

М.А. Скорик, аспірант  
О.М. Гнітецький, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Методичні засади вибору технології 3D-вимірювань для визначення об'єму блоків природного каменю в умовах діючого кар'єру

У статті наведено основні результати експериментального порівняння сучасних дистанційних технологій визначення об'ємів блоків природного облицювального каменю в умовах складського майданчика кар'єру. Метою дослідження є оцінювання точності, часової ефективності та технологічних обмежень трьох основних сучасних підходів: аерофотограмметрії з використанням БПЛА (UAV, SfM/MVS), мобільного лазерного сканування на основі SLAM та наземної фотограмметрії зі смартфона. Випробування виконано на майданчику розмірами 22×17 м, що містив 57 блоків, із застосуванням опорних і контрольних точок для метричної прив'язки та контролю якості. Обробку фотограмметричних даних було здійснено з використанням програми Pix4DMatic, SLAM-даних – при використанні Lixel Studio; точність результатів оцінювали за показниками RMSE.

В результаті аналізу даних вимірювань було встановлено, що UAV-знімання з малої висоти (6,5 м) і кутом нахилу камери 35–45° забезпечує найвищу метричну стабільність (RMSE ≈ 6 мм), однак характеризується найбільшими витратами камерального часу (77 хв на обробку 488 знімків) та суттєво залежить як від погодних, так і регуляторних обмежень. SLAM-метод продемонстрував найкращу оперативність (сукупно приблизно 46 хв на збір та обробку даних) при цьому було досягнуто достатню для інвентаризації точність (RMSE у плані 19 мм, за висотою 5 мм), що робить його використання перспективним як для періодичного, так і регулярного моніторингу складів блочної сировини. Фотограмметрія з використанням смартфонів (iPhone 13 Pro + Pix4Dcatch) виявила обмежену масштабованість: при збільшенні площі та кількості об'єктів (до 2196 знімків) спостерігалися так звані артефакти типу «подвоєння площин» і зростання шуму, що суттєво знижує придатність методу для великих однотипних виробничих площ. Отримані результати дозволяють обґрунтувати вибір сучасної технології 3D-вимірювань залежно від вимог до точності та продуктивності, а також формують передумови для розробки комплексу рекомендацій щодо інвентаризації об'ємів блоків природного каменю у реальних виробничих умовах.

**Ключові слова:** блоки природного каменю; облицювальний камінь; визначення об'єму; 3D-вимірювання; дистанційне зондування; фотограмметрія; аерофотозйомка БПЛА; метод SfM/MVS; мобільне лазерне сканування; SLAM; LiDAR; 3D-модель; цифровізація кар'єрів.

**Актуальність теми.** Блочные кар'єри з видобування природного каменю (гранітів, габроїдів, лабрадоритів тощо) характеризуються досить специфічною технологічною та геолого-структурною спрямованістю, оскільки кінцевим продуктом є штучні об'єкти, досить великогабаритні монолітні блоки, які придатні для подальшого розкряку на сляби й готові вироби. На відміну від щелебневих кар'єрів, де домінує завдання інтенсивного руйнування гірничої маси, при блочному каменедобуванні визначальним є забезпечення максимальної цілісності масиву в межах проектних габаритів блоку (моноліту), мінімізація утворення тріщинуватості та збереження геометричної «товарності» сировини. Це зумовлює застосування відносно ошадливих технологій відокремлення моноліту (блоку) від природного масиву (алмазно-канатне різання, буріння з клиновими або гідроклиновими системами, розпірні методи, суцільне вибурування та інше), які мають на меті сформувати блок із заданими розмірами та максимально рівними гранями, не погіршуючи його структурної якості. Водночас фактичні параметри блочної сировини істотно залежать від природної тріщинуватості, наявності зон тектонічних порушень і вивітрювання, а також від орієнтації систем тріщин відносно напрямів різів чи відколів, що й визначає як прогнозований вихід блоків, так і їхню геометричну «правильність».

У реальних виробничих умовах блоки досить рідко відповідають ідеалізованій формі прямокутного паралелепіпеда: поширеними є клиноподібність, локальна хвилястість поверхонь, відхилення ребер від прямолінійності, сколи кутів і граней, косокутність, а також досить поширені приховані дефекти, що проявляються вже на етапі транспортування або первинної обробки. Через це визначення об'єму блоку набуває не лише облікового, а й технологічно-економічного значення, оскільки похибки у вимірах безпосередньо впливають на класифікацію товарних категорій, взаєморозрахунки між видобувним і каменеобробним підприємствами, планування складської логістики та, головне, на прогноз виходу корисної продукції (слябів чи готових виробів) і величину технологічних втрат. На практиці часто

співіснують дві метрики: габаритний (умовно «комерційний») об'єм, який швидко визначають за вимірними довжиною, шириною та висотою, та реальний об'єм, що повинен відображати фактичну тривимірну геометрію блока з урахуванням сколів, нерівностей і відхилень від прямокутності. Перший підхід забезпечує оперативність і прийнятний рівень узагальнення для первинного обліку в кар'єрі, однак за наявності дефектів може систематично завищувати або занижувати об'єм і не відображає «корисний» об'єм, доступний для розкרוю. Другий підхід є методично коректнішим для задач планування переробки, але потребує більш складних вимірювальних процедур та забезпечення метричної надійності результатів.

Додаткову складність вимірювання об'ємів у блочних кар'єрах формують умови виконання робіт: блоки часто розташовані на нерівній основі, частково заглиблені в ґрунт або забруднені шламом і пилом, складені щільно з взаємними перекриттями, що обмежує доступ до граней та унеможливує повний обмір у традиційний спосіб. У таких умовах ручні вимірювання (рулетка, рейки, шаблони) мають підвищену суб'єктивність через довільний вибір характерних точок і площин, а також схильні до систематичних похибок, зумовлених дефектністю контурів і неможливістю контролю прямокутності. Саме тому актуалізується застосування цифрових 3D-методів (UAV-фотограмметрія SfM/MVS, мобільне лазерне сканування на основі SLAM, LiDAR у смартфонах/планшетах), які потенційно дозволяють отримувати повну геометрію блока та сцени у вигляді хмар точок і 3D-моделей. Однак їхня практична реалізація вимагає забезпечення масштабу та прив'язки (опорні й контрольні точки), контролю якості побудови моделі й урахування специфічних джерел похибок: оклюзій у щільних складах, недостатньої текстурності та відблисків поверхні каменю для фотограмметрії, накопичення дрейфу при SLAM на більших ділянках, обмеженої дальності та точності споживчих LiDAR-сенсорів, а також алгоритмічних артефактів (розриви, хвильовість площин, «подвійні» ребра).

Таким чином, специфіка блочних кар'єрів і блочної сировини полягає у поєднанні високих вимог до збереження монолітності та геометричної придатності блока з ускладненими умовами інвентаризації, що зумовлює необхідність науково обґрунтованого вибору методів визначення об'ємів та встановлення їхніх меж застосовності в реальних виробничих умовах.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Актуальність розгляду сучасних методів 3D-вимірювань передусім зумовлена зростанням потреби гірничих підприємств у високоточному та оперативному отриманні просторової інформації для планування, контролю і безпечного ведення робіт. Традиційні геодезично-маркшейдерські методи, хоча й забезпечують нормативну точність, часто є досить трудомісткими та дещо обмеженими особливо в умовах складної геометрії гірничо-геологічних об'єктів, обмеженого доступу, високих уступів і підвищених виробничих ризиків. Натомість технології 3D-знімання (TLS, мобільне сканування SLAM, фотограмметрія БПЛА, LiDAR-сенсори) дають змогу формувати досить детальні цифрові моделі поверхні та необхідних об'єктів, максимально підвищувати повноту фіксації, зменшувати вплив людського фактору та суттєво скорочувати час польових робіт. Це створює передумови для інтеграції 3D-даних у цифрові виробничі процеси (ГІС, BIM/DM, системи планування гірничих робіт), що є ключовим чинником підвищення ефективності, точності обліку, якості інженерних рішень і рівня промислової безпеки.

У публікації [1], присвяченій методиці застосування SLAM-технології в топографічному картографуванні, автори обґрунтовують доцільність комбінованого підходу до виконання топографічної зйомки із використанням мобільного наземного лазерного сканування. Детально описано технологічну послідовність робіт – від збирання геопросторових даних SLAM-сканером до їх попереднього опрацювання та реєстрації хмари точок. Окрему увагу приділено аналізу чинників, що визначають якість результатів, зокрема впливу тривалості (безперервності) сесії сканування та наявності рухомих об'єктів у зоні знімання, які можуть спричинити суттєве зниження точності суміщення та появу так званих артефактів у хмарі точок.

Сама проблематика використання SLAM-технології у топографо-геодезичних роботах нині є досить актуальною, оскільки результати сучасних досліджень [2–4] підтверджують ефективність даного наземного мобільного способу отримання геопросторової інформації. Зокрема, у праці [2–3] представлено один із перших комплексних аналізів можливостей застосування SLAM для розв'язання топографічних завдань. Авторами наведено оцінку точності визначення планового та висотного положення точок хмари на рівні 3–5 см для ділянок площею до 2000 м<sup>2</sup> порівняно зі стаціонарним наземним лазерним скануванням (НЛС). У роботі також підтверджено високу прецизійність отриманих результатів.

У роботі [5], присвяченій застосуванню наземного лазерного сканування на базі SLAM-системи R100 в умовах відкритих гірничих виробок, наведено результати апробації технології на Кам'янобродському родовищі габро. На підставі оцінювання середньоквадратичних похибок визначення координат контрольних точок встановлено, що планова точність сформованої 3D-хмари становить близько 24 мм, а висотна – близько 20 мм. Отримані метрологічні показники свідчать про практичну придатність SLAM-сканування для знімальних робіт у кар'єрних умовах та підтверджують можливість формування деталізованих тривимірних моделей з достатнім рівнем геометричної достовірності для інженерних задач.

У науковій праці [6] наведено результати теоретичного аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду застосування цифрових підходів у гірничій галузі. На підставі узагальнення літературних даних авторами обґрунтовано актуальність і доцільність розроблення та виробничого впровадження цифрових технологій для підвищення ефективності розв'язання задач маркшейдерського забезпечення гірничих робіт, зокрема в частині оперативності отримання просторової інформації, точності вимірювань та якості геодезично-маркшейдерських даних.

У роботах [7, 8] продемонстровано потенціал застосування СМЛС Stonex 120GO на різних типах об'єктів і в різних умовах експлуатації. Водночас зазначені дослідження переважно мають описово-прикладний характер і не містять системної метрологічної оцінки, зокрема не розглядають питання кількісного визначення точності вимірювань та оцінювання похибок позиціонування (просторового положення) при виконанні знімачів.

А вже в роботі [9] основну увагу акцентовано на оцінюванні точності лазерного сканера Stonex X120GO та визначенні перспектив його застосування для топографічного знімання, розв'язання інженерних задач і формування достовірних 3D-моделей об'єктів різної складності.

В роботі [10] проаналізовано основні питання та проблематика високоточного визначення геометричних параметрів товарних блоків природного каменю, що має вирішальне значення для визначення їх ринкової вартості, оптимізації процесу оперативного обліку та раціонального використання природного каменю у гірничодобувній промисловості.

Аналіз публікацій свідчить, що дослідження, які орієнтовані саме на специфічні умови блочних кар'єрів, представлені тільки поодинокими роботами і мають досить фрагментарний характер. Зокрема, недостатньо висвітлені питання точності визначення об'ємів блочної сировини в умовах складського майданчика кар'єру по видобуванню блочного природного каменю.

**Метою дослідження** є експериментально-метрологічне порівняння трьох основних сучасних підходів до отримання щільних тривимірних хмар точок, придатних для геометричного обліку об'єктів у виробничих умовах: аерофотограмметрії з використанням БПЛА (UAV, SfM/MVS), мобільного лазерного сканування на основі SLAM-алгоритмів та наземної фотограмметрії, виконаної за допомогою смартфона з LiDAR. Дослідження спрямоване на встановлення точнісних і технологічних характеристик кожного методу, а також на оцінювання їхньої придатності для задач інвентаризації та параметризації множини об'єктів у межах однієї сцени.

**Ключові завдання.** Ключовим та головним завданням роботи є визначення ефективності зазначених методів під час знімання майданчика середніх розмірів  $22 \times 17$  м зі складною просторовою структурою, що містить 57 гранітних блоків (рис. 1). Ефективність у даному контексті розглядається як сукупність показників: точність і відтворюваність геометричної реконструкції, повнота (щільність і безперервність) хмари точок, оперативність польових робіт та камеральної обробки, а також стійкість результатів до типових виробничих чинників (взаємні перекриття об'єктів, неоднорідне освітлення, низька текстурність поверхонь, пил/волога, обмеження траєкторій знімання).

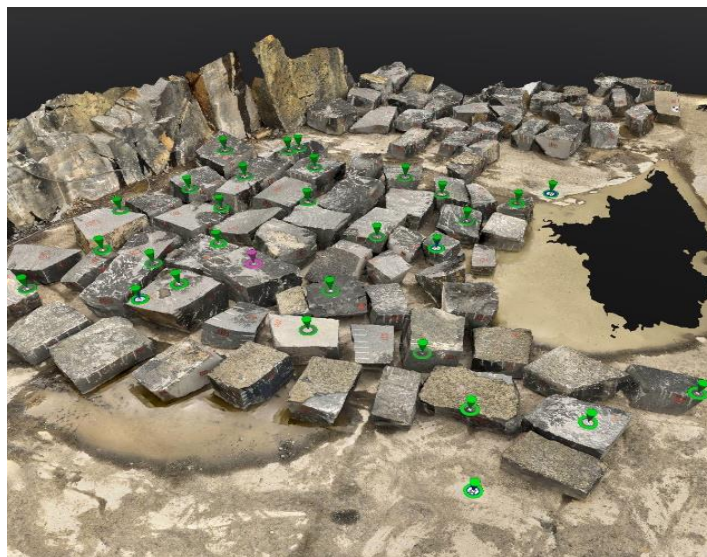


Рис. 1. План-схема розміщення опорних та контрольних точок на експериментальному майданчику

Окремим науково-практичним завданням є виявлення та пояснення причин появи геометричних артефактів (викидів) і спотворень моделі, характерних для застосування непрофесійного або

напівпрофесійного вимірювального обладнання. До таких артефактів належать: локальні деформації поверхонь, розриви (зміщення) фрагментів моделі, «подвійні» контури, хвилювість площин, систематичні зсуви масштабу та похибки прив'язки. Їхній аналіз передбачає встановлення зв'язку між спотвореннями і чинниками знімання та обробки, зокрема: якістю перекриття знімків і геометрією мережі, помилками калібрування / орієнтування камер, накопиченням дрейфу SLAM, недостатньою кількістю опорних / контрольних точок, особливостями відбивних властивостей каменю та параметрами фільтрації (щільності) хмар точок.

Таким чином, робота має на меті не лише порівняти три методи за інтегральними показниками, а й сформувані обґрунтовані рекомендації щодо їх застосування для інвентаризації блоків на майданчиках реального масштабу, із визначенням меж доцільності, типових помилок і шляхів підвищення достовірності 3D-реконструкції.

**Викладення основного матеріалу.** У системі «видобування – переробка» природного блочного каменю виникає методичне протиріччя: з однієї сторони на каменедобувних підприємствах домінує потреба у швидкому польовому визначенні об'єму блоків із використанням спрощених (стандартних) геометричних моделей та при потенційній наявності допустимих похибок вимірювань, тоді як каменеобробні підприємства потребують кардинально протилежного підходу – високоточного, відтвореного й цифрово підтвердженого обчислення реального об'єму та форми блока з метою прогнозування можливого виходу слябів і для оптимізації процесу розкрою. Це й зумовлює розбіжності у взаєморозрахунках, класифікації самих блоків та оцінці технологічних втрат, особливо за наявності сколів, клиноподібності, косокутності, неправильної форми та нерівності граней.

Для каменеобробних підприємств високоточний облік і параметризація гранітних блоків є ключовою виробничо-економічною задачею, оскільки їхні геометричні характеристики (довжина, ширина, висота, об'єм, площі граней, відхилення від прямокутності) безпосередньо визначають вихід товарної продукції – насамперед слябів, а також рівень технологічних втрат під час розкрою та шліфування. Будь-які похибки на етапі вимірювань трансформуються у помилки планування: некоректне формування виробничих партій, хибне прогнозування виходу, завищення чи заниження складських залишків і, як наслідок, фінансові ризики.

Разом із тим, традиційні обмірні технології (рулетка, рейки, шаблони, ручні заміри з подальшими розрахунками) мають низку принципів обмежень: вони є трудомісткими, залежать від кваліфікації виконавця та умов виконання робіт, а також характеризуються суб'єктивністю у виборі характерних точок і площин вимірювання, особливо для блоків з нерівними поверхнями, фасками, сколами та слідами буровибухового чи канатного різання. Крім того, такі підходи практично не забезпечують цифрового простежування (traceability) та повторюваності, що ускладнює інтеграцію результатів у сучасні системи управління виробництвом і складською логістикою.

На цьому тлі спостерігається зростання інтересу до цифрових методів 3D-вимірювань і створення хмар точок як первинної вимірювальної інформації. На ринку активно поширюються відносно доступні рішення на базі споживчих пристроїв (смартфонів чи планшетів із LiDAR), портативних SLAM-сканерів, а також БПЛА з фотограмметричною обробкою (SfM/MVS) для оперативного формування просторових моделей. Потенційними перевагами цих технологій є висока швидкість знімання, автоматизація обробки, можливість отримання повної геометрії об'єкта, а також цифрова форма результатів, придатна для подальшої аналітики (об'ємні розрахунки, контроль форми, порівняння з еталоном, моніторинг у часі).

Водночас межі застосовності перелічених підходів залишаються недостатньо обґрунтованими, особливо в умовах масштабування від вимірювання одиничних блоків до інвентаризації складів і виробничих майданчиків із великою кількістю об'єктів, складною геометрією сцен, взаємними перекриттями та неоднорідними умовами освітлення/поверхні. Практично важливими є питання: забезпечення метричності (наявність і роль контрольних точок), вплив дальності та кута сканування, стабільність SLAM у великих просторах, накопичення дрейфу, вплив текстурності та відбивної здатності порід, надійність сегментації блоків у щільній складській забудові, а також відтворюваність результатів при повторних зніманнях.

Тому в даній роботі було здійснено системне дослідження точності, продуктивності та технологічних обмежень використання смартфонних LiDAR-сенсорів, портативних SLAM-сканерів і БПЛА-фотограмметрії для обліку гранітних блоків у реальних виробничих умовах, з формуванням рекомендацій щодо доцільних сценаріїв застосування, вимог до польового забезпечення та критеріїв контролю якості отриманих 3D-моделей.

Методологія збору первинних даних передбачала реалізацію трьох основних польових сценаріїв 3D-знімання, що були орієнтовані на отримання базової геометричної інформації про видобуті блоки природного каменю в умовах виробничого майданчика (так званого складу блочної сировини), з подальшим порівнянням часової ефективності (затраченого часу) та якості результатів (порівняння точності).

**1 сценарій.** У межах UAV-методу (на основі використання DJI Mavic 3 Enterprise) аерофотознімання виконували у ручному режимі на наднизькій висоті 6,5 м, що дозволяло підвищити деталізацію об'єктів і

зменшити втрати точності, характерні для знімання з більших висот (рис. 2). Для коректнішого відображення вертикальних граней блоків та зниження впливу взаємних перекриттів у вузьких проходах між блоками камера встановлювалась із нахилом близько  $45^\circ$ . Така геометрія знімання спрямована на мінімізацію «мертвих зон» і підвищення повноти реконструкції в ділянках із різкими перепадами висот та обмеженою видимістю.

**2 сценарій.** Для SLAM-методу (на основі використання Xgrid L1 / Alfageo R100) мобільне лазерне сканування виконували за траєкторією обходу периметру майданчика та проходів між рядами блоків, що забезпечувало багаторазове знімання та спостереження поверхонь з різних ракурсів і зменшувало ризик локальних прогалів (так званих викидів) у даних (рис. 3). Тривалість польового збору даних склала 6 хвилин, що характеризує метод як найбільш оперативний у частині отримання первинної інформації за рахунок безперервного сканування та автоматизованої побудови траєкторії.



Рис. 2. Маршрут польоту БПЛА DJI Mavic 3 Enterprise під час реалізації UAV-знімання (ручний режим керування дрону)



Рис. 3. Маршрут сканування на дослідному майданчику при застосуванні SLAM-сканера (Xgrid L1 / Alfageo R100)

**3 сценарій.** У випадку смартфонної фотограмметрії (на основі використання iPhone 13 Pro + Pix4Dcatch) знімання проводили у наземному режимі з акцентом на щільне перекриття та послідовний обхід об'єктів, а формування фотограмметричного набору даних здійснювали із застосуванням програмного забезпечення Pix4Dcatch (рис. 4). Цей підхід є технологічно доступним, однак чутливим до умов освітлення, текстурності поверхні та стабільності геометрії знімальної мережі, що суттєво впливає на стійкість розв'язання орієнтування та якість 3D-реконструкції.

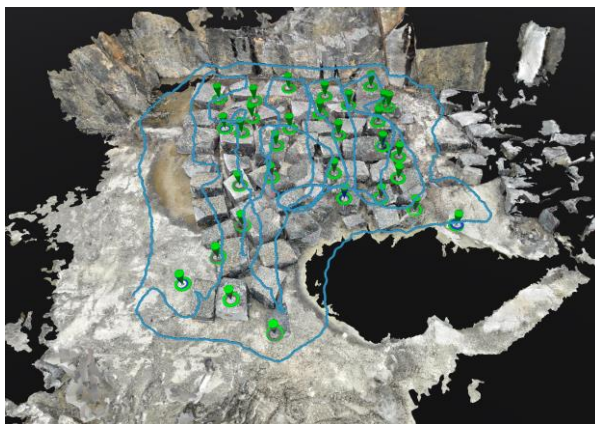


Рис. 4. Маршрут (траєкторія) знімання під час смартфонної фотограмметрії (iPhone 13 Pro, Pix4Dcatch)

Камеральну обробку даних фотограмметричних методів виконували в Pix4DMatic, тоді як дані SLAM-сканування опрацьовували у Lixel Studio. За результатами камерального етапу здійснено порівняльний аналіз часових витрат та метричної якості отриманих результатів (за показниками RMSE). UAV-метод продемонстрував найвищу стабільність і найкращу узгодженість реконструкції, із середньоквадратичною похибкою  $RMSE \approx 6$  мм, однак вимагав значних обчислювальних ресурсів і часу: 77 хвилин на обробку 488 знімків. SLAM-метод, навпаки, забезпечив максимальну оперативність камерального етапу (близько 40 хвилин), при цьому отримані точнісні характеристики мали виражену анізотропію: RMSE у плані – 19 мм, RMSE за висотою – 5 мм, що є типовим для мобільних SLAM-рішень і пояснюється впливом траєкторних

похибок, геометрії проходів і накопиченням дрейфу в горизонтальній площині. Загалом, наведені результати вказують на наявність чіткої компромісної залежності між точністю та продуктивністю: UAV-знімання забезпечує найвищу метричну надійність за рахунок великого обсягу вихідних спостережень і складнішої обробки, тоді як SLAM-сканування є пріоритетним у задачах швидкої інвентаризації, хоча може потребувати додаткових заходів контролю/корекції для підвищення планової точності.

В ході обробки й візуалізації даних вимірювань було одержано комплекс моделей, які відображають зміни похибок вимірювання як по площі так й в просторі ділянки, що досліджувалась (рис. 5–9). Подібні моделі були одержані для всіх трьох сценаріїв вимірювання

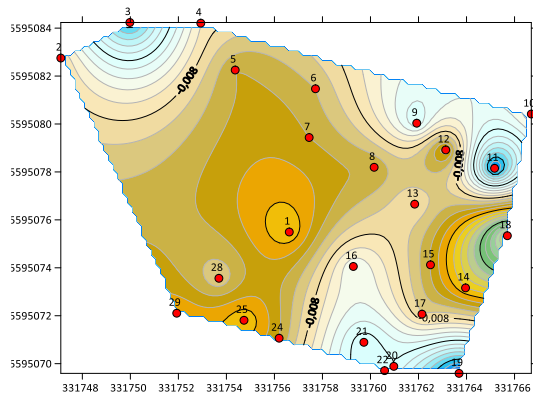


Рис. 5. Зміна похибки вимірювання  $D_x$  по площі ділянки, що досліджувалась при застосуванні SLAM-сканера (Xgrid L1 / Alfageo R100), мм

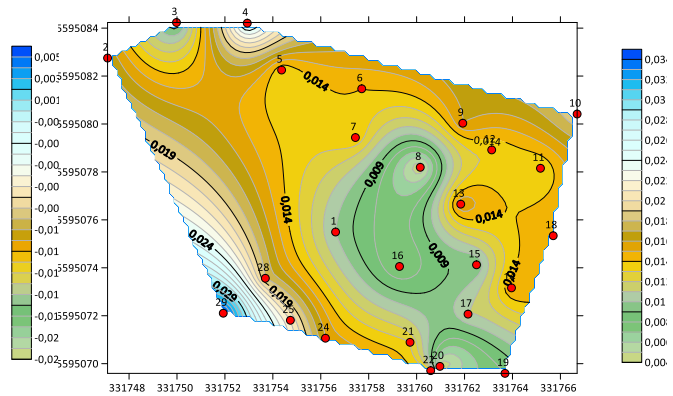


Рис. 6. Зміна похибки вимірювання  $D_y$  по площі ділянки, що досліджувалась при застосуванні SLAM-сканера (Xgrid L1 / Alfageo R100), мм

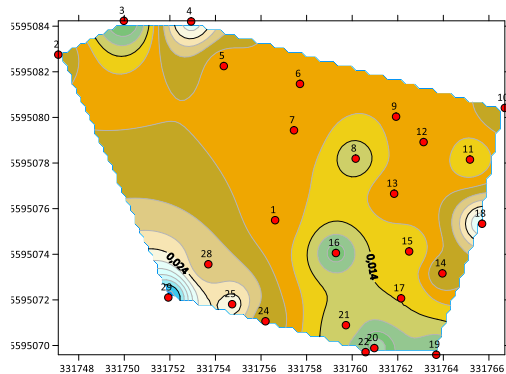


Рис. 7. Зміна похибки вимірювання  $D_{xy}$  по площі ділянки, що досліджувалась при застосуванні SLAM-сканера (Xgrid L1 / Alfageo R100), мм

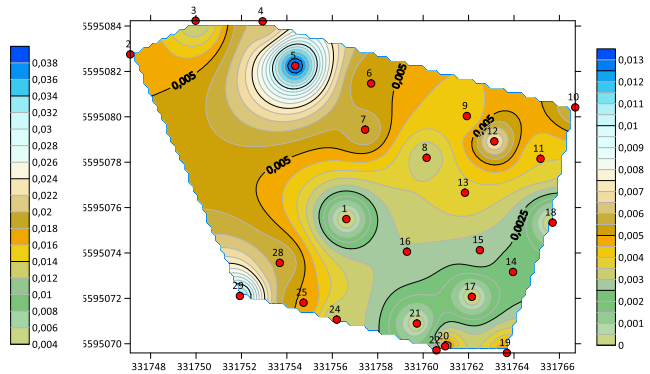


Рис. 8. Зміна похибки вимірювання  $D_h$  по площі ділянки, що досліджувалась при застосуванні SLAM-сканера (Xgrid L1 / Alfageo R100), мм

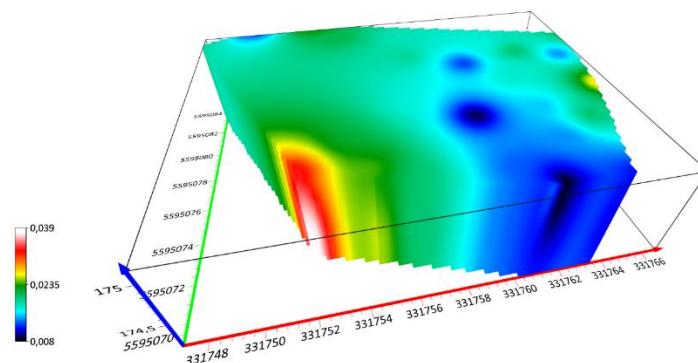


Рис. 9. Зміна загальної похибки вимірювання в просторі ділянки, що досліджувалась при застосуванні SLAM-сканера (Xgrid L1 / Alfageo R100), мм

Узагальнені дані після статистичної обробки даних та аналізу всієї сукупності моделей, що до точності вимірювання часових витрат та обсягів інформації, наведено у таблиці 1.

## Узагальнені дані вимірювань

Параметр	SLAM (Xgrid L1)	БПЛА (Mavic 3E)	Смартфон (iPhone 13 Pro)
Час польових робіт	6 хв	8 хв	9 хв
Час камеральної обробки	40 хв	77 хв	359 хв
Кількість вихідних файлів	1 файл (хмара)	488 фото	2196 фото
Масштаб обробки зображень	–	1/2 (оптимально)	1 (повнорозмірні фото)
RMSE (План)	19 мм	7 мм	42мм
RMSE (Висота)	5 мм	6 мм	12 мм

Особливу увагу в межах експерименту було приділено сценарію, що базується на використанні смартфона як вимірювального засобу для наземної фотограмметрії. На попередніх етапах досліджень, виконаних на майданчику малого масштабу (7×13 м; 9 блоків), цей підхід забезпечував стабільну реконструкцію з високими показниками точності та без проявів суттєвих геометричних артефактів. Однак під час переходу до поточного об'єкта, де площа знімання зросла приблизно у 4 рази, а кількість блоків – у 6 разів, було зафіксовано появу критичних похибок і деградацію якості результату, що вказує на обмеження масштабованості даного рішення в умовах складної виробничої сцени.

Однією з імовірних причин погіршення є апаратна специфіка камер смартфонів, зокрема застосування ковзного затвора. За наявності руху камери під час знімання цей механізм формує кадр послідовним читуванням рядків матриці, що призводить до мікродеформацій геометрії в кожному зображенні. На невеликих об'єктах такі спотворення можуть частково компенсуватися алгоритмами вирівнювання, однак при обробці великих наборів даних вони накопичуються і ускладнюють коректне визначення зовнішнього орієнтування, особливо за умов неоднорідної текстурності поверхонь, взаємних перекриттів об'єктів та повторюваності структур (ряди блоків з подібними гранями).

У даному експерименті програмне забезпечення не змогло надійно виконати фотограмметричне вирівнювання масиву з 2196 знімків, що спричинило формування типових для некоректної побудови знімальної мережі артефактів: «подвоєння площин» (паралельне відтворення однієї й тієї самої поверхні у двох близьких положеннях), локальні розриви моделі, а також зростання рівня шуму у хмарі точок і погіршення відтворення ребер та кутів блоків. Сукупність цих ознак свідчить не про випадкову похибку, а про системну нестійкість розв'язання при масштабуванні сцени та збільшенні обсягу даних, коли невеликі похибки кадрів і слабкі геометричні зв'язки між серіями знімків призводять до неправильного «склеювання» фрагментів реконструкції.

Отримані результати обґрунтовують необхідність подальших досліджень, спрямованих на встановлення критичних меж масштабування смартфонної фотограмметрії для задач інвентаризації блоків, визначення оптимальних параметрів знімання (траєкторія, швидкість руху, перекриття, кількість ракурсів, контроль експозиції), підсилення геометричної стійкості знімальної мережі за рахунок опорних/контрольних точок, а також оцінювання ефективності алгоритмічних підходів, що враховують rolling shutter (або мінімізують його вплив). З практичної точки зору це дозволить сформувати методичні рекомендації щодо умов, за яких смартфонні рішення можуть забезпечувати прийнятну метричну якість, і визначити сценарії, де доцільніше застосовувати UAV чи SLAM-технології.

Для детального аналізу геометричних деформацій виконано порівняння хмар точок у середовищі CloudCompare (алгоритм Cloud-to-Cloud), де за еталон прийнято модель з БПЛА. Обрано два характерні блоки (рис. 10–11).

За результатами порівняння хмар точок, отриманих за допомогою iPhone, встановлено, що для Блоку № 1 переважна частина точок має відхилення 0–10 мм, що свідчить про достатню відтворюваність геометрії об'єкта за сприятливих умов знімання та коротких дистанцій. Натомість для Блоку №2 спостерігається більш рівномірний розподіл похибок із концентрацією в інтервалах 0–30 мм і 30–50 мм, що вказує на наявність геометричного шуму і розшарування поверхонь. Такий ефект обґрунтовано пов'язати з накопиченням похибок траєкторії у процесі мобільного сканування, зокрема при збільшенні дистанції до об'єкта та погіршенні умов роботи візуально-інерціальної навігації.

Для хмари точок, сформованої методом SLAM, зафіксовано систематичний зсув в межах 0,5–1,5 см, який є допустимим для задач складського обліку (інвентаризація, контроль габаритів, наближена оцінка об'ємів блоків). Його можна пояснити особливостями SLAM-алгоритмів та апаратури, зокрема нижчою просторовою роздільною здатністю лазерного сенсора й специфікою вирівнювання траєкторії, тоді як фотограмметричні підходи (iPhone) потенційно забезпечують вищу деталізацію, але є більш чутливими до дрейфу на протяжних маршрутах.

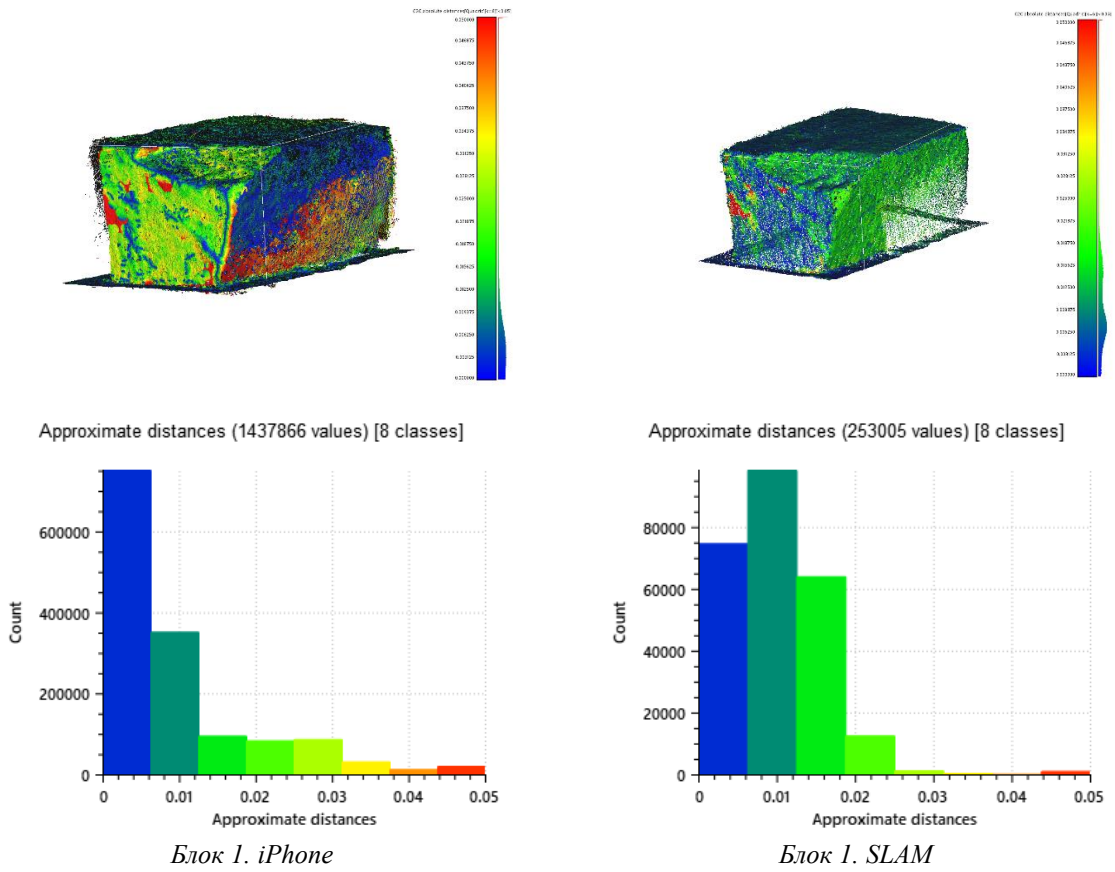


Рис. 10. Розподілу відхилень (C2C distance) для Блоку № 1

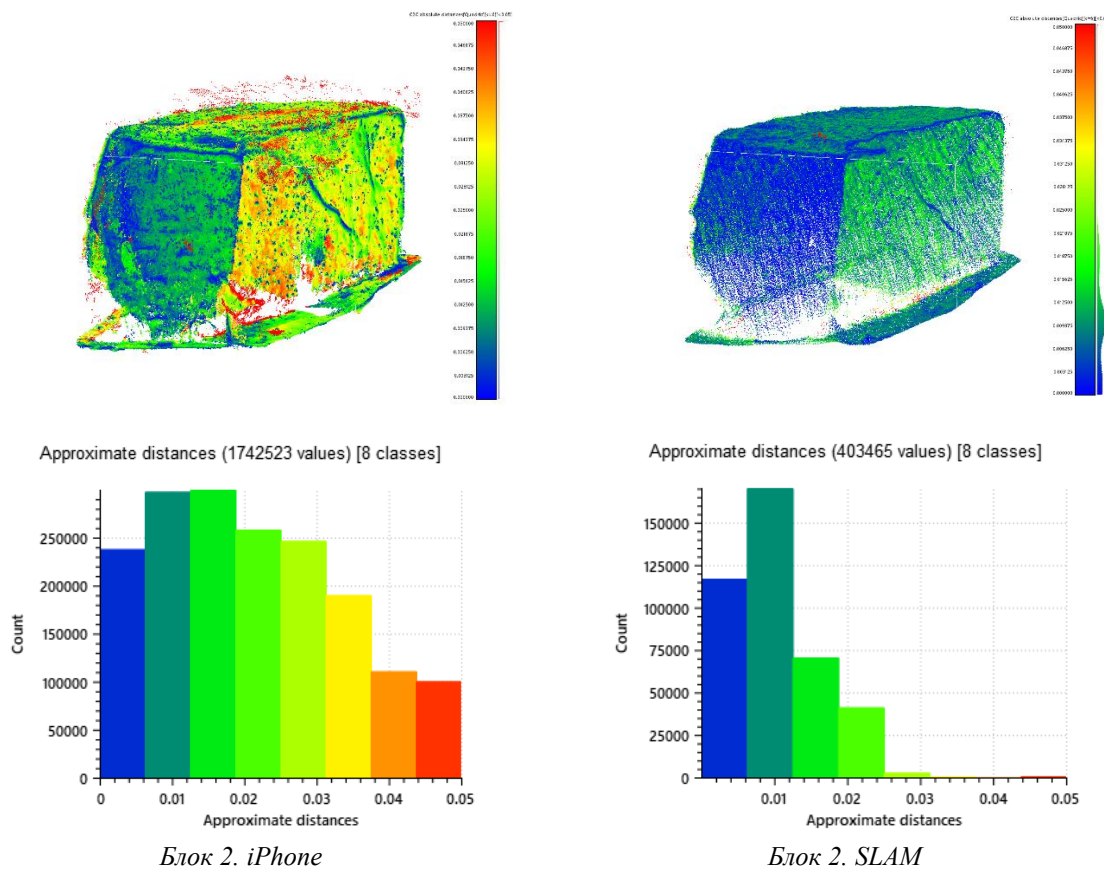


Рис. 11. Розподілу відхилень (C2C distance) для Блоку № 2

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Метод аерофотограмметрії з використанням БПЛА у сучасних умовах залишається одним із найбільш точних і відтворюваних підходів для інвентаризації складів блочної сировини, оскільки забезпечує високу деталізацію та стабільність метричних параметрів 3D-реконструкції за умови коректно сформованої знімальної мережі. Виконання знімання з малих висот (близько 6,5 м) у поєднанні з нахилом камери 35–45° є методично обґрунтованим, оскільки покращує видимість вертикальних граней блоків, підвищує повноту покриття та зменшує кількість зон, недоступних для спостереження («сліпих» зон) у вузьких проходах і при взаємних перекриттях об'єктів. Водночас суттєвими обмеженнями UAV-підходу є залежність результатів від метеорологічних умов (вітер, опади, освітленість), регуляторні вимоги щодо дозвільних процедур та обмежень польотів, а також наявність рослинності або сторонніх перешкод на майданчику, що ускладнюють сегментацію об'єктів і можуть спричинити локальні прогалини даних.

Метод мобільного лазерного сканування на основі SLAM доцільно розглядати як оптимальне рішення для оперативного моніторингу та швидкої інвентаризації, оскільки він характеризується мінімальними вимогами до підготовки робіт, високою продуктивністю польового етапу та відносно коротким часом камеральної обробки. Сумарні витрати часу на збір і опрацювання даних, що не перевищують приблизно однієї години (близько 46 хв), роблять SLAM-підхід технологічно привабливим для регулярних облікових операцій на складі. Досягнутий рівень точності порядку 1–2 см у більшості виробничих сценаріїв є достатнім для ідентифікації блоків, контролю їхнього взаємного положення та обчислення об'ємів із прийнятною для оперативного обліку похибкою. Разом із тим, при використанні SLAM необхідно враховувати можливість накопичення траєкторних похибок (дрейфу) та залежність якості від геометрії проходу, кількості замикань траєкторії, наявності характерних ознак сцени і стабільності алгоритмів зіставлення.

Підхід, що базується на смартфонній фотограмметрії (iPhone), демонструє чітко виражені обмеження масштабованості та, попри технологічну доступність, потребує чіткого визначення меж застосування. У межах невеликих ділянок (орієнтовно до 10–15 блоків або площі приблизно до 100 м<sup>2</sup>) він може бути ефективним інструментом первинного обміру, який здатен застосовувати користувач без спеціалізованої підготовки, за умови забезпечення достатнього перекриття та стабільної траєкторії знімання. Однак при переході вже до площ понад 300 м<sup>2</sup>, особливо для ділянок із однотипною текстурою (типовий гранітний чи габровий масив) та геометричними структурами, які повторюються (ряди блоків), зростає ризик накопичення помилок орієнтування й некоректного «склеювання» фрагментів моделі. Це проявляється у втраті цілісності реконструкції, появі подвійних поверхонь («подвійних стінок»), локальних розривів та підвищеного шуму, що критично знижує придатність результатів для метричного аналізу та надійного визначення об'ємів. Додатковим чинником є апаратна особливість камер смартфонів (rolling shutter), яка за руху під час знімання може спричинити мікродеформації кадрів і, відповідно, погіршувати стійкість вирівнювання на великих наборах даних.

Для всіх розглянутих методів важливою технологічною передумовою отримання повних і коректних моделей є забезпечення доступності огляду поверхонь блоків. Практично це означає, що відстань між блоками повинна становити не менше 0,5–0,6 м, що забезпечує можливість формування достатньої кількості ракурсів, зменшує ефекти оклюзії та сприяє побудові неперервної 3D-моделі без критичних прогалин. У випадках щільнішого складування доцільно передбачати або спеціальні траєкторії знімання / сканування, або комбінування методів (наприклад, SLAM для оперативного обліку та UAV для високоточного контрольованого знімання).

#### Список використаної літератури:

1. Методика застосування slam-технології у топографічному картографуванні / Д.О. Кінь, Н.Ю. Лазоренко, Ю.О. Карпінський та ін. // Геодезія та землевпорядкування. – 2025. – С. 610–626. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.15.610-626.
2. Sammartano G. Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition / G.Sammartano, A.Spanò // Applied geomatics. – 2018. – Vol. 10 (4). – P. 317–339. DOI: 10.1007/s12518-018-0221-7.
3. A Comparative Study of Indoor Accuracies Between SLAM and Static Scanners / A.Chrbolková, M.Štroner, R.Urban and other // Applied Sciences. – 2025. DOI: 10.3390/app15148053.
4. The handheld mobile laser scanners as a tool for accurate positioning under forest canopy / J.Chudá, M.Hunčaga, J.Tuček, M.Mokroš // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2020. – Vol. 43. – P. 211–218. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-211-2020.
5. Застосування наземного лазерного сканування (SLAM R100) в умовах відкритих гірничих виробок / В.Котенко, Л.Дорош, В.Ковтун та ін. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2025. – Вип. II (50). – С. 135–143. DOI: 10.33841/1819-1339-2-50-135-143.
6. Долгіх Л.В. Використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок / Л.В. Долгіх, С.В. Діхтяр, А.О. Томашевська // Вісник Криворізького національного університету. – 2021. – Вип. 52. – С. 85–89. DOI: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-85-90.

7. Digitization approaches for urban cultural heritage: last generation mms within venice outdoor scenarios / *A.Martino, E.Breggion, C.Balletti and other* // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2023. – Vol. 48. – P. 265–272.
8. *Tanduo B.* Documentation of complex environments in cultural heritage sites. a slam-based survey in the castello del valentino basement / *B.Tanduo, L.Teppati Losè, F.Chiabrando* // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2023. – Vol. 48. – P. 489–496.
9. Дослідження мобільної системи лазерного сканування STONEX X120GO / *А.Виват, О.Горб, С.Пашкевич та ін.* // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2023. – Вип. 2 (46). – С. 28–35 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sdgn\\_2023\\_2\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sdgn_2023_2_7).
10. Автоматизація визначення геометричних параметрів блоків природного каменю на основі фотограмметричного аналізу за допомогою viDoc RTK Rover / *В.В. Котенко, М.А. Скорик, О.М. Гнітецький, І.А. Піскун* // *МІНЕРАЛЬНІ РЕСУРСИ УКРАЇНИ*. – 2026. – № 1. – С. 59–65. DOI: 10.31996/mru.2026.1.59-65.

#### References:

1. Kin, D.O., Lazorenko, N.Yu., Karpinskyi, Yu.O. et al. (2025), «Metodyka zastosuvannya slam-tekhnologii u topohrafichnomu kartohrafuvanni», *Heodeziia ta zemlevporiadkuvannya*, pp. 610–62, doi: 10.32347/2786-7269.2025.15.610-626.
2. Sammartano, G. and Spanò, A. (2018), «Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition», *Applied geomatics*, Vol. 10 (4), pp. 317–339, doi: 10.1007/s12518-018-0221-7.
3. Chrbolková, A., Štroner, M., Urban, R. et al. (2025), «A Comparative Study of Indoor Accuracies Between SLAM and Static Scanners», *Applied Sciences*, doi: 10.3390/app15148053.
4. Chudá, J., Hunčaga, M., Tuček, J. and Mokoš, M. (2020), «The handheld mobile laser scanners as a tool for accurate positioning under forest canopy», *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 43, pp. 211–218, doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-211-2020.
5. Kotenko, V., Dorosh, L., Kovtun, V. et al. (2025), «Zastosuvannya nazemnoho lazernoho skanuvannya (SLAM R100) v umovakh vidkrytykh hirnychkykh vyrobok», *Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Issue II (50), pp. 135–143, doi: 10.33841/1819-1339-2-50-135-143.
6. Dolhikh, L.V., Dikhtiar, S.V. and Tomashevskaya, A.O. (2021), «Vykorystannia metodiv tsyfrovoyi fotohrammetrii v umovakh pidzemnykh hirnychkykh vyrobok», *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, Issue 52, pp. 85–89, doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-85-90.
7. Martino, A., Breggion, E., Balletti, C. et al. (2023), «Digitization approaches for urban cultural heritage: last generation mms within venice outdoor scenarios», *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 48, pp. 265–272.
8. Tanduo, B., Teppati Losè, L. and Chiabrando, F. (2023), «Documentation of complex environments in cultural heritage sites. a slam-based survey in the castello del valentino basement», *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 48, pp. 489–496.
9. Vivat, A., Horb, O., Pashkevych, Ye. et al. (2023), «Doslidzhennia mobilnoi systemy lazernoho skanuvannya STONEX X120GO», *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Issue 2 (46), pp. 28–35, [Online], available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sdgn\\_2023\\_2\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sdgn_2023_2_7)
10. Kotenko, V.V., Skoryk, M.A., Hnitetskyi, O.M. and Piskun, I.A. (2026) «Avtomatyzatsiia vyznachennia heometrychnykh parametriv bloків pryrodnoho kameniu na osnovi fotohrammetrychnoho analizu za dopomohoiu viDoc RTK Rover», *MINERALNI RESURSY UKRAINY*, No. 1, pp. 59–65, doi: 10.31996/mru.2026.1.59-65.

**Скорик** Микола Анатолійович – аспірант, 3 курс, PhD-184-23-2 кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0008-0354-7593>.

Наукові інтереси:

- інноваційні технології в гірництві;
- дистанційне зондування землі;
- моніторинг та моделювання гірничих виробок.

E-mail: [phd184232\\_sma@student.ztu.edu.ua](mailto:phd184232_sma@student.ztu.edu.ua).

**Гнітецький** Олександр Миколайович – аспірант, 3 курс, PhD-184-23-2 кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0009-9806-6924>.

Наукові інтереси:

- вимірювання параметрів з використання безпілотних літальних апаратів;
- вимірювання параметрів з використання GPS;
- створення цифрових моделей поверхні.

E-mail: [phd184231\\_gom@student.ztu.edu.ua](mailto:phd184231_gom@student.ztu.edu.ua).

Skoryk M.A., Hnitskyi O.M.

**Methodological principles for selecting 3D measurement technology to determine the volume of natural stone blocks**

This article presents the main results of an experimental comparison of modern remote sensing technologies for determining the volumes of natural facing stone blocks in a quarry storage yard. The aim of the study is to evaluate the accuracy, time efficiency, and technological limitations of three main modern approaches: aerial photogrammetry using UAVs (UAV, SfM/MVS), mobile laser scanning based on SLAM, and ground-based photogrammetry using a smartphone. The tests were conducted on a 22×17 m site containing 57 blocks, using reference and control points for metric registration and quality control. Photogrammetric data processing was performed using Pix4DMatic, and SLAM data processing using Lixel Studio; the accuracy of the results was evaluated using RMSE metrics.

Analysis of the measurement data revealed that UAV imaging from a low altitude (6.5 m) with a camera tilt angle of 35–45° provides the highest positional accuracy (RMSE ≈ 6 mm), but is characterized by the highest processing time (77 min to process 488 images) and is significantly dependent on both weather and regulatory constraints. The SLAM method demonstrated the best operational efficiency (a total of approximately 46 minutes for data collection and processing), while achieving sufficient accuracy for inventory purposes (RMSE of 19 mm in plan view and 5 mm in height), making its use promising for both periodic and regular monitoring of bulk material stockpiles. Photogrammetry using smartphones (iPhone 13 Pro + Pix4Dcatch) showed limited scalability: as the area and number of objects increased (up to 2,196 images), so-called «plane duplication» artifacts and increased noise were observed, which significantly reduces the method's suitability for large, homogeneous production areas. The results obtained justify the selection of modern 3D measurement technology based on accuracy and performance requirements, and lay the groundwork for developing a set of recommendations for inventorying natural stone block volumes under real-world production conditions.

**Keywords:** natural stone blocks; facing stone; volume determination; 3D measurement; remote sensing; photogrammetry; UAV aerial photography; SfM/MVS method; mobile laser scanning; SLAM; LiDAR; 3D model; quarry digitization.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2026.