

УДК 378.147.091.313:004:528.7

DOI 10.58407/visnik.263905

Джевага Григорій<https://orcid.org/0000-0001-6853-885X>

Кандидат педагогічних наук, доцент
кафедри педагогіки, психології і методики технологічної освіти,
Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
(Чернігів, Україна) E-mail: dzhevaга.g@gmail.com

Ніколаєнко Дмитро<https://orcid.org/0009-0000-7207-8382>

Провідний інженер відділу комп'ютерних технологій
та захисту інформації,
Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
(Чернігів, Україна) E-mail: nikodim74@gmail.com

Путніков Віктор<https://orcid.org/0009-0004-2328-1391>

Аспірант кафедри педагогіки, психології і методики технологічної освіти,
Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
(Чернігів, Україна) E-mail: viktor.putnikov@gmail.com

ПРОЄКТУВАННЯ ЗДОБУВАЧАМИ ЗВО АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНВЕЄРА ФОТОГРАМЕТРІЇ З УРАХУВАННЯМ АПАРАТНИХ СКЛАДОВИХ НА БАЗІ ХМАРНИХ LINUX-СЕРВЕРІВ

У статті розглядається проблема цифровізації об'єктів культурної та історичної спадщини Чернігівщини, які перебувають під загрозою внаслідок збройної агресії та природних чинників. Дослідження базується на діяльності наукового гуртка «Штучний інтелект: від теорії до старту» та Інноваційного хабу Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка. Основна увага приділяється технології фотограмметрії, яка потребує значних обчислювальних потужностей для створення високоточних тривимірних копій реальних об'єктів. У роботі детально описано перехід від послідовних обчислень на CPU до паралельних на GPU з використанням ядер CUDA для прискорення алгоритмів Structure from Motion та цільної 3D-реконструкції. Розглядаються апаратні вимоги до обсягів відеопам'яті та пропускну здатності шини PCIe Gen4/5 для обробки масивів растрових даних. Висвітлено процес побудови автоматизованих конвеєрів через системне адміністрування Linux-серверів, що дозволяє працювати в режимі без графічної оболонки, вивільняючи ресурси для обчислень. Важливою складовою є опис інтеграції моделей глибокого навчання для семантичної сегментації та очищення зображень від цифрового шуму й артефактів.

Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні та проєктуванні архітектури автоматизованого конвеєра фотограмметрії в хмарному середовищі на базі операційної системи з ядром Linux із використанням технологій штучного інтелекту та контейнеризації для оптимізації процесу створення цифрових копій об'єктів культурної спадщини та вдосконалення підготовки фахівців IT-профілю.

Для досягнення поставленої мети використано такі **методи дослідження**: пошук, теоретичний аналіз та систематизація наукових праць з проблеми дослідження; інтерпретація та узагальнення результатів досліджень науковців; розроблення методичних рекомендацій.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні комплексної моделі автоматизованого фотограмметричного конвеєра, яка поєднує хмарні Linux-сервери, Docker-ізоляцію середовищ CUDA та інтелектуальну передобробку даних нейромережами в єдиний робочий цикл. Це дозволяє усунути конфлікти версій бібліотек і забезпечити стабільність процесів під час використання різних програмних засобів (Meshroom та PyTorch). Удосконалено метод створення цифрових двійників об'єктів історичної спадщини за рахунок автоматизації етапів очищення растру від візуального шуму за допомогою Tensor-ядер, що забезпечує вищу метричну точність моделей при суттєвому зменшенні часових витрат. Набула подальшого розвитку методика створення міждисциплінарних зв'язків під час виконання творчих проєктів здобувачів, що інтегрує знання з архітектури комп'ютера, операційних систем і комп'ютерної графіки.

Висновки. Дослідження підтверджує, що використання Linux-серверів забезпечує ефективне управління ресурсами GPU, вивільняючи до 10-15% відеопам'яті завдяки відсутності графічного інтерфейсу. Впровадження Docker Engine спільно з NVIDIA Container Toolkit гарантує стабільність

обчислювального конвеєра та можливість паралельного використання різних версій CUDA. Реалізація такого проєкту є ефективним освітнім інструментом, що готує здобувачів до реальних викликів у сферах DeoOps та цифровізації об'єктів, переносячи акцент з рутинної обробки на проєктування складних систем. Практичне застосування розробленої моделі дозволяє створювати надійні цифрові архіви пам'яток Чернігівщини, які можуть бути використані для майбутньої реставрації, 3D-друку або створення інтерактивних додатків доповненої реальності. Перспективним напрямом є автоматизація конвертації моделей у формати, оптимізовані для мобільних пристроїв та VR-платформ.

Ключові слова: комп'ютерна графіка, архітектура комп'ютера, операційні системи, штучний інтелект, фотограмметрія.

Постановка проблеми. Впровадження технології штучного інтелекту у промислові технологічні процеси та створення цифрових тривимірних копій потребують масштабування потужностей для виконання обчислень. Здобувачі освітньо-професійної програми «Професійна освіта (Цифрові технології)» у межах діяльності Інноваційного хабу Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка та наукового гуртка «Штучний інтелект: від теорії до стартапу» досліджують технологію фотограмметрії для створення цифрових тривимірних копій реальних об'єктів мистецтва та історичної спадщини Чернігівської області. Проте, дана технологія потребує використання значних обчислювальних ресурсів комп'ютерної системи, спеціального обладнання та автоматизації рутинних процесів. Розв'язання даної проблеми полягає у налагодженні автоматизованих конвеєрів обробки зображень шляхом системного адміністрування операційної системи на базі ядра Linux, використання глибокого навчання штучних нейронних мереж та алгоритмів комп'ютерного зору.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Цифровізація культурної спадщини Чернігівщини здійснюється як міжнародними фондами, волонтерськими групами, державними інституціями, так і академічною спільнотою. Подібні проєкти реалізують профільні громадські організації та волонтерські ініціативи, такі як Skeiron (Львів) [12], Pixelated Realities (Одеса) [4], Scan UA [11] та інші.

Технологію побудови тривимірних копій архітектурних споруд на основі фотограмметрії розвивають закордонні дослідники Albazooni A.M., Al-Hamad A., Bugeja M., Duzenli K., Gilányi A., Grima A., Kenely M, Markaryan A.S., Pullicino P., Pullicino M., Samir H., Seychell D., Thiab F [1-3]. В Україні набувають поширення дослідження цифрування пам'яток історії та культури фотограмметричними методами для подальшої реставрації та проведення ремонтних робіт. Вони представлені у статтях таких вчених, як Барановського С., Дунаєвського Є., Дунаєвської А., Коцюбовської К., Поповича Є., Осипова С., Осипова О., Тертичного А., Товбича В. Теоретичні основи технології цифрової фотограмметрії та дистанційного зондування поверхні Землі розкрито у посібниках авторських колективів – Білоус В., Боднара С. [6] та Купріячук І., Бутенко Є. [10].

Мета статті – теоретичне обґрунтування та проєктування архітектури автоматизованого конвеєра фотограмметрії в хмарному середовищі на базі операційної системи з ядром Linux, із використанням технологій штучного інтелекту та контейнеризації для оптимізації процесу створення цифрових копій об'єктів культурної спадщини та вдосконалення підготовки фахівців ІТ-профілю.

Завдання статті: 1) проаналізувати архітектурні особливості сучасних обчислювальних систем GPU та ядер CUDA для забезпечення високої продуктивності фотограмметричних обчислень; 2) спроектувати структуру автоматизованого конвеєра на Linux-сервері, що використовує Docker-контейнери та NVIDIA Container Toolkit для ізоляції та стабілізації програмного середовища; 3) інтегрувати алгоритми штучного інтелекту в етапи попередньої обробки растрових даних для підвищення якості вихідних тривимірних моделей; 4) розробити методичні рекомендації щодо впровадження даного технологічного стеку в освітній процес для формування професійних компетентностей здобувачів у межах курсів з «Вступу до комп'ютерних наук» (модуль «Архітектура комп'ютера»), «Операційні системи», «Растрова графіка» та «Тривимірна графіка».

Методологія дослідження включає пошук, системний теоретичний аналіз та систематизацію наукових праць і практичного досвіду щодо використання фотограмметрії та хмарних обчислень. Для розв'язання технічних завдань застосовано методи комп'ютерного моделювання SfM/MVS, технологію контейнеризації Docker для ізоляції програмних середовищ та інтерпретацію результатів апробації конвеєра на прикладі об'єктів Національного архітектурно-історичного заповідника «Чернігів стародавній». Окрім технічного аналізу, використано метод розроблення методичних рекомендацій щодо впровадження даного технологічного стеку в освітній процес підготовки здобувачів спеціальності «Професійна освіта (Цифрові технології)».

Виклад основного матеріалу. Чернігівщина має історичну спадщину, яка сьогодні перебуває під загрозою через збройну агресію РФ, природне старіння, недостатню архівацію та ризик фізичного руйнування об'єктів внаслідок обстрілів. У такому випадку 3D-модель стає єдиним джерелом для майбутньої реставрації або віртуального відтворення [8]. Поступове руйнування фасадів і фундаментів через перепади температур і вологості, що особливо характерно для старовинних цегляних і дерев'яних споруд.

На відміну від простого фотографування, створення тривимірних копій дозволяє зберегти метричні дані об'єкта [9]. Растрові карти текстур високої роздільної здатності фіксують стан матеріалів (тріщини, відлущування фарби, специфіку кладки), що важливо для мистецтвознавчої експертизи. Застосування моделей штучного інтелекту може допомогти відтворити, з певною ймовірністю, втрачені фрагменти на основі аналізу аналогічних архітектурних форм.

У межах проєкту цифрування історичної та культурної спадщини здобувачам вищої освіти доцільно зосередитися на знакових об'єктах Національного архітектурно-історичного заповідника «Чернігів стародавній»: Спасо-Преображенського та Борисоглібського соборів; унікальному різьбленні дерев'яних чернігівських будинків, які руйнуються від пожеж та природних факторів; створення з експонатів музеїв цифрових тривимірних копій артефактів козацької доби.

Архітектура обчислювальних систем для фотограмметрії сьогодні фокусується на переході від послідовних обчислень з використанням CPU до масивно-паралельних – на GPU. Для реалізації проєкту автоматизованого конвеєра на сервері з операційною системою Ubuntu апаратна специфіка використання GPU та ядер CUDA є критичним фактором, що визначає швидкість формування цифрової тривимірної копії реального об'єкта за світлинами. Фотограмметрія складається з двох основних етапів, кожен з яких по-різному використовує ресурси GPU. Процес Structure from Motion використовує ядра CUDA, що прискорюють алгоритми пошуку та зіставлення дескрипторів на кожній світлинці. Наприклад, SIFT або нейронні дескриптори, такі як SuperPoint. Таким чином, визначається точне положення камери для кожного знімку та її орієнтація у просторі, щоб знайти збіги пікселів між багатьма сусідніми цифровими зображеннями. Оскільки кожна світлина складається з двовимірної матриці пікселів, CUDA дозволяє одночасно обробляти тисячі опорних точок на різних зображеннях.

Далі, на етапі щільної реконструкції тривимірного об'єкта (Dense 3D Reconstruction), створюється щільна хмара точок, яка стає основою для детальної тривимірної моделі реального об'єкта чи місцевості на основі суми світлин з різних ракурсів. Це найбільш ресурсомісткий етап, який залучає CUDA-ядра відеокarti NVIDIA, що виконують паралельне обчислення карти глибини зображення (depth maps) для кожного кадру. Тут GPU обробляє мільярди операцій множення та додавання, щоб знаходити відповідні пікселі в тривимірному просторі [6].

Для побудови ефективного конвеєра проєкту в операційній системі на базі ядра Linux важливо враховувати не лише кількість CUDA-ядер, а й архітектуру передачі даних між оперативною пам'яттю відеокarti та системою. Для великих будинків чи споруд Чернігівщини, наприклад, фасаду собору, потрібно мінімум 12-24 ГБ VRAM [5]. Якщо масив текстур не вміщується в пам'ять GPU, система починає перенесення даних з оперативної пам'яті на жорсткий диск у файл підкачки для звільнення VRAM через шину PCIe до оперативної пам'яті, що сповільнює процес у 10-50 разів, залежно від обсягів даних і ширини шини. У хмарних серверах важливо використовувати PCIe Gen4/5. Оскільки фотограмметрія передбачає постійне перекачування текстур, растрових даних, між RAM та GPU, низька швидкість шини стане слабким місцем проєкту [7].

Під час проєктування автоматизованого конвеєра на операційній системі з ядром Linux варто впроваджувати технології оптимізації для Linux-серверів. Зчитувати файли цифрових зображень для обробки GPU можна безпосередньо з NVMe-накопичувача, обминаючи CPU та системну оперативну пам'ять. Це знижує навантаження на процесор на 80-90% і прискорює завантаження растрових масивів. Використання серверної операційної системи без графічної оболонки дозволить виділити додаткові 1-2 ГБ VRAM, які зазвичай споживають робочий стіл та вікна запущених програм, безпосередньо на потреби обчислень. Сучасні архітектури відеокarti NVIDIA мають окремі Tensor-ядра, які використовуються для очищення світлин з об'єктами від цифрового шуму перед реконструкцією. Моделі семантичної сегментації штучних нейронних мереж можуть автоматично визначати на світлинах об'єкти й маскувати зайві елементи в кадрі – небо, хмари, людей або дерева – щоб вони не створювали артефактів під час фотограмметрії. Також, за допомогою нейромереж для отримання фотореалістичних цифрових копій, можна збільшувати роздільну здатність текстур.

Для побудови стабільної обчислювальної системи, що працює з моделями штучного інтелекту та забезпечує процес фотограмметрії, доцільно використати Docker-контейнер у поєднанні з NVIDIA Container Toolkit. Це дозволить розв'язати головну проблему – виникнення конфлікту версій бібліотек CUDA між різними етапами конвеєра обчислень або іншими реалізованими проєктами. За допомогою розміщення процесів у Docker-контейнерах можна відокремити драйвер відеокarti від бібліотек CUDA. Таким чином, на сервері буде використовуватися лише стабільний NVIDIA Driver, який буде керувати потоком обчислень і передачею даних по шині. Всередині одного Docker-контейнера буде функціонувати одна конкретна версія CUDA Toolkit, що потрібна для функціонування програми фотограмметрії Meshroom, а інша версія у іншому контейнері буде забезпечувати обчислення штучної нейронної мережі для обробки текстур.

Для кожного конвеєра обробки зображень необхідно буде створити окремий Docker-файл, що буде гарантувати ізоляцію одного середовища від іншого. Під час процесу фотограмметрії доцільно виділити три Docker-контейнера:

– контейнер з процесом ШІ-очищення фотографій від сторонніх об'єктів буде складатися з: операційної системи Ubuntu, середовища Python 3.10 та бібліотеки PyTorch, яка буде використовувати CUDA 11.8;

– контейнер процесу реконструкції програми Meshroom, який буде реалізовуватися на серверній операційній системі через інтерфейс командного рядка і складатися з: операційної системи Ubuntu, програми Meshroom, яка керуватиметься через CLI і взаємодіятиме з CUDA 11.2;

– контейнер обробки та оптимізації тривимірної моделі буде складатися з операційної системи Ubuntu, тривимірного графічного редактора Blender, який буде взаємодіяти з CUDA 12.x для виконання процесу ретопології.

Використання Docker, що здійснює ізоляцію процесів та версій програмного забезпечення, дозволить зберегти працездатність конвеєрів навіть через 5-10 років, коли сучасні версії операційної системи та драйверів стануть застарілими.

Вибір місця виконання проєкту здобувачами між локальною станцією та хмарним сервером має кілька важливих технічних і компетентнісних аспектів. Для студентського проєкту, де ключовим є не лише результат отриманої тривимірної моделі, а й процес навчання, що зумовлює необхідність проведення аналізу функціонування апаратної складової та системного адміністрування. Для команди здобувачів з 3-7 осіб, які працюють над цифруванням пам'яток, локальне виконання дозволяє візуально бачити процес через монітор та легше працювати через графічний інтерфейс у програмах Blender або Meshroom. Робота у хмарному середовищі дозволяє реалізувати багатокористувацьку роботу над проєктом. Члени команди підключаються через SSH-з'єднання, монтують зовнішні диски і завантажують фото у свої директорії. Автоматизовані конвеєри, що працюють у фоні через Docker-контейнери, можна автоматизувати через сповіщення у Telegram про готовність моделі. Таким чином, здобувачі будуть застосовувати на практиці знання щодо використання командного інтерфейсу керування процесами, налаштовувати права доступу до сервера і директорій, створювати і наповнювати Docker-контейнери, писати Bash-скрипти для автоматизації та здійснювати мережеві налаштування.

Методично доцільно, щоб здобувачі використовували локальні комп'ютери для відбору фото, маскування сторонніх об'єктів та фінальної ретопології у Blender. А важкий етап для обчислень конвеєрних процесів Structure from Motion та Dense 3D Reconstruction виноситься на Linux-сервер з доступними CUDA-ядрами.

Висновки. Отже, використання операційних систем на базі ядра Linux доводить свою перевагу завдяки ефективному управлінню ресурсами GPU та можливості роботи через командний рядок, що вивільняє до 10-15% відеопам'яті для потреб фотограмметрії. Впровадження Docker Engine спільно з NVIDIA Container Toolkit забезпечує стабільність конвеєра, дозволяючи одночасно використовувати різні версії CUDA для етапів реконструкції та ШІ-оптимізації, повністю усуваючи проблему конфлікту програмних залежностей.

Виконання проєкту розробки автоматизованого конвеєра є ефективним інструментом для реалізації міждисциплінарних зв'язків, які дозволяють здобувачам вищої освіти практично застосовувати знання з архітектури обчислювальних систем GPU та CPU, адмініструвати операційні системи, а також редагувати растрові та тривимірні цифрові зображення у спеціалізованих графічних редакторах. Робота з автоматизованим конвеєром готує майбутніх фахівців до реальних викликів у сферах DevOps для розробки ігор, цифрової архівації та графічного дизайну, зміщуючи акцент з рутинної обробки на проєктування складних автоматизованих систем.

Наступним кроком дослідження є розробка методів автоматичної конвертації отриманих моделей у формати, оптимізовані для доповненої та віртуальної реальності для популяризації історії Чернігівщини в інтерактивних мобільних застосунках.

References

1. Duzenli, K., Albazooni, A. M., Al-Hamad, A., & Gilányi, A. (2026) A Systematic Review of Utilizing Extended Reality Technologies for Historical Site Preservation and Visualization. *Results in Engineering*, Volume 30, June 110592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110592>
2. Kenely, M., Bugeja, M., Grima, A., Pullicino, P., Pullicino, M., & Seychell, D. (2026). Large-Scale Photogrammetric Documentation of St. John's Co-Cathedral: A Workflow for Cultural Heritage Preservation. *arXiv preprint arXiv:2604.24316*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.24316>
3. Markaryan, A. S., Thiab, F., & H Samir, H. (2026). Photogrammetry As a Technology for Preserving Architectural Heritage: An Applied Study of The Al-Maqam Mosque in Basra. *Iraqi Journal of Architecture and Planning*: Vol. 25: Iss. 1, Article 4. DOI: <https://doi.org/10.36041/ijap.2025.158755.1151>
4. Pixelated Realities. Зашифруємо спадщину URL: <https://pixelatedrealities.org/uk/> (дата звернення 10.04.2026)
Pixelated Realities. Zatsyfruiemo spadshchynu [Let's digitize our heritage] Retrieved from: <https://pixelatedrealities.org/uk/>. [in Ukrainian]

5. Багаєва М. А. Аналіз фотограмметрії як методу створення 3D-моделей. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: матеріали 28-го Міжнар. молодіж. форуму, 16-18 квітня 2024 р.* Харків: ХНУРЕ, 2024. Т. 3. 322-324. DOI: <https://doi.org/10.30837/IYF.IRTTPI.2024.322>
Bahaieva, M.A. (2024). Analiz fotogrametrii yak metodu stvorennia 3D-modelei [Analysis of photogrammetry as a method for creating 3D models]. *Radioelektronika ta molod u KhKhI stolitti: materialy 28-ho Mizhnar. molodizh. forumu, 16-18 kvitnia 2024.* – *Radioelectronics and youth in the 21st century: materials of the 28th International Youth Forum, April 16-18, 2024.* Kharkiv, Ukraine: KhNURE. 3. 322-324. [in Ukrainian]
6. Білоус В. В. Боднар С. П. Фотограмметрія : навчальний посібник. Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2021. 137 с. URL: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/navch_pos_fotogrametri_bilous2021_proekt.pdf (дата звернення 10.04.2026)
Bilous, V. V. & Bodnar, S. P. (2021). Fotogrametriia [Photogrammetry]: Navchalnyi posibnyk. Kyiv, Ukraine: Kyivskiy natsionalnyi universytet imeni Tarasa Shevchenka. 137. Retrieved from: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/navch_pos_fotogrametri_bilous2021_proekt.pdf [in Ukrainian]
7. Дунаєвська А., Дунаєвський Є., Тертичний А. Архітектурна фотограмметрія, як інноваційна складова комплексної підготовки сучасних фахівців архітектурного напрямку. *Архітектурний вісник КНУТД*. № 33. 2025. С. 140-153. DOI: <https://doi.org/10.32347/2519-8661.2025.33.140-153>.
Dunaievska, A., Dunaievskiy, Ye., & Tertychniy, A. (2025). Arkhitekturna fotogrametriia, yak innovatsiina skladova kompleksnoi pidhotovky suchasnykh fakhivtsiv arkhitekturnoho napriamku [Architectural photogrammetry as an innovative component of comprehensive training of modern architectural specialists]. *Arkhitekturny visnyk KNUITD – Architectural Bulletin of the KNUITD*. 33. 140-153. [in Ukrainian].
8. Косаревська Р., Левченко О. Цифровізація історичних пам'яток України в контексті архітектури та містобудування: створення віртуальних музеїв та майданчиків. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. №67. 2023. С. 60-71. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.67.60-71>
Kosarevska, R., & Levchenko, O. (2023). Tsyfrovizatsiia istorychnykh pamiatok Ukrainy v konteksti arkhitektury ta mistobuduvannia: stvorennia virtualnykh muzeiv ta maidanchyiv [Digitization of historical monuments of Ukraine in the context of architecture and urban planning: creation of virtual museums and sites]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia – Modern problems of architecture and urban planning*. 67. 60-71. [in Ukrainian]
9. Кочеригін Л. Ю. Фотограмметрія: навч. посіб. для студ. аграрних закладів вищої освіти галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». Біла Церква: БНАУ, 2019. 496 с. URL: <https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/8401/3/fotogrametriia.pdf> (дата звернення 10.04.2026)
Kocheryhin, L. Yu. (2019). Fotogrametriia [Photogrammetry]: navch. posib. dlia stud. ahrarnykh zakladiv vyshchoi osvity haluzi znan 19 «Arkhitektura ta budivnytstvo» spetsialnosti 193 «Heodeziia ta zemleustrii». Bila Tserkva, Ukraine: BNAU. 496. [in Ukrainian]
10. Купріянич І. П. Бутенко Є. В. Фотограмметрія та дистанційне зондування: навчальний посібник. Київ: МВЦ «Медінформ», 2013. 350 с.
Kupriianchyk, I. P. & Butenko, Ye. V. (2013). Fotogrametriia ta dystantsiine zonduvannia [Photogrammetry and Remote Sensing]: navchalnyi posibnyk. Kyiv, Ukraine: MVTs «Medinform». 350. [in Ukrainian]
11. Проект Scan UA. Збережіть українську спадщину. URL: <https://ua.scanua.com/> (дата звернення 10.04.2026)
Proiekt Scan UA. Zberezhit ukrainsku spadshchynu [Scan UA Project. Preserve Ukrainian Heritage]. Retrieved from: <https://ua.scanua.com/>. [in Ukrainian]
12. Проект Skeiron. Оцифровуємо минуле заради майбутнього. URL: <https://skeiron.com.ua/ua> (дата звернення 10.04.2026)
Proiekt Skeiron. Otsyfrovuiemo mynule zarady maibutnoho [Skeiron Project. Digitizing the past for the future]. Retrieved from: <https://skeiron.com.ua/ua>. [in Ukrainian]

DzhevaHa Hryhorii

<https://orcid.org/0000-0001-6853-885X>

*PhD in Pedagogical Sciences,
Associate Professor of the Department of Pedagogy,
Psychology and Methodology of Technological Education,
T. H. Shevchenko National University «Chernihiv colehium»
(Chernihiv, Ukrainian) E-mail: dzhevaHa.g@gmail.com*

Nikolaenko Dmytro

<https://orcid.org/0009-0000-7207-8382>

Lead Engineer, Department of Computer Technology and Information Security,
T. H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»
(Chernihiv, Ukrainian) E-mail: nikodim74@gmail.com

Putnikov Victor

<https://orcid.org/0009-0004-2328-1391>

Graduate student of the Department of Pedagogy,
Psychology and Methodology of Technological Education,
T. H. Shevchenko National University «Chernihiv colehium»
(Chernihiv, Ukrainian) E-mail: viktor.putnikov@gmail.com

DESIGNING AN AUTOMATED PHOTOGRAMMETRY PIPELINE BY HIGHER EDUCATION STUDENTS CONSIDERING HARDWARE COMPONENTS BASED ON CLOUD LINUX SERVERS

The article examines the problem of digitalizing cultural and historical heritage sites in the Chernihiv region, which are currently under threat due to armed aggression and natural factors. The research is based on the activities of the student research club «Artificial Intelligence: from Theory to Startup» and the Innovation Hub of the T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium». Primary attention is paid to photogrammetry technology, which requires significant computing power to create high-precision three-dimensional copies of real objects. The work describes in detail the transition from sequential computing on the CPU to massively parallel computing on the GPU using CUDA cores to accelerate Structure from Motion algorithms and dense 3D reconstruction. Hardware requirements for video memory volumes and PCIe Gen4/5 bus bandwidth for processing large arrays of raster data are considered. The process of building automated pipelines through the system administration of Linux servers is highlighted, which allows for operation in a mode without a graphical interface, thereby freeing up critical hardware resources for computations. An important component is the description of the integration of deep learning models for semantic segmentation and clearing images of digital noise and artifacts. Aim of the work is the theoretical justification and design of the architecture of an automated photogrammetry pipeline in a cloud environment based on an operating system with a Linux kernel, using artificial intelligence technologies and containerization to optimize the process of creating digital copies of cultural heritage objects and improving the training of IT specialists.

Methodology. The research methodology includes a search, systematic theoretical analysis, and systematization of scientific works and practical experience regarding the use of photogrammetry and cloud computing. To solve technical problems, SfM/MVS computer modeling methods, Docker containerization technology for isolating software environments using the NVIDIA Container Toolkit, and interpretation of the results of the pipeline testing on the example of objects from the National Architectural and Historical Reserve «Chernihiv Ancient» were applied. In addition to the technical analysis, a method for developing methodological recommendations for implementing this technology stack into the educational process of training students in the specialty «Professional Education (Digital Technologies)» was used.

Scientific novelty of the obtained results lies in the improvement of a comprehensive model of an automated photogrammetric pipeline that combines cloud Linux servers, Docker isolation of CUDA environments, and intelligent preprocessing of data by neural networks into a single work cycle. This allows for the elimination of software dependency version conflicts and ensures process stability when using various software such as Meshroom, Blender, and PyTorch. The method of creating digital twins of historical heritage objects has been improved by automating the stages of clearing the raster from digital noise using Tensor cores, which ensures higher metric accuracy of models with a significant reduction in time costs. The methodology for creating interdisciplinary connections during the implementation of students' creative projects has been further developed, integrating knowledge of computer architecture, operating systems, and graphic design.

Conclusions. The study confirms that the use of Linux-based operating systems proves its advantage due to efficient GPU resource management and the ability to work via the command line, which frees up to 10-15% of video memory for photogrammetry needs. The implementation of the Docker Engine together with the NVIDIA Container Toolkit ensures the stability of the computing pipeline and the possibility of simultaneous use of different CUDA versions. The implementation of such a project is a powerful educational tool that prepares students for real challenges in the fields of DevOps for game development, digital archiving, and computational design, shifting the emphasis from routine processing to the design of complex automated systems. The practical application of the developed model allows for the creation of reliable digital archives of Chernihiv monuments, which can be used for future restoration, 3D printing, or the creation of interactive augmented reality applications. A promising direction for further research is the automation of model conversion into formats optimized for mobile devices and VR platforms.

Key words: computer graphics, computer architecture, operating systems, artificial intelligence, photogrammetry.

Стаття надійшла до редакції 01.04.2026 р.

Рецензент: доктор педагогічних наук, професор **Вадим Ребенок**