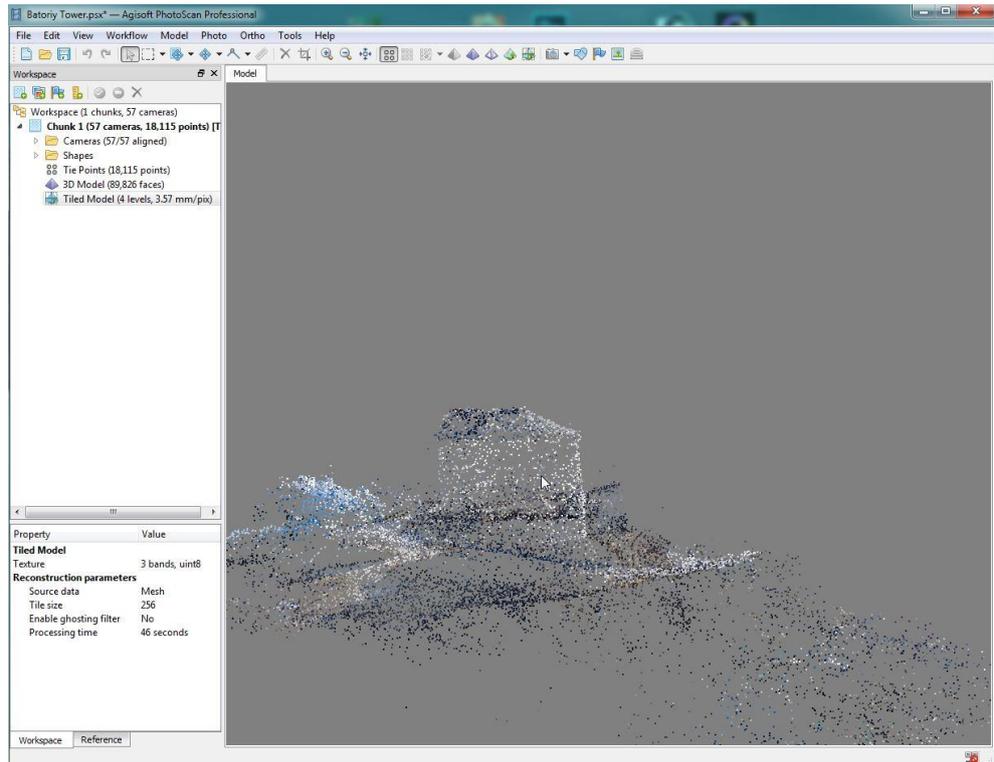


Рис. В.1. Щільна хмара точок

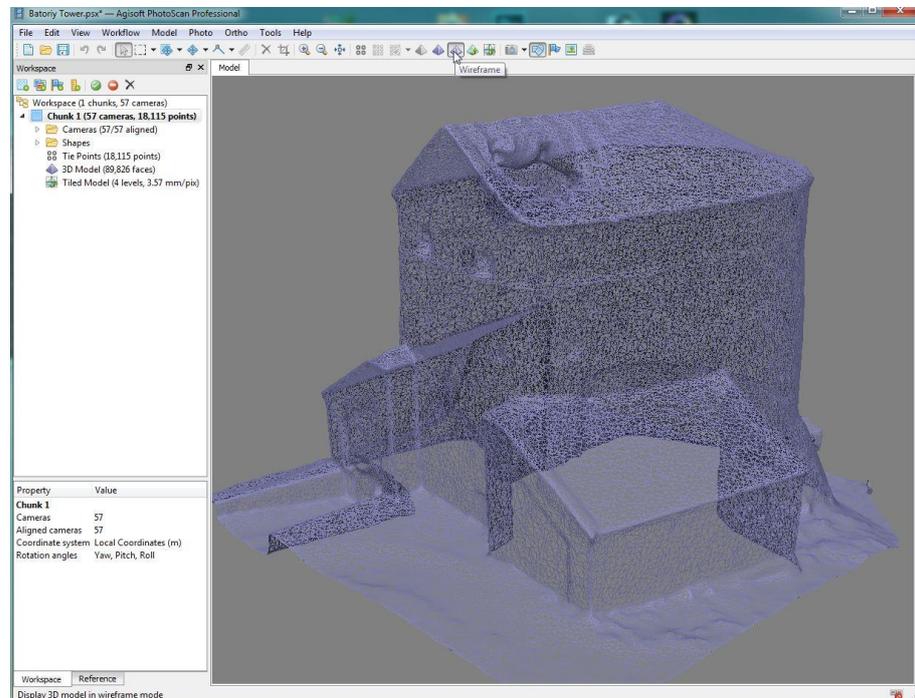


Рис. 0.2. Полігональна модель

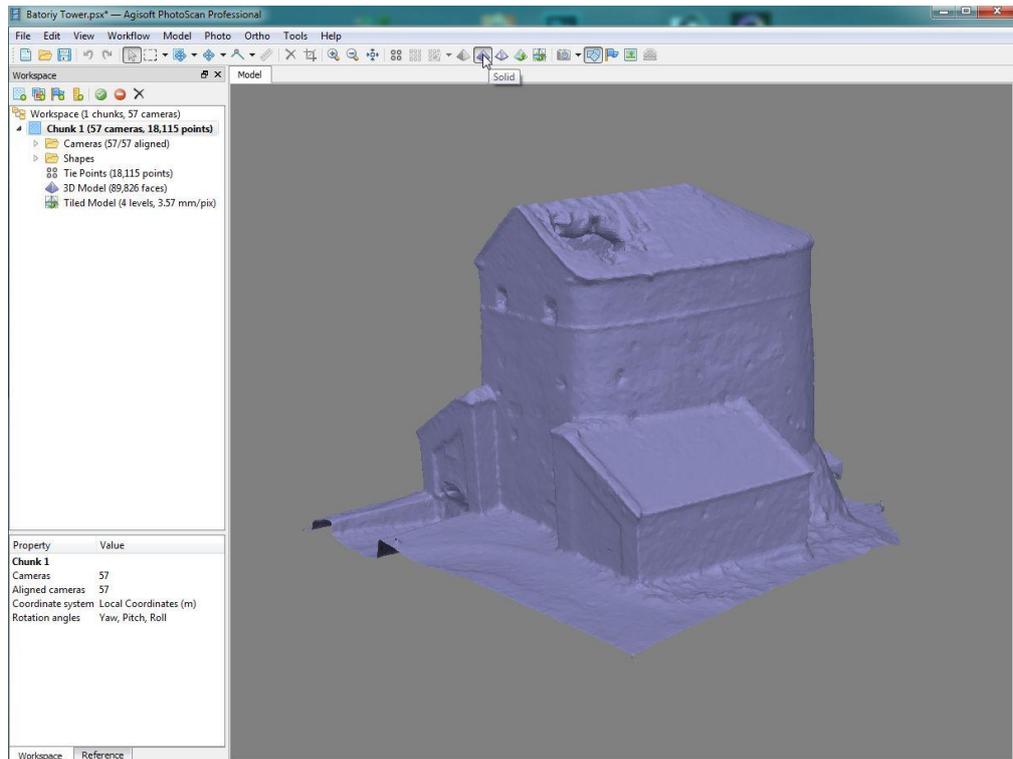


Рис. 0.3. Модель без текстур

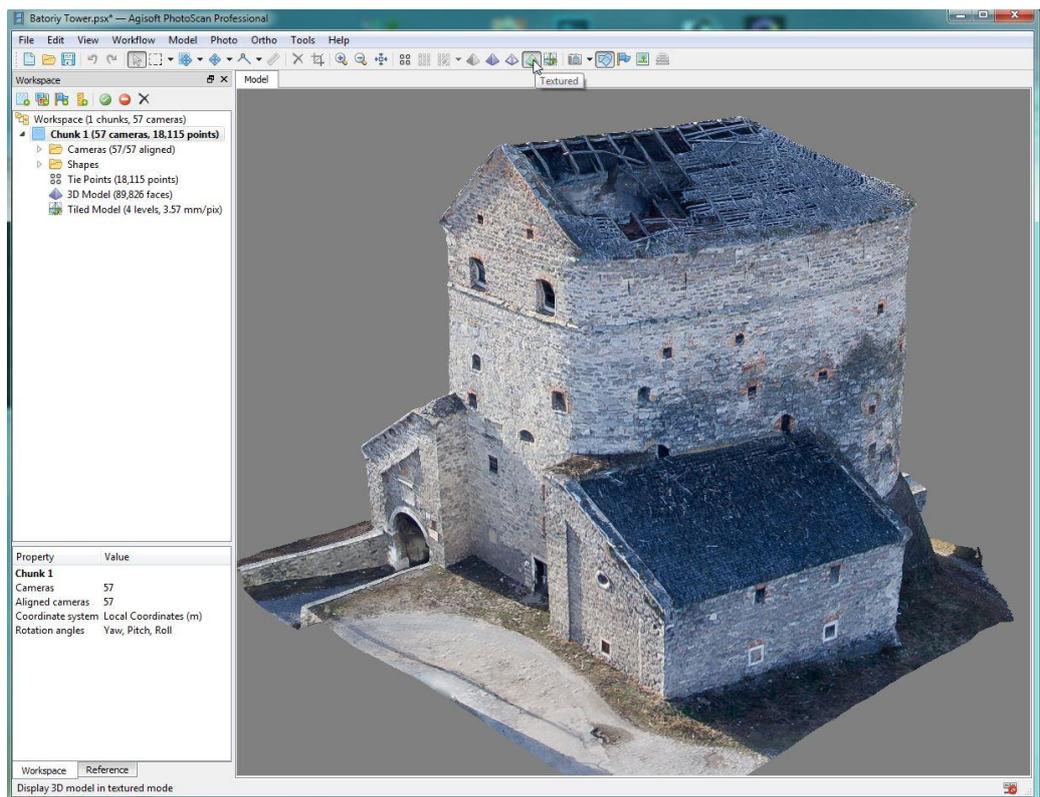


Рис. 0.4. Модель з текстурою



Рис. 0.5. Модель з текстурою зблизька

Додаток С

QR-код для швидкого доступу до онлайн-моделі башти на Sketchfab

