
МОБІЛЬНИЙ LiDAR, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КРАУДСОРСИНГ У ФІКСАЦІЇ Й ЗБЕРЕЖЕННІ ОБ'ЄКТІВ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

А. О. КОШЕЛЬ,

доктор економічних наук, доцент

E-mail: koshel_a@nubip.edu.ua

доцент кафедри геоінформатики і аерокосмічних досліджень Землі

І. Г. КОЛГАНОВА,

кандидат економічних наук, доцент

старший викладач кафедри землевпорядного проектування

E-mail: kolganova_i@nubip.edu.ua

А. М. ПОЛТАВЕЦЬ,

доктор економічних наук,

доцент кафедри геоінформатики і аерокосмічних досліджень Землі

E-mail: anatoliy.poltavets@nubip.edu.ua

В. О. ЮХИМЮК,

магістр 2 року навчання,

магістр кафедри геоінформатики і аерокосмічних досліджень Землі

E-mail: vladislavuhimuk@gmail.com

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. У статті обґрунтовано інтегроване використання LiDAR-технологій, геоінформаційних систем (ГІС) та краудсорсингових підходів для виявлення, фіксації й моніторингу об'єктів історико-культурної спадщини в межах територіальних громад. Наголошено, що в умовах воєнних дій, урбанізаційного тиску та територіальних трансформацій культурна спадщина розглядається як важливий ресурс сталого розвитку згідно з підходами ЮНЕСКО та Політики сталого розвитку Всесвітньої спадщини (2015 р.).

Показано, що сучасні LiDAR-системи, включно з вбудованими у смартфони сенсорами, забезпечують отримання щільних хмар точок і тривимірних моделей об'єктів з точністю, достатньою для вирішення значної частини завдань документування та оперативного моніторингу, хоча й поступаються високоточним наземним й аеролазерним сканерам. Особлива увага приділена гіпотезі щодо можливості створення 3D-моделей об'єктів культурної спадщини за допомогою поширених моделей смартфонів із вбудованим LiDAR-сенсором та оцінці точності вимірювань таких моделей.

Для апробації підходу виконано польове сканування гідрологічної пам'ятки природи місцевого значення «Природне джерело» в межах Шпанівської територіальної громади Рівненської області за допомогою смартфона з LiDAR-модулем. Оброблення хмар точок у програмному забезпеченні Polycam, AutoCAD, PIX4D, 3ds Max і Blender дало змогу побудувати 3D-модель споруди й оцінити відносну похибку вимірювання лінійних розмірів. Для еталонної ділянки довжиною 210 см відносна похибка вимірювання становила 2,04 %, що узгоджується з результатами міжнародних досліджень точності мобільних LiDAR-сенсорів, які демонструють міліметрово-сантиметрову точність для малих об'єктів та сантиметрово-дециметрові похибки у складному середовищі.

Проаналізовано технічні обмеження мобільного LiDAR (обмежена дальність сканування, зниження щільності та точності з відстанню, чутливість до властивостей поверхні, вплив траєкторії сканування оператора, необхідність контрольних вимірювань) та показано перспективи їхнього застосування для масового краудсорсингового збору даних про об'єкти спадщини. На основі аналізу досвіду геокраудсорсингу обґрунтовано, що поєднання поширеності смартфонів, мобільних LiDAR-сенсорів і веб-ГІС створює передумови для формування розподілених інформаційних систем обліку, моніторингу та попереднього оцінювання стану пам'яток на рівні територіальних громад за умови впровадження процедур стандартизації й контролю якості даних.

Ключові слова: геоінформаційні технології, Lidar, об'єднана територіальна громада, історико-культурна спадщина, сталий розвиток.

Актуальність

Культурна спадщина розглядається як система матеріальних, нематеріальних і природних елементів, які пов'язують минуле із сучасністю та формують ідентичність спільнот. У сучасних міжнародних підходах спадщина прямо інтегрується у політики сталого розвитку, що закріплено, зокрема, в політиці інтеграції перспективи сталого розвитку в процеси Конвенції про всесвітню спадщину (2015 р.) та у глобальній доповіді ЮНЕСКО «Culture: Urban Future».

Для територіальних громад України, що зазнають наслідків воєнних дій, інтенсивної урбанізації та трансформацій землекористування, завдання оперативного виявлення, фіксації та моніторингу об'єктів історико-культурної спадщини набу-

ває критичного значення. Традиційні методи польових обстежень та класична геодезична зйомка часто є трудомісткими, потребують значних фінансових ресурсів і не забезпечують достатньої частоти оновлення даних.

Розвиток геоінформаційних технологій, дистанційного зондування та 3D-документування створив якісно нові можливості для моделювання й аналізу об'єктів спадщини. LiDAR-технології (наземне, мобільне, аеролазерне сканування) дозволяють отримувати високодетальні цифрові моделі рельєфу та об'єктів, виявляти приховані археологічні структури й фіксувати деформації з високою метричною точністю.

Упродовж тривалого часу застосування LiDAR для задач культурної спадщини було обмежене високою вартістю та складністю обладнання.

Однак поява твердотільних (solid-state) LiDAR-сенсорів у масових мобільних пристроях (планшетах і смартфонах) суттєво знизила поріг входу до технології. Дослідження показують, що вбудовані в смартфони LiDAR-сенсори здатні забезпечити міліметрово-сантиметрову точність у лабораторних та контрольованих умовах та сантиметрово-дециметрові похибки в складних природних сценах.

Паралельно розвиваються краудсорсингові та громадянсько-наукові підходи (citizen science), що базуються на добровільному зборі просторових даних користувачами за допомогою мобільних пристроїв. Для культурної спадщини вже продемонстровано ефективність геокраудсорсингу для збору фотографій і метаданих щодо історичних об'єктів із використанням веб-карт та добровільної географічної інформації (VGI). Це створює передумови для масового залучення громадян до фіксації стану пам'яток із використанням смартфонів як сенсорних платформ.

У такому контексті особливого значення набуває перевірка гіпотези щодо можливості використання поширених моделей смартфонів із вбудованим LiDAR-сенсором для створення хмар точок та 3D-моделей об'єктів культурної спадщини з точністю, достатньою для задач первинної інвентаризації та моніторингу на рівні територіальних громад.

Аналіз останніх наукових досліджень та публікацій

Аналізуючи останні наукові дослідження проблематики створення цифрових моделей об'єктів історико-культурної спадщини, слід відмітити Четверікова, який прийшов до

висновку, що систематизація завдань та методів просторової ідентифікації й моніторингу території об'єктів історико-культурної спадщини з використанням геоінформаційних технологій дозволяє створювати концептуальну модель, яка включає етапи збору, аналізу та інтерпретації даних [1]. В свою чергу Бір'єва О. у своїй науковій праці зазначає, що «сьогодні у цифровому просторі для музеїв одним із популярних напрямків роботи це створення віртуальних музеїв. Створення 3-D музею можливе за допомогою використання фотограмметрії. Дана технологія також актуальна при створенні електронних музейних каталогів при оцифровці об'ємних експонатів (посуду, скульптури, зброї, тощо). Одним із видів сучасної технології в музеї є доповнена реальність, яка не змінює а доповнює експозицію. Для передачі інформації достатньо лише мати гаджет та відповідний додаток або маркер» [2].

Особливо важливе ГІС-картографування історико-культурної спадщини для створення бази даних про пам'ятки природи і культури з метою організації їх обліку та вживання заходів для збереження. ГІС дає змогу картографувати об'єкти навколишнього середовища, а потім аналізувати їх за величезною кількістю параметрів, візуалізувати і на основі цих даних прогнозувати найрізноманітніші події і явища[3].

Проте проблеми, які безпосередньо пов'язані з інтегрованим використанням Lidar та геоінформаційних технологій для ідентифікації та збереження об'єктів історико-культурної спадщини в межах територіальних громад потребують додаткового дослідження.

Метою дослідження є інтегроване використання Lidar та геоінформаційних технологій для ідентифікації та збереження об'єктів історико-культурної спадщини в межах територіальних громад.

Матеріали і методи наукового дослідження

Матеріали дослідження включають просторові дані, необхідні для комплексного аналізу стану об'єктів історико-культурної спадщини в межах територіальної громади. Основну інформаційну базу становлять LiDAR-дані, отримані з матеріалів мобільного лазерного сканування.

Сканування проводилось мобільним телефоном iPhone 13 Pro, датчик глибини (Sony IMX590 TOF 3D LiDAR scanner). Він випромінює серію лазерних імпульсів (інфрачервоне світло) і вимірює час, за який світло повертається до приймача. Здатний захоплювати об'єкти на відстані до 5 метрів. Контроль якості вимірювань проводиться вимірюванням еталонного значення і перевірка такого самого значення в програмному забезпеченні. Фільтрація хмари точок проводилась автоматично програмним засобом.

Методологічна основа дослідження базується на інтегрованому використанні геоінформаційних технологій та інструментів обробки LiDAR-даних. Первинна обробка хмар точок здійснювалась шляхом класифікації, фільтрації шумів, виділення поверхонь землі та надземних об'єктів.

Для ідентифікації об'єктів історико-культурної спадщини застосовано методи автоматичного та напівавтоматичного виявлення структурних аномалій, використовуючи морфоло-

гічні фільтри, локальні топографічні індикатори та інструменти розширеного 3D-аналізу.

Загалом застосований комплекс методів забезпечив можливість визначення просторових особливостей культурних об'єктів та обґрунтування управлінських рішень щодо їх збереження на рівні територіальних громад.

Результати дослідження та їх обговорення

Об'єкти історико-культурної спадщини у всьому світі є особливими, і у разі пошкодження або знищення, вони є непоправними. Вони складаються з архітектурних споруд та інших конструкцій, які є основним свідченням історичної діяльності людини і, як такі, повинні бути суттєво захищені [4]. Збереження та відновлення історичних будівель вимагає особливого підходу з метою безпеки їх унікальних характеристик. Отже, кожна така будівля повинна бути ретельно досліджена з метою виявлення цих унікальних характеристик: тип конструкції, методи будівництва, реконструкція та реставрація з плином часу, використані матеріали та їх джерело, типи використання тощо.

Для збереження зібраних неоднорідних наборів даних, таких як мультиспектральні зображення, геофізичні дані або дані Lidar, часто використовується гібридний підхід, що складається з різних носіїв, наприклад, по одному для кожного типу даних. Однак необхідно вирішити кілька постійних проблем: поєднання абсолютно різних типів даних, величезний обсяг даних, що генерується більшістю з вищезазначених технологій, та 3D-цифрова документація архітектурної спадщини [5].

Використання процесу моделювання будівельної інформації (BIM) може значно сприяти управлінню та плануванню робіт з консервації та реставрації історичних будівель [6], оскільки дозволяє геопросторову інтеграцію наборів даних, отриманих за допомогою різних технік і що охоплюють різні галузі знань, такі як архітектура, археологія, інженерія, матеріали та дистанційне зондування [7].

У вересні 2015 року Організація Об'єднаних Націй (ООН) прийняла 17 Цілей сталого розвитку для трансформації нашого світу до 2030 року (Організація Об'єднаних Націй, 2015). До цього, у 2013 році, Організація Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) вже заявила, що культура повинна бути в центрі політики сталого розвитку, а культурна спадщина була включена до Порядку денного сталого розвитку. Згодом, у листопаді 2015 року, 20-та Генеральна асамблея держав-учасниць Конвенції про всесвітню спадщину прийняла Політику щодо інтеграції перспективи сталого розвитку в процеси Конвенції про всесвітню спадщину (ЮНЕСКО, 2015). Після цього ЮНЕСКО започаткувала програму «Культура для сталого міського розвитку» (ЮНЕСКО, 2016), щоб підкреслити роль культури в сталому розвитку та проілюструвати зв'язок між виконанням конвенцій ЮНЕСКО про культуру та досягненням цілей сталого розвитку. Тому культурна спадщина зараз вважається важливим чинником сталого розвитку і прямо та опосередковано відображається в цілях сталого розвитку.

Геоінформаційні технології, включаючи фотограмметрію, лазерне

сканування, дистанційне зондування, веб-картографування та науку про геопросторові дані, вже давно відіграють важливу роль у документуванні та збереженні культурної спадщини [8, 9].

Незважаючи на те, що точність моделі залежить від різних факторів (таких як мережа зображень, роздільна здатність, кількість зображень, калібрування), можна отримати високоточні геометричні моделі [10]. Створені 3D-моделі є 3D-поверхнями з фотореалістичними текстурами, а тому підходять для візуалізації та анімації. Крім того, цифрові камери зараз є повсюдними, доступними, портативними та простими у використанні. Це означає, що навіть нефахівці можуть скористатися цією технікою після мінімального навчання [11], а отже, фотограмметрія більше не обмежується знаннями чи місцезнаходженням користувачів і може бути легко впроваджена в усьому світі. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали популярною платформою для середньо- та великомасштабного 3D-картографування місцевості. Однак, як пасивна технологія зондування, фотограмметрія має свої обмеження, такі як залежність від освітлення, відсутність масштабу та необхідність наявності текстури зображення.

Лазерне сканування в різних формах генерує щільні хмари 3D-точок, що описують геометрію об'єкта. Лазерне сканування швидко стало популярним у геодезичній галузі завдяки своїм характеристикам прямого і точного 3D-вимірювання та простоті використання. Збір даних може бути ефективним і плановим незалежно від умов освітлення завдяки активному зондуванню, що може бути

критично важливим, наприклад, для підземних вимірювань. Іншою характеристикою лазерного сканування, що дозволяє проникати крізь рослинність, є його здатність фіксувати об'єкти, що знаходяться за або під листям. Тому, серед інших технологій активного зондування, лазерне сканування зазвичай використовується для реєстрації, моделювання та моніторингу деформацій або структур об'єктів культурної спадщини [12].

Поєднання наземних геоінформаційних технологій задовольнить потреби в документуванні та моніторингу культурної спадщини невеликого та середнього масштабу, однак для великих археологічних об'єктів це може бути трудомістким і тривалим процесом, особливо для об'єктів, які не підходять для обстеження на місці, таких як зони конфлікту. У таких умовах ідеальною альтернативою є космічне або повітряне дистанційне зондування.

Геоінформаційні технології вже давно використовуються для управління просторовими базами даних про культурну спадщину з метою поліпшення планування та збереження. ЮНЕСКО та ЮНІТАР (Інститут навчання та досліджень ООН) об'єднали свої зусилля для захисту об'єктів культурної та природної спадщини за допомогою новітніх геопросторових технологій.

Завдяки повсюдному поширенню смартфонів та Інтернету, краудсорсинг та громадянська наука набувають все більшого поширення завдяки поєднанню ГІС та сучасних веб-карт і успішно застосовуються для документування культурної спадщини.

Всі ці геоінформаційні технології активно сприяють одному або декільком аспектам збереження куль-

турної спадщини. Тісно пов'язані з ними технології, такі як комп'ютерне проектування (CAD) та віртуальна реальність (VR), також використовуються для захисту та просування культурної спадщини і базуються на результатах цих геоінформаційних технологій.

Дослідження українських авторів підтверджують, що цифрові моделі рельєфу та об'єктів культурної спадщини, побудовані на основі геоінформаційних технологій та даних дистанційного зондування, є ключовим елементом систематизації інформації про пам'ятки та просторового аналізу загроз. У роботах [1; 3] запропоновано застосування ГІС для інтеграції архівних карт, аерофотознімків і сучасних даних, що забезпечує виявлення, класифікацію та картографування об'єктів спадщини.

Фотограмметрія, включно з багатозображувальною (multi-image) реконструкцією, тривалий час була базовою технологією для 3D-документування пам'яток; численні дослідження демонструють, що за належної планової та висотної прив'язки можливо досягати високої геометричної точності моделей. Її обмеженнями є залежність від освітлення, текстурованості поверхонь та складності забезпечення масштабу без контрольних вимірювань.

Лазерне сканування (наземне та мобільне) забезпечує прямий вимір 3D-координат із високою точністю та щільністю. Воно успішно застосовується для моніторингу деформацій будівель, детального обстеження конструкцій і створення високоточних цифрових моделей пам'яток. Водночас висока вартість обладнання, потреба у кваліфікованих операторах і складність логістики обмежують



Рис. 1. Створена 3-D модель гідрологічної пам'ятки природи місцевого значення "Природне джерело" в порівнянні з її оригіналом

масштабність таких зйомок, особливо на рівні малих територіальних громад.

З появою LiDAR-сенсорів у масових мобільних пристроях (планшети, смартфони) розпочався активний етап досліджень їхньої придатності для геодезичних і геоінформаційних задач. Перші оцінки показали, що LiDAR-сенсор iPhone / iPad забезпечує дуже низькі похибки на малих дистанціях (порядку міліметрів – одиниць сантиметрів), але точність суттєво знижується із зростанням відстані, складністю геометрії та неоднорідністю поверхонь. Подальші роботи продемонстрували, що iPhone-LiDAR може забезпечувати абсолютну точність на рівні приблизно ± 1 см для порівняно великих об'єктів, але точність погіршується

в умовах щільної рослинності та складного рельєфу.

Дослідження, орієнтовані на поєднання смартфонів з RTK-рішеннями (наприклад, viDoc RTK Rover), показують, що така система здатна досягати сантиметрового рівня точності в плані та по висоті для широкого спектра інженерно-геодезичних задач.

В процесі виконання дослідження було для апробації вибрано об'єкт - гідрологічна пам'ятка природи місцевого значення "Природне джерело" (рис.1). Пам'ятка площею 0,3 га розташована в межах Шпанівської територіальної громади Рівненського району Рівненської області, при північно-східній околиці села Хотин [11]. Статус надано згідно з рішенням облвиконкому від 22.11.1983 року №

343. Перебуває у віданні Шпанівської сільської ради [11].

Отримана хмара точок містила достатню кількість відліків для детального відображення габаритів споруди гідрологічної пам'ятки «Природне джерело» та основних елементів її оформлення. Після фільтрації шумів та побудови трикутної поверхні було сформовано тривимірну модель споруди, придатну для візуалізації та вимірювань.

Візуальний аналіз 3D-моделі показав:

- коректне відтворення основних площин і ребер конструкції;
- задовільне відображення дрібних елементів (ступенів, уступів);
- локальні артефакти в зонах з високим контрастом освітлення та в місцях контакту з водною поверхнею, що узгоджується з відомими обмеженнями LiDAR-сенсорів щодо прозорих і сильновідбивних поверхонь.

Відносна похибка δ визначалась за формулою:

$$\delta = \frac{|L_{\text{етал}} - L_{\text{LiDAR}}|}{L_{\text{етал}}} \cdot 100\%$$

де L_{LiDAR} – довжина, отримана за 3D-моделлю,

$L_{\text{етал}}$ – довжина, виміряна рулеткою.

Такий підхід відповідає стандартним практикам оцінки точності LiDAR-та фотограмметричних моделей у дослідженнях, присвячених мобільним і портативним сканерам.

За еталон було обрано лицеву сторону споруди, довжину якої виміряно рулеткою:

$$L_{\text{етал}} = 210 \text{ см.}$$

За 3D-моделлю, побудованою на основі LiDAR-даних смартфона, отримано:

$$L_{\text{LiDAR}} = 205,7 \text{ см.}$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{210 - 205,7}{210} \cdot 100\% \approx 2,04 \%$$

Отже, похибка вимірювання лінійних параметрів споруди створеної за допомогою LiDAR – сканера моделі не перевищує 2.04 %, тобто є прийнятною.

Завантажена у програму хмара точок має щільність, достатню для визначення відображення розмірів габаритів споруди на створюваній 3D моделі Джерела із достатньою точністю. За еталонне значення було обрано лицеву сторону споруди, довжина якої становила 210 сантиметрів, виміряна рулеткою.

Експеримент із 3D-моделювання гідрологічної пам'ятки, поєднаний з аналізом літератури, дозволяє виокремити перспективні напрями застосування мобільного LiDAR у сфері спадщини:

1. Первинна інвентаризація малих об'єктів;
2. Моніторинг деформацій та ушкоджень (на якісному рівні);
3. Підготовка даних для цифрових двійників;
4. Швидке документування об'єктів у зонах ризику;
5. Краудсорсинг та громадянська наука.

З погляду організації масового обліку об'єктів спадщини, ключовою перевагою мобільних LiDAR-сенсорів є їхня доступність: значна частина населення вже має смартфони відповідного класу. Це створює потенціал для краудсорсингових платформ, у

яких користувачі можуть:

- виконувати локальні 3D-сканування об'єктів;
- завантажувати хмари точок чи 3D-моделі на веб-портал;
- доповнювати їх атрибутивною інформацією (назва, статус, стан, загрози).

Висновки і перспективи

Культурна спадщина територіальних громад в умовах воєнних дій, урбанізаційного тиску та територіальних трансформацій потребує оперативного, просторово детального та регулярного документування, що узгоджується з сучасними підходами ЮНЕСКО до інтеграції спадщини у політики сталого розвитку. LiDAR-технології та геоінформаційні системи є ефективним інструментарієм для виявлення, ідентифікації й моніторингу об'єктів культурної спадщини, а вбудовані в смартфони LiDAR-сенсори створюють можливість використання таких технологій на масовому рівні.

Експериментальне сканування гідрологічної пам'ятки природи «Природне джерело» смартфоном із LiDAR-модулем показало, що відносна похибка вимірювання контрольної довжини (210 см) за 3D-моделлю не перевищує 2,04 %. Цей результат узгоджується з міжнародними оцінками точності мобільного LiDAR і є прийнятним для задач первинної інвентаризації та моніторингу малих об'єктів спадщини.

Основними обмеженнями мобільного LiDAR є дальність сканування, залежність точності від складності сцени та властивостей поверхні, чутливість до траєкторії руху оператора, а також потреба у додатковій геоприв'язці для

інтеграції в ГІС. Це потребує розроблення чітких регламентів та методичних рекомендацій щодо використання смартфонів у завданнях 3D-документування спадщини.

Поєднання мобільного LiDAR, ГІС-платформ та краудсорсингових підходів створює перспективи формування розподілених систем обліку й моніторингу культурної спадщини територіальних громад. За умови стандартизації протоколів збору даних та впровадження процедур контролю якості, залучення громадян до 3D-фіксації об'єктів може суттєво підвищити повноту й актуальність інформаційних ресурсів.

Список використаної літератури

1. Четверіков Б., Бабій Л., Кузик З., Заяць І., Процик М. Дослідження цифрових моделей рельєфу нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини, створених за різні роки // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2022. №96. С. 65–76.
2. Бірьова О. Історико-культурна спадщина України: цифрові технології збереження та популяризація в умовах воєнних дій // *Науково-теоретичний альманах «Грані»*. 2023. Т. 26, №5. С. 90–94. DOI: <https://doi.org/10.15421/1723106>
3. Калинич І. В., Четверіков Б., Хінціцький О. Методика картографування об'єктів історико-культурної спадщини засобами ГІС-технологій із використанням архівних картографічних та аероматеріалів // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2021. Вип. I (41). С. 97–103.
4. Vecco M. A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible // *Journal of Cultural Heritage*. 2010. Vol. 11. P. 321–324.
5. Solla M., Gonçalves L. M. S., Gonçalves G.,

- Francisco C., Puente I., Providência P., Gaspar F., Rodrigues H. A Building Information Modeling Approach to Integrate Geomatic Data for the Documentation and Preservation of Cultural Heritage // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 24. P. 4028. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244028>
6. Bruno N., Roncella R. HBIM for Conservation: A New Proposal for Information Modeling // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. P. 1751.
 7. López F. J., Leronés P. M., Llamas J., Gómez-García-Bermejo J., Zalama E. A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM) // *Multimodal Technologies and Interaction*. 2018. Vol. 2. P. 21.
 8. Remondino F., Rizzi A. Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites—techniques, problems, and examples // *Applied Geomatics*. 2010. Vol. 2, No. 3. P. 85–100.
 9. Dhonju H. K., Xiao W., Shakya B., Mills J. P., Sarhosis V. Documentation of heritage structures through geo-crowdsourcing and web-mapping // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. Vol. 42. P. 17–21.
 10. Koutsoudis A., Vidmar B., Ioannakis G., Arnaoutoglou F., Pavlidis G., Chamzas C. Multi-image 3D reconstruction data evaluation // *Journal of Cultural Heritage*. 2014. Vol. 15, No. 1. P. 73–79.
 11. Boochs F., Heinz G., Huxhagen U., Müller H. Low-cost image based system for non-technical experts in cultural heritage documentation and analysis // *XXI International CIPA Symposium, AntiCIPAting the future of the cultural past*. 2007. P. 01–06.
 12. Jaafar H. A., Meng X., Sowter A., Bryan P. New approach for monitoring historic and heritage buildings: Using terrestrial laser scanning and generalised Procrustes analysis // *Structural Control and Health Monitoring*. 2017. Vol. 24, No. 11. e1987.
- ## References
1. Chetverikov, B., Babii, L., Kuzyk, Z., Zaiats, I., & Protsyk, M. (2022). Doslidzhennia tsyfrovykh modelei rel'iefu nerukhomykh ob'ektiv istoriko-kulturnoi spadshchyny, stvorenykh za rizni roky [Study of digital terrain models of immovable objects of historical and cultural heritage created in different years]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, 96, 65–76.
 2. Birova, O. (2023). Istoryko-kulturna spadshchyna Ukrainy: tsyfrovi tekhnolohii zberezhennia ta populiaryzatsiia v umovakh voiennykh dii [Historical and cultural heritage of Ukraine: digital technologies for preservation and popularization under wartime conditions]. *Naukovo-teoretychnyi almanakh Hrani*, 26(5), 90–94. <https://doi.org/10.15421/1723106>
 3. Kalynych, I. V., Chetverikov, B., & Khintsitskyi, O. (2021). Metodyka kartohrafuvannia ob'ektiv istoriko-kulturnoi spadshchyny zasobamy HIS-tekhnolohii iz vykorystanniam arkhivnykh kartohrafichnykh ta aeromaterialiv [Methodology of mapping historical and cultural heritage objects using GIS technologies with archival cartographic and aerial materials]. *Suchasni dosiagnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, 1(41), 97–103.
 4. Vecco, M. (2010). A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible. *Journal of Cultural Heritage*, 11, 321–324.
 5. Slla, M., Gonçalves, L. M. S., Gonçalves, G., Francisco, C., Puente, I., Providência, P., Gaspar, F., & Rodrigues, H. (2020). A Building Information Modeling Approach to Integrate Geomatic Data for the Documentation and Preservation of Cultural Heritage. *Remote Sensing*, 12(24), 4028. <https://doi.org/10.3390/rs12244028>
 6. Bruno, N., & Roncella, R. (2019). HBIM for Conservation: A New Proposal for Information Modeling. *Remote Sensing*, 11, 1751.

7. López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2, 21.
8. Remondino, F., & Rizzi, A. (2010). Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites—techniques, problems, and examples. *Applied Geomatics*, 2(3), 85–100.
9. Dhonju, H. K., Xiao, W., Shakya, B., Mills, J. P., & Sarhosis, V. (2017, April). Documentation of heritage structures through geo-crowdsourcing and web-mapping. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. 42, pp. 17–21). Copernicus Publications.
10. Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., & Chamzas, C. (2014). Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), 73–79.
11. Boochs, F., Heinz, G., Huxhagen, U., & Müller, H. (2007, October). Low-cost image based system for nontechnical experts in cultural heritage documentation and analysis. In *XXI International CIPA Symposium, AntiCIPAting the future of the cultural past*. 01–06.
12. Jaafar, H. A., Meng, X., Sowter, A., & Bryan, P. (2017). New approach for monitoring historic and heritage buildings: Using terrestrial laser scanning and generalised analysis. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(11), e1987.

Koshel A. O., Kolganova I. G., Poltavets A. M., Yukhymuk V. O.

MOBILE LIDAR, GEOINFORMATION TECHNOLOGIES AND CROWDSOURCING FOR THE DOCUMENTATION AND PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS IN TERRITORIAL COMMUNITIES

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 4'25: 130-141.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2025.02.10>

Abstract. The article substantiates the integrated use of LiDAR technologies, geographic information systems (GIS) and crowdsourcing approaches for identifying, recording and monitoring historical and cultural heritage sites within local communities. It is emphasised that in the context of military action, urbanisation pressure and territorial transformations, cultural heritage is considered an important resource for sustainable development in accordance with UNESCO approaches and the World Heritage Sustainable Development Policy (2015).

It is shown that modern LiDAR systems, including sensors built into smartphones, provide dense point clouds and three-dimensional models of objects with sufficient accuracy to solve a significant part of the tasks of documentation and operational monitoring, although they are inferior to high-precision ground and airborne laser scanners. Particular attention is paid to the hypothesis regarding the possibility of creating 3D models of cultural heritage objects using common smartphone models with built-in LiDAR sensors and assessing the accuracy of measurements of such models.

To test the approach, a field scan of the local hydrological natural monument "Natural Spring" within the Shpanivska territorial community of the Rivne region was performed using a smartphone with a LiDAR module. Processing point clouds in Polycam, AutoCAD, PIX4D, 3ds Max, and Blender software made it possible to build a 3D model of the structure and estimate the relative error in measuring linear dimensions. For a reference section 210 cm long, the relative measurement error was 2.04%, which is consistent with the results of international studies on the accuracy

of mobile LiDAR sensors, which demonstrate millimetre-centimetre accuracy for small objects and centimetre-decimetre errors in complex environments.

The technical limitations of mobile LiDAR (limited scanning range, reduction in density and accuracy with distance, sensitivity to surface properties, influence of the operator's scanning trajectory, need for control measurements) were analysed and the prospects for their application for mass crowdsourced data collection on heritage objects were demonstrated. Based on an analysis of geocrowdsourcing experience, it is argued that the combination of the prevalence of smart-phones, mobile LiDAR sensors and web GIS creates the conditions for the formation of distributed information systems for recording, monitoring and preliminary assessment of the condition of monuments at the level of local communities, provided that data standardisation and quality control procedures are implemented.

Keywords: *geoinformation technologies, Lidar, amalgamated territorial community, historical and cultural heritage, sustainable development.*
