

О.В. Долгіх, к.т.н., доц.
Л.В. Долгіх, к.т.н., доц.
К.О. Долгіх, здобувач МАН України
Р.А. Назаров, аспірант
Криворізький національний університет

Знімання історичних пам'яток, що потрапили в зону впливу гірничих робіт

У Кривому Розі розміри територій, на яких зараз розташовані об'єкти гірничодобувних підприємств та раніше порушені гірничими роботами, збільшуються, руйнуючи цінні родючі ґрунти та поглинаючи будівлі і споруди, розташовані на них. Певна кількість будівель та споруд має або історичну, або культурну цінність. Тому питання захисту та відновлення пам'яток історії та культури, розташованих у гірничих відводах гірничодобувних підприємств, безперечно є актуальним. Метою цього дослідження є аналіз та вибір ефективного методу знімання пам'яток історії та культури для отримання необхідної документації для їх збереження та відтворення. Методика робіт полягає у виконанні знімання об'єктів спадщини різними камерами, зокрема недорогими – професійною цифровою камерою та камерами мобільних телефонів. Подальше опрацювання матеріалів знімання здійснювалося у програмному засобі Agisoft та інших. Результатом дослідження є напрацьована методика створення цифрових моделей історичних пам'яток за результатами цифрового знімання різними камерами, що дозволяє з необхідною точністю визначати їх розміри та інші характеристики, необхідні для їх реконструкції або перенесення у інше місце. Наукова новизна досліджень полягає в отриманні ефективної методики виконання знімальних робіт за допомогою різних камер та отримання цифрової моделі історичної пам'ятки з необхідною точністю. Практична значущість отриманих результатів полягає у розробленні ефективної методики створення необхідної документації для збереження та відновлення пам'яток історії та культури, яким загрожує часткове або повне знищення, через потрапляння їх у зону впливу гірничих робіт. Отримана методика дозволить з необхідною точністю виконувати архівацію таких об'єктів та відтворювати їх у подальшому у безпечних чи доцільних для збереження місцях.

Ключові слова: цифрове знімання; історична споруда; комп'ютерна обробка; відео; знімок.

Вступ. Кривий Ріг, як місто і як промисловий регіон, зародився на території, де залягають багаті руди на невеликій глибині. Промисловий розквіт прийшовся на другу половину XIX та початок XX століть. Прикладом є успішна розробка родовищ залізної руди промисловцем Сергієм Колачевським. У цю історичну добу у місті побудовано багато чудових архітектурних споруд. Але наближеність до багатих руд, з одного боку, дала поштовх для розвитку територій, а з іншого – стала головною причиною втрати цінних родючих ґрунтів, забруднення навколишнього середовища, занепаду та втрати цікавих для історії міста споруд і будівель. Зараз велика кількість архітектурних споруд, що мають історичну цінність, або потрапила в зону провалів та повністю втрачена, або в кращому разі потрапила в гірничі відводи шахт і кар'єрів. Деякі історичні споруди знаходяться на територіях, які через певний час опиняться під відвалами або у провалах, утворених у результаті підземних гірничих робіт.

Важливим науковим завданням є збереження для нащадків зразків архітектури минулих часів, які мають історичне значення для Криворіжжя і України, але знаходяться в зонах гірничих відводів гірничодобувних підприємств. На сьогодні це завдання може вирішуватися за допомогою використання сучасних технологій, таких як лазерне сканування або цифрова фотограмметрія.

Якщо є можливість, можна цінну історичну споруду перенести в безпечне місце, а у разі, коли цього не можна зробити, є інший варіант – збудувати в будь-якому місці повнорозмірну або копію споруди у певному масштабі за результатами створеної точної цифрової моделі за аеро- або наземними знімками. Таким прикладом є відновлення Собору Паризької Богоматері, знімання якого перед пожежею було виконано за допомогою лазерного сканування. Після пожежі цифрова модель, створена за результатами цього знімання, була використана як вихідний матеріал для процесу відновлення Собору.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Питаннями збереження та відновлення пам'яток історії та культури займаються вчені всіх країн. Ці роботи важливі при дослідженні історії розвитку людства, його культури, традицій, навколишнього середовища. Новітні технології дозволяють такі дослідження виконувати з вищою точністю та у найкоротші терміни. Наприклад, в Іспанії, використовуючи недорогі камери мобільних телефонів, методами фотограмметрії було виконано реконструкцію частини скелі з панеллю, на якій знаходяться палеолітичні гравюри археологічної пам'ятки Сієга-Верде [1]. За результатами знімання створюються інтерактивні 3D-моделі,

які використовуються не тільки для документування об'єктів спадщини, а й для їх презентації реставрації та іншого використання, як, наприклад, виконано при реставрації Мадонни Старомиської ратуші в Празі та презентації предметів з колекції музею м. Праги [2].

Останнім часом для знімання таких об'єктів часто використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА), оскільки можуть низько літати, що дає можливість отримувати зображення необхідного для цього крупного масштабу. Для знімання використовуються різні типи камер, залежно від того, які характеристики об'єкта досліджуються, від неметричних цифрових камер до професійних цифрових та камери лазерного сканування [3, 4]. Дистанційний метод з використанням БПЛА широко використовується археологами для дослідження та ідентифікації об'єктів та артефактів, для чого використовуються різні сучасні датчики [5]. При реконструкції дерев'яної пагоди Інсьянь [6] використовувався алгоритм комп'ютерного зору Structure from Motion (SfM) для об'єднання хмари точок зовнішньої її частини, та хмари точок внутрішньої частини, отриманої за допомогою сканера LiDAR. В результаті отримана повна хмара точок дерев'яної пагоди, що дозволило дослідити її деформації більш точно, до 0,006 м.

Від вибору виду знімання та платформи, з якої вона виконується, залежить використання певного програмного забезпечення (ПЗ). Авторами статті [7] під час розв'язання задачі автоматизованої 3D-реконструкції частини скелі Святого Модеста на археологічній ділянці Метеори досліджено програмні засоби: Agisoft Metashape, RealityCapture, MicMac та Meshroom. Всі ПЗ показали однакову точність створення щільних 3D-хмар точок складних об'єктів, вищу швидкість опрацювання даних показав ПЗ Metashape. За винятком Meshroom, всі ПЗ можуть створювати результати з геоприв'язкою. Виняток становлять ПЗ MicMac, вони можуть використовуватися для створення фотореалістичних 3D-моделей.

Kaitlyn Kingsland дослідив ПЗ Agisoft Metashape (відомий як Agisoft Metashape до версії 1.5), Bentley ContextCapture та RealityCapture [8]. Проведені ним тести присвячені дослідженню артефактів шляхом їх оцифрування.

Розробка програмного забезпечення «структура з руху» (SfM) відкриває нові можливості для 3D-документування навіть для складних об'єктів [9]. Автори цієї праці великі об'єми даних обробляли кількома фотограмметричними блоками, які спочатку оброблялися окремо, а потім у єдиній хмарі точок. Для отримання вищої точності краще розв'язувати задачу в одному блоці, але для цього необхідно мати апаратні можливості.

Сучасні технології знімання та складання цифрових моделей дозволяють досліджувати геологічну характеристику родовищ, моделювати динаміку геохімічних процесів тощо [10].

Методи цифрової фотограмметрії широко використовуються при маркшейдерському забезпеченні гірничих робіт для: складання документації у виді планів, розрізів, графіків таблиць та звітів; обчислення об'ємів гірських мас; спостереження за деформаційними процесами тощо [11, 12]. Тобто, цифрові методи фотограмметрії можуть успішно використовуватися маркшейдерською службою гірничодобувних підприємств для документування об'єктів спадщини.

Метою статті є розробка методики документування об'єктів історії і культури, розташованих на територіях гірничих відводів гірничодобувних підприємств, використовуючи для знімання методи цифрової фотограмметрії та сучасні програмні засоби для опрацювання її результатів.

Викладення основного матеріалу. В статті розглядається метод створення цифрової моделі об'єкта за допомогою наземного цифрового знімання, що виконувалося різними камерами: професійною цифровою дзеркальною камерою Canon EOS 5DR та камерами мобільних телефонів Samsung Galaxy A24 і iPhone 11 серії.

Знімання мобільними телефонами виконувалась у режимах отримання фотознімків та відео. Подальше опрацювання відеофайлу здійснювалося з метою отримання окремих фотознімків, за якими будувалася цифрова модель. При цьому була використана одна з функцій програмного засобу Agisoft.

Canon EOS 5DSr має повнокадрову матрицю розміром 36×24 мм, або – 8688×5792 пікселя ($50,3$ млн пікселів). Через маркетингову політику виробників визначити характеристики камери мобільного телефону дещо складно. Наприклад, камера мобільного телефону Samsung Galaxy A24 може працювати у режимах 12 млн або 50 млн пікселів, але зрозуміло, що це не фізичні, а інтерполяційні характеристики матриці. Камера у iPhone 11 серії має розміри удвічі менші, але при цьому якість отриманих зображень не поступається якості зображень, отриманих за допомогою Samsung Galaxy A24. Знімання камерою iPhone зручніше, оскільки швидкість запису і обробки фотографій значно вища.

При зніманні камерою Canon EOS 5DSr, з фокусною відстанню об'єктива 85 мм, було отримано 734 знімки, а при зніманнях камерами мобільних телефонів Samsung Galaxy A24 та iPhone 11 відповідно – 107 та 207 знімків.

На рисунку 1 показано загальну схему виконання знімальних робіт зі станцій навколо об'єкта, а на рисунках 2–4 – конкретна кількість станцій при використанні різних камер.

У таблиці 1 наведено деякі кількісні характеристики виконаних знімків. Кожною камерою отримано різну кількість знімків. Значна різниця в кількості знімків залежить від характеристик камер: розміру матриці та величини фокусної відстані.

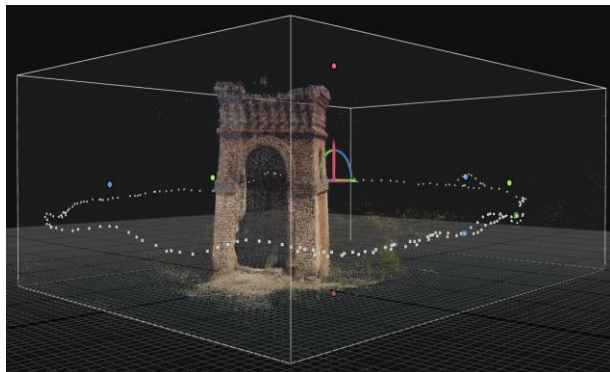


Рис. 1. Схема розташування станцій навколо об'єкта

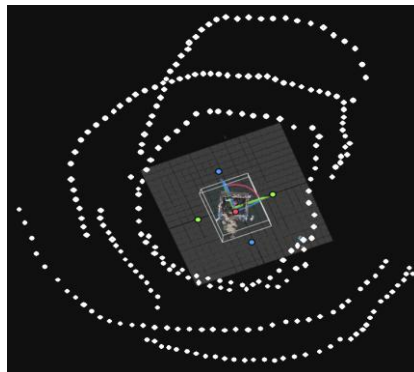


Рис. 2. Схема знімання з використанням камери Canon EOS 5DSr

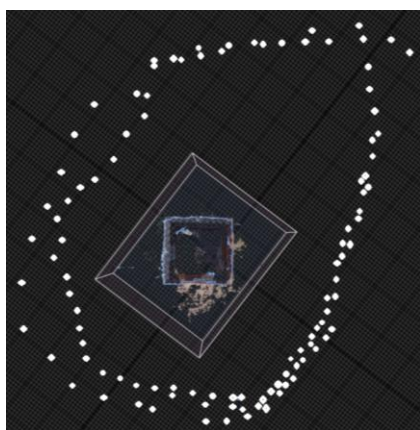


Рис. 3. Схема знімання з використанням камери мобільного телефону Samsung Galaxy A24



Рис. 4. Схема знімання з використанням камери мобільного пристрою iPhone 11

Таблиця 1

Характеристики знімків

Назва камери	Кількість знімків	Середній об'єм знімка, Мб	Обсяг на диску, Гб
Canon EOS 5DSr	734	27	15,5
Samsung Galaxy A24	107	16,6	1,76
iPhone 11	207	6	1,19

У таблиці 2 наведено приблизні (не уточнені) характеристики камер з EXIF-даних файлів.

Таблиця 2

Характеристики камер

Назва камери	Фокусна відстань, мм	Фокусна відстань (еквівалент 35 мм), мм	Розмір матриці
Canon EOS 5DSr	85	85	8688 × 5792
Samsung Galaxy A24	4	27	8160 × 6120 (інтерполяція)
iPhone 11	4	26	4032 × 3024

Від характеристик знімального обладнання та отриманих за їх допомогою результатів знімання залежить вибір параметрів обчислювальної техніки. Камери з різними характеристиками вимагають різних мінімально необхідних параметрів комп'ютерів, яких було би достатньо для опрацювання результатів знімань з достатньою точністю та у певний проміжок часу. Для вирішення таких завдань комп'ютер повинен мати достатній об'єм пам'яті та високу швидкість, забезпечуючи можливість опрацьовувати великі файли з інформацією. Також важливим фактором є наявність технології CUDA у відеоприскорювачах. Слід зауважити, що при опрацюванні результатів знімань, процесор завантажений приблизно на 98 відсотків, що впливає на час обробки даних. Відомо, що від потужності процесору залежить час обробки даних знімання. У таблиці 3 в графі «Необхідний об'єм оперативної пам'яті» наведено фактичні значення об'ємів оперативної пам'яті, які отримані за результатами робіт за цим проектом, а не теоретично розраховані.

Таблиця 3

Необхідний об'єм оперативної пам'яті

Назва камери	Кількість знімків	Необхідний об'єм оперативної пам'яті, Гб
Canon EOS 5DSr	734	141
Samsung Galaxy A24	107	22
iPhone 11	207	8

За результатами початкового вирівнювання створювалася розріджена цифрова модель, для отримання якої використовувалися найвищі значення налаштувань. Кількісні характеристики моделей наведено у таблиці 4. На рисунку 5 представлено розріджені цифрові моделі, створені за результатами знімання цифровою камерою Canon EOS 5DSr.

Таблиця 4

Кількісні характеристики

Назва камери	Загальна кількість точок розрідженої моделі	Загальна кількість точок розрідженої моделі після видалення надлишкових елементів	Щільність точок 3D-моделі, мм
Canon EOS 5DSr	4 140 597	4 040 137	2–8
Samsung Galaxy A24	525 444	477 583	–
iPhone 11	453 846	360 337	100

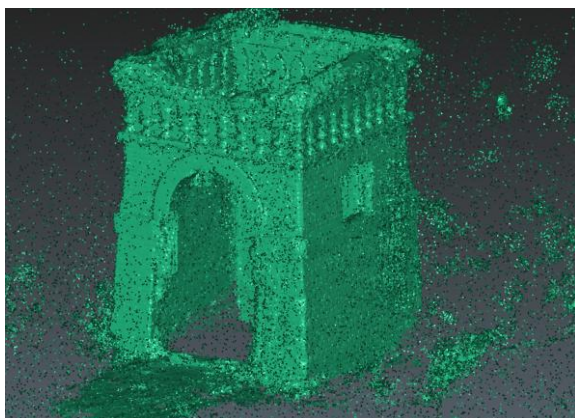


Рис. 5. Розріджена модель у форматах даних XYZ та XYZRGB (для Canon EOS 5DSr)

Після створення розрідженої моделі, наступним кроком було створення щільної моделі та процес розфарбовування точок. На рисунку 6 представлено створену щільну модель та модель у кольорі, а в таблиці 5 наведені щільності точок моделей.

Щільність точок 3D-моделі

Модель камери	Загальна кількість точок щільної моделі	Щільність точок 3D-моделі, мм
Canon EOS 5DSr	30 229 377	1–2
Samsung Galaxy A24	7 706 082	2,5–3,5
iPhone 11	1 764 653	8

На рисунку 6 представлено створену щільну модель та модель у кольорі, а в таблиці 5 наведено щільності точок моделей.

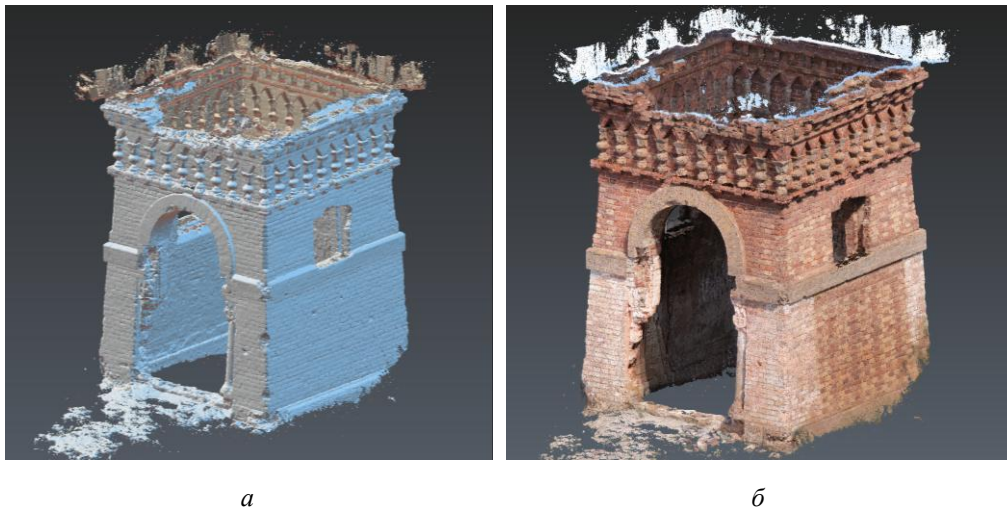


Рис. 6. Створені цифрові моделі: а – щільна модель; б – модель у кольорах RGB

На перший погляд цифрові моделі, отримані різними пристроями, майже однакові та відображають всі геометричні особливості об'єкта. Але при більш ретельному порівнянні моделей, отриманих дзеркальною камерою та камерами мобільних телефонів, спостерігається різниця у їх якості (рис. 7, 8). Модель, отримана камерою Canon EOS 5DSr, має значно вищу детальність.



Рис. 7. Фрагмент цифрової моделі, створеної за результатами знімання камерою мобільного телефону Samsung Galaxy A24



Рис. 8. Фрагмент цифрової моделі, створеної за результатами знімання камерою Canon EOS 5DSr

Частина цифрової моделі, що створена за зображеннями, отриманими зі станцій, розташування яких спричинило пряме попадання сонячних променів в об'єкти, має гіршу якість, як і при фотографічному зніманні. Відсутність бленди та ширококутність камер мобільних пристроїв спричинило погіршення якості зображення та відповідно і цифрової моделі. Також цифрова модель частини об'єкта, що попала у тінь, значно поступається детальністю освітленої частині.

Щільна цифрова модель (Mesh Model) була побудована на середніх значеннях налаштувань «Normal Detail». За необхідністю, її можна змінити, використавши найвищі з можливих значень налаштувань (High Detail). Але експериментальними роботами було встановлено, що через незначне віддалення від об'єкта знімання, точність цифрової моделі, побудованої на середніх значеннях налаштувань, достатня. Оцінити щільність 3D-моделі можна за зображеннями окремих архітектурних елементів верхнього ярусу та збільшеної її частини (рис. 9, 10).



Рис. 9. Верхній ярус споруди



Рис. 10. Збільшений елемент 3D-моделі верхнього ярусу споруди

Перед побудовою щільної мережі точок 3D-моделі оцінювалась якість отриманої моделі. Через те, що не проводилася прив'язка станцій знімання, тобто не використовувалося високоточне GNSS-устаткування та звичайний супутниковий приймач камери (в моделі камери Canon EOS 5DSr немає вбудованого супутникового приймача), тому спочатку було отримано цифрову модель недійсних розмірів, майже втричі більшу за реальні розміри.

Для того щоб привести цифрову модель до реальних розмірів (виконати масштабування моделі), було виконано додаткові вимірювання довжин ліній на архітектурних елементах споруди. Вимірювання виконувались електронним тахеометром Sokkia 630R, застосовуючи безвідбитковий режим вимірювання та метод визначення неприступних відстаней. Виміри здійснено для 6 точок, в результаті чого було отримано три контрольні відстані, які використані для масштабування моделі. В результаті було створено нову модель з додатковими вихідними даними у вигляді довжин, які використані для масштабування та оцінки точності побудованої моделі. Довжина між точками 1 і 2 (рис. 11), яка дорівнює 3,591 м, використана для масштабування, а довжини між точками 3 і 4 та 5 і 6, які мають довжини відповідно 2,663 та 3,246 м використані для контролю та оцінки точності створеної цифрової моделі.

Контрольні відстані збіглися з виміряними значеннями з точністю до 1,0–1,5 мм. На величину похибки впливає декілька складових, серед яких найбільші величини мають точність наведення на точку та паспортну похибку віддалеміра тахеометра, яка дорівнює 2 мм.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про ефективність запропонованої методики знімання об'єктів та їх архітектурних особливостей.

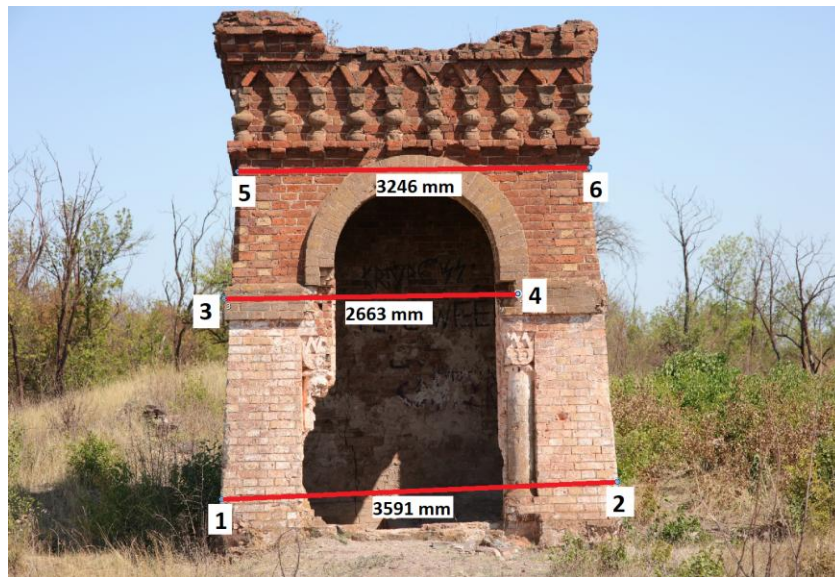


Рис. 11. Контрольні відстані

Таблиця 6

Контрольні виміри моделей

Назва довжини та її призначення	Виміряна довжина на об'єкті, м	Виміряна довжина по моделі, м
1–2 (контрольна)	3,591	3,590
3–4 (контрольна)	2,663	2,664
4–5 (для масштабування)	3,246	3,246

Дослідження показали, що розбиття відео на окремі фрагменти і обробка даного цифрового матеріалу не вимагає багато часу та спеціалізованого обладнання. Звичайно, якість знімків, отриманих в результаті розбиття відео, значно нижча, ніж знімків, отриманих в результаті знімання окремими кадрами. Але є й перевага у розбитті відео на кадри, яка полягає в отриманні значно більшої кількості кадрів. Функцію розбиття відео на фрагменти (слайди) реалізовано в програмному засобі Agisoft Metashape Professional. Польові роботи по зніманні цієї споруди виконано три рази, що дозволило обрати кращий варіант.

Відео довжиною 1 хв 49 с було розділено на 327 знімків з використанням «середнього» кроку розбиття та на 165 знімків з використанням «великого» кроку розбиття. Знімки, отримані у результаті розділення відео, мали нижчу роздільну здатність, як було зазначено вище, і це посприяло погіршенню чіткості та інформативності зображення (рис. 12, 13).

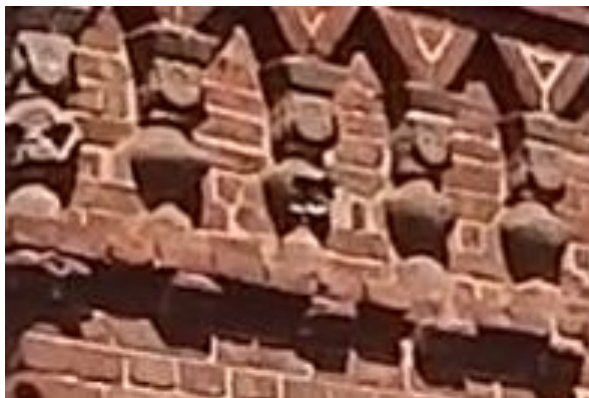


Рис. 12. Збільшена частина знімка після імпорту з відеофайлу



Рис. 13. Щільність цифрової моделі 22 мм

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати дослідження методів створення документації на об'єкти історичної та культурної цінності, які можуть бути втраченими через вплив гірничих робіт на територію, на якій вони знаходяться, дозволяють зробити висновок про ефективність використання методів цифрової фотограмметрії та сучасного програмного забезпечення для опрацювання результатів знімання. Залежно від умов розташування об'єкта, його форми та розмірів обирається вид знімання: з землі чи з БПЛА; професійною камерою чи камерою мобільного телефону тощо.

References:

1. Fonseca Moro, L.A. and Pérez Pavón, J.L. (2022), «Low-cost photogrammetric reconstruction of a panel with palaeolithic engravings of Siega Verde (Salamanca, Spain): From the rocky outcrop to the details», *Journal of Archaeological Science: Reports*, Vol. 45, doi: 10.1016/j.jasrep.2022.103594.
2. Polo, M.-E., Felicísimo, A.M. and Durán-Domínguez, G. (2022), «Accurate 3D models in both geometry and texture: An archaeological application», *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, Vol. 27, doi: 10.1016/j.daach.2022.e00248.
3. Collins, T., Woolley, S.I., Gehlken, E. and Ch'ng, E. (2019), «Automated low-cost photogrammetric acquisition of 3D models from small form-factor artefacts», *Electronics*, doi: 10.3390/electronics8121441.
4. Amrullah, C., Suwardhi, D. and Meilano, I. (2016), «Product accuracy effect of oblique and vertical non-metric digital camera utilization in UAV-photogrammetry to determine fault plane», *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, doi: 10.5194/isprs-annals-III-6-41-2016.
5. Ulvi, A. (2022), «Using UAV photogrammetric technique for monitoring, change detection, and analysis of archeological excavation sites», *Journal on Computing and Cultural Heritage*, Vol. 15, Issue 3, pp. 1–19, doi: 10.1145/3522742.
6. Guo, M., Sun, M., Pan, D. et al. (2023), «High-precision deformation analysis of Yingxian wooden pagoda based on UAV image and terrestrial LiDAR point cloud», *Heritage Science*, doi: 10.1186/s40494-022-00833-z.
7. Verykokou, S., Soile, S., Bourexis, F. et al. (2020), «A comparative analysis of different software packages for 3D modelling of complex geometries», *Euro-Mediterranean Conference*, pp. 228–240, doi: 10.1007/978-3-030-73043-7_19.
8. Kingsland, K. (2020), «Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage», *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, Vol. 18, doi: 10.1016/j.daach.2020.e00157.
9. Arza-García, M., Gil-Docampo, M. and Ortiz-Sanz, J. (2019), «A hybrid photogrammetry approach for archaeological sites: Block alignment issues in a case study (the Roman camp of A Cidadaela)», *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 38, pp. 195–203, doi: 10.1016/j.culher.2019.01.001.
10. Levytskyi, V.H., Kryvoruchko, A.O., Skyba, H.V. et al. (2025), «Geometrization of structural elements of the Southern section of the Bystriivske gabbro deposit to determine rational directions of development», *Tekhnichna Inzheneriia*, No. 1 (95), doi: 10.26642/ten-2025-1(95)-159-165.
11. Kalinichenko, V., Dolgikh, O., Dolgikh, L. and Pysmennyi, S. (2020), «Choosing a camera for mine surveying of mining enterprise facilities using unmanned aerial vehicles», *Mining of Mineral Deposits*, doi: 10.33271/mining14.04.031.
12. Dolgikh, O., Dolgikh, L., Ielezov, K. and Maletskii, N. (2021), «The use of the construction with a digital camera and GPS receiver while researching dangerous areas», *E3S Web of Conferences*, doi: 10.1051/e3sconf/202128008009.

Долгіх Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, доцент Криворізького національного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-7558-8724>.

Наукові інтереси:

- автоматизація маркшейдерських та гірничих робіт;
- цифрові методи фотограмметрії в маркшейдерії.

E-mail: o.dolhikh@knu.edu.ua.

Долгіх Любов Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент Криворізького національного університету.

<https://orcid.org/0000-0003-0577-5086>.

Наукові інтереси:

- цифрові методи фотограмметрії у маркшейдерії.

E-mail: dllvgeod@knu.edu.ua.

Долгіх Крістіна Олександрівна – здобувач «Малої академії наук України» (МАН).

Наукові інтереси:

- сучасні методи дослідження спадщини.

Назаров Роман Андрійович – аспірант Криворізького національного університету.

Наукові інтереси:

- автоматизація маркшейдерських та гірничих робіт.

Dolgikh O.V., Dolgikh L.V., Dolgikh K.O., Nazarov R.A.

Surveying of historical monuments affected by mining operations

In Kryvyi Rih, the area of land currently occupied by mining operations and previously disturbed by mining operations continues to expand, resulting in the destruction of valuable fertile soils and the absorption of buildings and structures located on these lands. Some of these sites are of historical or cultural value. Therefore, the issue of protecting and restoring historical and cultural monuments located within mining allotments is undoubtedly relevant. The purpose of this study is to analyze and select an effective method for examining historical and cultural monuments to obtain the necessary documentation to ensure their preservation and possible reproduction. The method involves photographing cultural heritage sites using a variety of inexpensive cameras – professional digital cameras and mobile phone cameras. The resulting images were then processed using Agisoft software. The result was a digital model of the historical monument, allowing for the precise determination of its dimensions and other characteristics. The study developed a methodology for surveying using various cameras and producing a digital model of the historical site with the required accuracy. The proposed method will allow archiving such objects with the required accuracy and reproducing them in the future in safe or suitable places for preservation. The scientific novelty of the study lies in the creation of an effective surveying technique using accessible cameras and the creation of a high-precision digital model of the monument. The practical significance of the obtained results lies in the development of an effective approach to the creation of documentation necessary for the preservation and restoration of historical and cultural monuments that are under threat of partial or complete destruction due to the impact of mining operations.

Keywords: digital survey; historical building; computer processing; video; photo.

Стаття надійшла до редакції 23.09.2025.