

Ігор БУБНЯК^{1*}, Марія ОЛІЙНИК¹, Сергій ЦІХОНЬ², Юрій ГОЛУБІНКА³ Тарас МАРКО¹

¹ Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: ihor.m.bubniak@lpnu.ua, mariia.a.oliiynyk@lpnu.ua, * <https://orcid.org/0000-0002-3548-8785>

² Геологічний факультет, Львівський національний університет ім. Івана Франка, вул. Університетська 1, Львів, 79000, Україна, ел. пошта: serhii.tsikhon@lnu.edu.ua

³ General Commission of Survey, Saudi Arabia, ел. пошта iurii.golubinka@gmail.com

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.032>

3D-МОДЕЛЬ МЕДОВОЇ ПЕЧЕРИ, м. ЛЬВІВ

Мета статті – подання та детальний аналіз 3D-моделі Медової печери у Львові, створеної за допомогою технології лазерного сканування. Основні цілі: розкриття точності та деталізація отриманої моделі, а також визначення можливостей її використання у різних сферах, таких як: геологічні дослідження, археологія, культурна спадщина та туризм. Крім того, мета статті – підкреслити важливість та переваги використання лазерного сканування для створення точних та реалістичних 3D-моделей печер, які відкривають нові можливості для вивчення та збереження природних унікальних формацій. Методика, використана в статті для створення 3D-моделі Медової печери, охоплює декілька кроків: підготовка та рекогносцирування, що передбачає рекогносцирування печери для виявлення технічних та логістичних аспектів, таких як: температура, вологість, обмеження у русі та освітлення, необхідні для знімання. Знімання здійснюється за допомогою наземного лазерного сканування, яке є ефективним в умовах повної темряви та обмеженого простору. Наземне лазерне сканування забезпечує збирання точних даних про геометрію печери. Для ефективного сканування та зшивання сканів використовують маркери-рефлектори, які розміщують усередині печери перед початком сканування. У дослідженнях використано спеціалізоване обладнання, як-от GNSS-приймачі Trimble R7 та наземний лазерний сканер Faro Focus 3D 120. Вимірювання виконували з різних точок для створення детальної хмари координованих точок, яка є основою для 3D-моделі. Для зшивання отриманих сканів і створення єдиної точкової 3D-моделі використано програмне забезпечення, таке як Faro Scene. Під час реєстрації автоматично з'єднуються позначені марки. Виконано аналіз точності з'єднання марок для забезпечення високої якості реєстрації. Використовуючи програмне забезпечення Move, побудували детальні 3D-моделі, урахувавши текстуровані моделі та перетини для візуалізації внутрішньої структури печери. В результаті дослідження Медової печери за допомогою наземного лазерного сканування створено точну та деталізовану тривимірну модель печери. Ця модель відкриває нові перспективи для геологічних досліджень, наукового вивчення культурної спадщини та туризму. Особливість цього дослідження полягає у використанні передових технологій сканування, які дають змогу детально відтворити геометричні особливості печери, враховуючи її складну форму та різноманітні розміри. Отримана модель стала важливим інструментом для геологічних та геоморфологічних досліджень, а також для розвитку туризму і збереження культурної спадщини. **Наукова новизна.** Створення 3D-моделі Медової печери у Львові за допомогою лазерного сканування – значний прогрес у вивченні геометрії печер. Основною інновацією є використання передових технологій лазерного сканування для забезпечення детального відображення геометричних особливостей печери, враховуючи її складну структуру та різноманітність розмірів. Новизна полягає також у розробленні стратегії збирання та оброблення даних в умовах повної темряви та обмеженого простору печери, що дало змогу отримати точну та реалістичну 3D-модель. **Практична значущість.** 3D-модель Медової печери стає важливим інструментом для геологічних, геоморфологічних досліджень та вивчення унікальних природних формацій. Модель відкриває нові можливості для розвитку туризму, адже віртуальне вивчення печери забезпечує унікальний досвід для відвідувачів. Створення цієї 3D-моделі є важливим кроком у збереженні та документуванні культурної спадщини, сприяючи науковому та культурному розвитку регіону, а також забезпечуючи доступ до унікальних об'єктів для науковців та громадськості.

Ключові слова: лазерне сканування; 3D моделювання; геологічні дослідження; Медова печера; геометрія печер; геодезичні технології; туризм; геоморфологія; цифрова документація печер.

Вступ

Протягом останніх двох десятиліть спостерігається технологічний прорив у сфері отримання просторово-координованої інформації, яку широко застосовують у різних наукових галузях, зок-

рема в геології, географії та прикладних науках. Застосування новітніх технологій виявляється у вивченні геоморфологічних особливостей земної поверхні, седиментологічних процесів та структурних елементів земної кори різних масштабів.

Виникають нові терміни, такі як “вертикальна геологія” та “віртуальне геологічне відслонення”, що відображають нові підходи до аналізу геологічних явищ.

Лазерне сканування використовують для об'єктів, параметри яких швидко змінюються, таких як вулкани, що робить його ефективним інструментом для дослідження динаміки таких об'єктів. Особливо значущим є використання цих новітніх технологій у моніторингу процесів осування ділянок земної поверхні, що уможливає точніше та передбачуваніше управління цими явищами. Методи лазерного сканування стали невід'ємною частиною досліджень льодовиків, де із їх використанням можна детально вивчати структуру та динаміку цих важливих компонентів земної системи.

Застосування лазерного сканування у геологічних дослідженнях великою мірою прискорює збирання та опрацювання даних. Покращилась якість отриманих даних, а також істотно підвищилась швидкість їх збирання та аналізу. Використання сучасних комп'ютерних технологій надає нові можливості візуалізації результатів опрацювання та обміну великими обсягами інформації.

Останнім часом лазерне сканування та цифрову фотограмметрію також використовують для вивчення печер, щоб детально дослідити їхню внутрішню структуру та особливості. Це привело до створення точних тривимірних моделей печер у різних регіонах світу. Такі моделі корисні для різних наукових галузей, таких як спелеологія, геоморфологія, геологія та біологія. Також представники геотуризму активно використовують 3D-моделі та карти в своєму щоденному житті.

У Інституті геодезії Національного університету “Львівська політехніка” група науковців досліджує як архітектурні, так і природні об'єкти, використовуючи методи лазерного знімання та цифрової фотограмметрії. Результати цих досліджень широко висвітлено у наукових публікаціях [Bubniak et al., 2021; Bubniak et al., 2019; Маліцький & Бубняк, Кузик та ін., 2017; Марусаж, 2021; Savchyn et al., 2019].

На заході України печери доволі поширені, але жодна з них не має відповідних тривимірних моделей, а плани, як правило, не є достатньо точними. Щоб заповнити цю прогалину, ми про-

вели дослідження, за допомогою використання лазерного знімання для створення детальних тривимірних моделей печер. Як об'єкт досліджень була вибрана Медова печера, розташована в місцевості Майорівка Личаківського району міста Львова. Цю печеру вважають однією з найвідвідуваніших природних туристичних об'єктів у Львові. Крім того, поруч з печерою ведеться активне будівництво, тому необхідний постійний моніторинг її стану.

Попередні дослідження із сканувань печер

Едуард Алфред Мартель – засновник сучасної спелеології [Shaw, 2004] у своїх ранніх роботах інтенсивно використовував результати знімальних робіт у печерах. Так на початку ХХ ст. виникла спелеологія.

На ранніх етапах досліджень, для документування своїх відкриттів, вчені використовували ручні малюнки, що вважали простим методом [Fryer et al., 2005].

Подальшим кроком стало використання стандартних геодезичних інструментів, таких як компаси, стрічки та клінометри [Tsakiri et al., 2007]. За допомогою цих засобів були створені плани (карти) всіх виявлених печер на території України, як відображено у роботі [Зорін, 2008]. Використання тахеометрів стало істотним прогресом у проведенні підземних досліджень з погляду методології та точності. Однак ці методи не є оптимальними для отримання даних про нерегулярну геометрію, таку як, наприклад, геометрія печер [Haddad, 2011]. Застосування технології наземного лазерного сканування привело до революції у зніманні печер, та до значних досягнень у їх дослідженні.

Між 1988 та 2001 рр. зроблено перші спроби реконструкції геометрії печери Альтаміра в північній частині Іспанії за допомогою сканера Minolta VI-700. Проєкт тривав довго через обмеження діапазону сканерів (0,7–1,1 м), великі обсяги моделей САПР та потребу в ручній обробці [Blais, 2004]. Практично через десять років після завершення проєкту “Альтаміра” інша команда дослідників вирішила випробувати 3D-картування у печері верхнього палеоліту Кап-Блан на південному заході Франції у березні 1999 р. [Robson et al., 2001]. Для цього вони використовували лазерну систему Autoscanning Surveyor

(Surveyor ALS), щоб створити детальну 3D-модель печери. Однак обидва ці проекти мали два основні недоліки: перший полягає у тому, що один із використовуваних методів не є емпірично обґрунтованим, а другий – обмежений обсягом пам'яті. Незважаючи на це, обидва проекти визначили нову еру в геодезичних дослідженнях печер.

Тематичні дослідження були проведені в Австралії – [El-Nakim et al., 2004], Австрії [Buchroithner & Gaisecker, 2009], США [Perperidoy et al., 2010], Італії [Beraldin et al., 2006], [Caprioli et al., 2003], Франції [Chandelier & Roche, 2009], Греції [Tsakiri et al., 2007], Португалії [Silvestre et al., 2013], Хорватії [Kordic et al., 2012], Малайзії [McFarlane et al., 2013]. Лише у двох африканських країнах, у Південній Африці та Єгипті, НЛС використали для дослідження печер. Печера Вондерверк у Південній Африці була повністю відсканована за допомогою Leica HDS3000 для побудови 3D-моделі у межах проекту документації для сайтів африканської культурної спадщини [Rüther et al., 2009].

Загальний огляд результатів досліджень вказує на значно меншу активність вивчення печер поза межами Європейського Союзу. Однак це не означає, що в Європі більше печер порівняно з іншими регіонами світу. Ймовірно, це пов'язано з низкою факторів, таких як: розуміння культурної спадщини в суспільстві, вплив навчальних установ, економічні умови та доступ до дослідницьких інструментів. Важливою обставиною є те, що більшість виробників новітніх лазерних сканерів розташовані саме в Європі. Дослідження печер із використанням НЛС проводять на території сусідньої Польщі. На території України теж є низка печер світового значення. Їх досліджують понад двісті років. Але, на жаль, до сьогодні для їх дослідження не використовували НЛС. Лише кілька робіт, близьких за підходами до вивчення печер НЛС, виконано в Близьких печерах Київської Печерської Лаври [Шульц, 2016].

Геологічне положення Медової печери

Медова печера розміщена в кінці вулиці з такою самою назвою, в урочищі Майорівка в місті Львові (рис. 1). На рис. 2 зображено контур Медової печери по горизонту 380 м.



Рис. 1. Розташування Медової печери, м. Львів

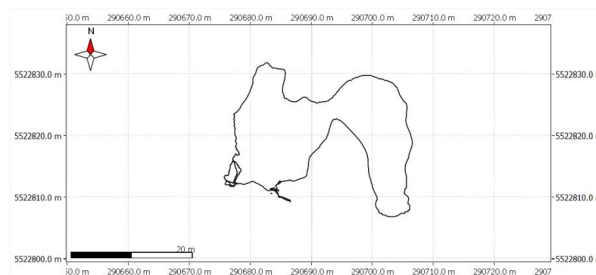


Рис. 2. Контур Медової печери по горизонту 380 м, м. Львів

У тектонічному плані печера розташована на Львівському плато, у південно-західній частині Східноєвропейської платформи, яка відома під назвою Подільська плита. Осадовий чохол цієї структури складений палеозойськими породами (кембрій – нижній силур, верхній силур, девон, нижній і середній карбон), які полого занурюються на південний захід під Карпатський ороген. Тут проходить Головний європейський вододіл, між ріками Балтійського та Чорноморського басейнів. Печера розтíšована серед відкладень неогенового віку – ратинських вапняків. Це світло-сірі, жовтуваті кавернозні вапняки. Серед них чимало фауни. На території, що оточує печеру, ростуть букові та буково-соснові дерева. Тут поширені чорноземи, елювіальні й торфво-болотні ґрунти. Для цього району типовим є помірно континентальний клімат із м'якою зимою і теплим літом. Середньомісячна температура повітря становить -4 у січні та $+18$ у липні. Середнє значення вологості повітря становить 80 %. Вітри переважають західного напрямку, рідше північно-східні.

Мета

Мета статті – ретельний аналіз та подання 3D-моделі Медової печери в Львові, яку успішно створено за допомогою технології лазерного

сканування. Ми прагнемо висвітлити важливі аспекти цього проєкту, зосереджуючись на точності та деталізації отриманої моделі. Крім того, наші зусилля спрямовані на вивчення потенційного використання цієї 3D-моделі в різних галузях, таких як: геологічні дослідження, наука, вивчення культурної спадщини та розвиток туризму. Конкретні цілі охоплюють аналіз можливостей використання моделі для вивчення геоморфологічних особливостей, структурних елементів та інших аспектів печери. Ми також розглядаємо перспективи використання отриманої 3D-моделі для наукових досліджень, підвищення інтересу до культурної спадщини та стимулювання розвитку туризму в цьому регіоні. Загальна мета – висвітлення та популяризація передових методів дослідження печерної геометрії із застосуванням лазерного сканування, що може відкрити нові перспективи у вивченні природних формацій та сприяти їх збереженню для майбутніх поколінь.

Методика досліджень та дані

Знімання за допомогою наземного лазерного сканування (НЛС) в печерах відбувається умовно аналогічно зніманню на поверхні. Зазвичай печери мають складну форму, різні розміри, вузькі проходи, у них немає освітлення. Однак суцільна темрява та проблеми орієнтації в обмежених просторах печер становлять ключові відмінності між цими середовищами, і вони істотно впливають на логістику знімання, навіть більше, ніж власне на сканування. Хоча відсутність світла не заважає збиранню точкових даних, вона обмежує можливість отримання кольорових даних та фотографування. Для додатків, таких як 3D-моделювання та геоморфологічний аналіз, це може не становити проблеми, але для застосунків, у яких важлива фотореалістичність (наприклад, документація печерних малюнків, петрогліфів), потрібне зовнішнє освітлення. З урахуванням цього принципово важливо використовувати систематичну та ефективну стратегію, яка забезпечить ефективні збирання та опрацювання даних для точного фіксування геометрії та орієнтації печерних порожнин, а також, де потрібно, забезпечить відповідне освітлення для фотографування.

Стандартна практика в галузі знімання: перед збиранням даних здійснюють рекогносцируван-

ня. Проте під час знімання у печерах цей етап набагато важливіший, оскільки там стикаємось з низкою проблем, таких як висока температура та вологість, обмеження руху та темрява. Отже, знімання у печерах потребує детального планування, щоб забезпечити вибір відповідних методів та розроблення ефективної схеми оброблення результатів робіт. З іншого боку, належне планування забезпечить якість зібраних даних та 3D-моделі.

Перше завдання на етапі планування полягає у визначенні цілей проєкту та забезпечення чіткого розуміння мети завдання та потреб користувачів. Далі – візит на об'єкт, щоб визначити технічні та логістичні проблеми, які потрібно вирішити перед збиранням даних. Етап планування повинен враховувати особливості форми печери, покриття та інші характеристики, такі як освітлення, температура. Структура печери здебільшого може призвести до отримання недостатньої для хмари кількості точок. Розташування сканера потрібно вибирати так, щоб послідовні сканування мали достатнє перекриття, що полегшить об'єднання хмар точок з різних позицій сканування. Зауважимо, що вибір сканера повинен ґрунтуватись на технічних характеристиках та його адаптації до умов у печері.

Визначальним фактором в 3D-скануванні печери є отримання точних тривимірних даних, які забезпечують деталізацію та високоякісний морфометричний рівень даних як основу, на якій іншу інформацію про печери можна інтегрувати та проаналізувати просторово. Однак це потребує певного рівня знань оператора. Є два можливі способи використання наземних лазерних сканерів під час збирання даних. Перша процедура аналогічна використанню електронного тахеометра, коли прилад вирівнюють по наземній контрольній точці, координати якої відомі, і “назад” до іншої видимої контрольної точки, щоб обчислити правильний азимут і кут. Але нерівна поверхня і вічна пільма всередині печери роблять цю орієнтаційну установку нездійсненною. Зважаючи на це, спеціально розробили альтернативний підхід для дослідження печер. Він дає змогу встановлювати сканер у будь-якому місці, що гарантує оптимальне покриття сканування. Маркери виконано з матеріалів, що відбивають поверхню і легко ідентифікуються; проте точність автоматичної реєстрації поліпшується зі збільшенням роздільної здатності сканування.

Загальноприйнята практика полягає у тому, щоб поміщати маркери в печеру до початку сканування так, щоб принаймні три (бажано більше) маркери можна побачити в будь-який час на двох сусідніх сканерах, а їхні глобальні позиції вимірюють точно за допомогою теодоліта, електронного тахеометра або комбінації GPS та електронного тахеометра. Завдяки альтернативним процедурам реєстрації сканування, таких як cloud-to-cloud та автоматизованої реєстрації в безцільовому режимі, поступово перестають використовувати штучні маркери. Для сканування печери перекриття необхідно добре спланувати до процесу збирання даних. Загальне правило полягає у тому, що близько 25 % накладання між двома суміжними скануваннями дасть високоякісну реєстрацію. Точки, відскановані з різних станцій, містяться в різних локальних системах координат. Тому реєстрація потрібна для вирівнювання цих окремих хмарин точок у єдину прямокутну систему відліку. Крім того, для точного опрацювання даних та сукупної інформації про печеру вона повинна бути прив'язана до глобальної системи координат. Це, як правило, здійснюють за допомогою методів геодезії (GPS та електронний тахеометр або теодоліт). Оскільки GPS є неефективним всередині печери, звичайною практикою є утворення контрольних точок на землі перед входом у печеру та використання електронного тахеометра для переведення координат під землею через мережу оглядових точок. Пакети опрацювання точок призначені для автоматичного визначення координат маркерів, що використовують під час реєстрації, для зшивання хмар точкових, отриманих з різних сканувань, і для перетворення декартової системи координат сканера на локальну або глобальну референцну систему.

Для здійснення досліджень за допомогою наземного лазерного сканування Медової печери використали таке обладнання:

1. Комплект GNSS-приймачів Trimble R7 (рис. 3).
2. Наземний лазерний сканер Faro Focus 3D 120 (рис. 4).

Вимірювання здійснювали з чотирьох точок із використанням шести марок-рефлекторів (рис. 5) для об'єднання окремих сканів у єдину хмару координованих точок. Крім цього, координати деяких марок були визначені в загально-

земній системі координат, що дало змогу трансформувати отриману точкову 3D-модель Медової печери в цю систему координат.



Рис. 3. Комплект GNSS-приймач Trimble R7



Рис. 4. Наземний лазерний сканер Faro Focus 3D 120



Рис. 5. Об'ємні марки-рефлектори

Подальше опрацювання даних, одержаних у результаті лазерного сканування печери, виконали за допомогою програмного забезпечення. Для зшиття отриманих сканів використали програмне забезпечення Faro Scene 5.0. Виконуємо в програмі такі дії:

- завантажуюмо скани об'єктів;
- позначаємо плоскі марки та сфери;
- реєструємо скани за визначеними пунктами.

Під час реєстрації програма автоматично з'єднує позначені марки. В результаті одержуємо хмару точок у єдиній системі координат, яка є точковою 3D-моделлю досліджуваного об'єкта (рис. 7). Щоб отримати найкращі показники точності об'єднання сканів, потрібно виконати аналіз на точність їх поєднання за кожною маркою (рис. 6).

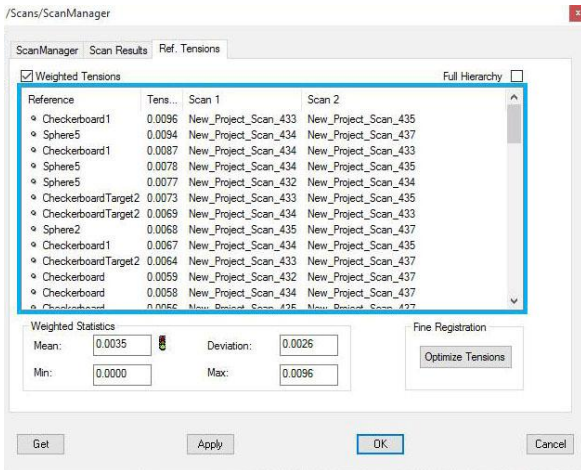


Рис. 6. Результати аналізу точності з'єднання марок

Досягнута точність реєстрації сканів – 0,0035 м. Максимальне відхилення між плоскими марками – 0,0096 м, мінімальне – 0,0012 м. Максимальне відхилення між об'ємними марками становить 0,0086 м, мінімальне – 0,0005 м.



Рис. 7. Точкова модель Медової печери, на якій видно розташування маркерів

Результати досліджень Опрацювання даних лазерного сканування та побудова 3D-моделі Медової печери із застосуванням ПЗ Move

Подальші побудови моделей Медової печери здійснювали з використанням програмного за-

безпечення Move, розробником якого є фірма Midland Valley, світовий лідер у створенні програм для структурної геології та геологічного картування. Серед величезної кількості функціональних можливостей ми використали блок 3D та блок для побудови перетинів. Насамперед імпортуємо модель хмари точок, створену в результаті лазерного знімання. Модель можна подати в багатьох форматах, ми використали *.obj. Найзручніше подавати її у вигляді текстурованої моделі. Необхідно пам'ятати, що новий проєкт повинен мати таку саму систему координат, що і модель. Оскільки ми досліджуємо печеру, доцільно розділити модель на дві частини, наприклад верхню і нижню (рис. 8, 9). Це буде зручно також і для візуалізації.

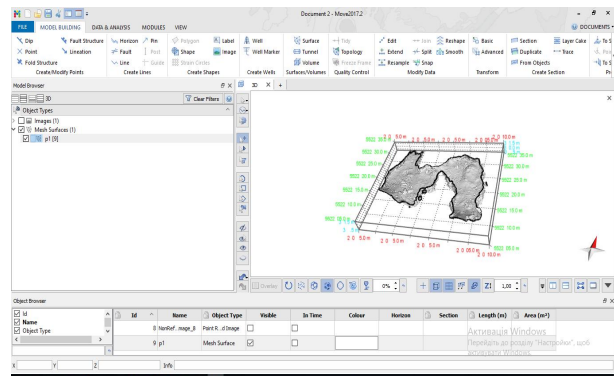


Рис. 8. Нижня частина моделі Медової печери, завантажена в модуль 3D програми Move

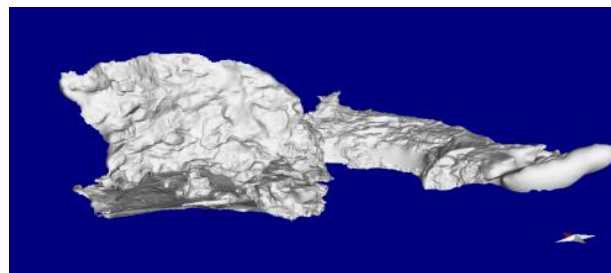


Рис. 9. Верхня частина Медової печери, завантажена в програму Move

Як бачимо, ці моделі відображають лише поверхню печери. Для візуалізації внутрішньої структури використаємо два підходи. Перший – “розрізаємо модель” на дві частини (рис. 10).

Другий спосіб подання внутрішньої будови печери – побудова перетину (рис. 11, а, б). Для цього використано інструмент Section, що міститься у модулі 3D.

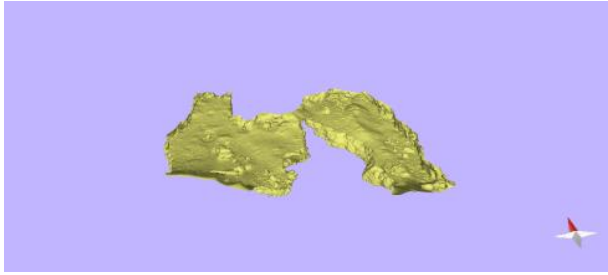


Рис. 10. Структура дна Медової печери

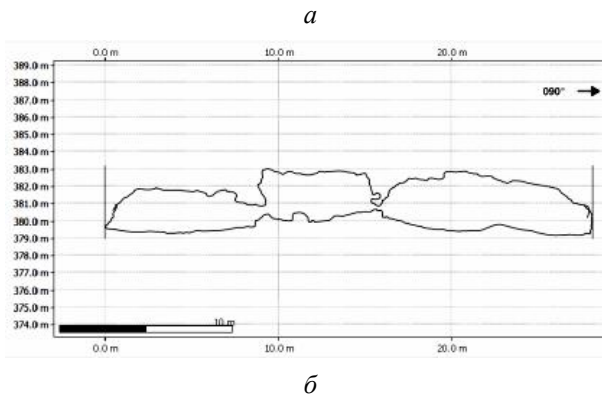
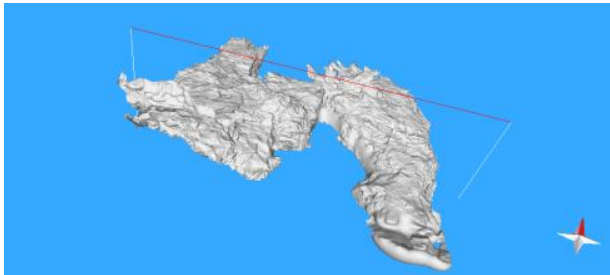


Рис. 11. Перетин через Медову печеру, вздовж вибраного напрямку

Щоб показати внутрішню будову, використаємо функцію Creation Multiply Sections, яка дає змогу побудувати одночасно серію розрізів вздовж вибраних напрямків. Можна вибирати не тільки кількість розрізів, їх розташування, але і відстань між ними. Зазвичай площини цих розрізів орієнтовані вертикально, але за потреби їх можна розмістити під будь-яким кутом. На рис. 12 бачимо розташування розрізів Медової печери, а на рис. 13 – самі розрізи.

На підставі отриманої моделі побудовано детальний план печери (рис. 14), із використанням блока Map. В ньому існує великий набір інструментів для картографічних цілей. Наприклад, можна вибрати інтервал горизонталей, їх параметри тощо.

Описана вище модель не буде повною, якщо не показана поверхня, під якою міститься печера. Щоб показати поверхню, ми використали результати аерофотознімання, яке здійснила група

дослідників Інституту геодезії. Отриману модель поверхні завантажено в програму Move до наявної моделі Медової печери. На підставі цих моделей знову побудовано перетин, на якому вже показана і поверхня над печерою (рис. 15).

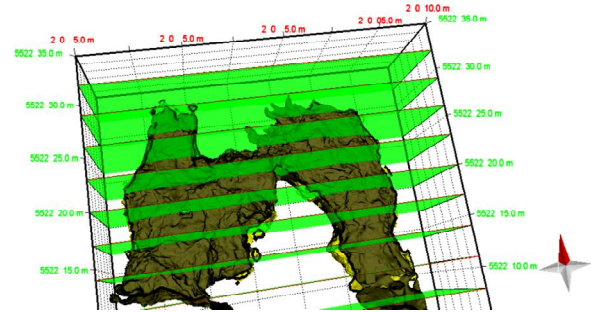


Рис. 12. Розташування розрізів Медової печери



Рис. 13. Внутрішня структура Медової печери, показана у вигляді серії перетинів

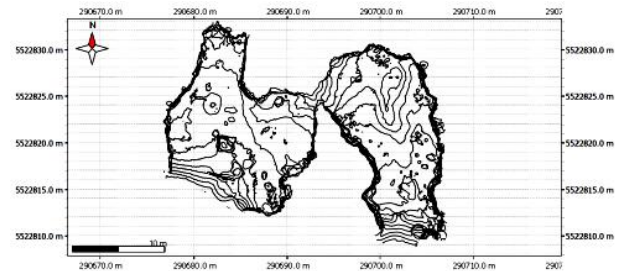


Рис. 14. План Медової печери

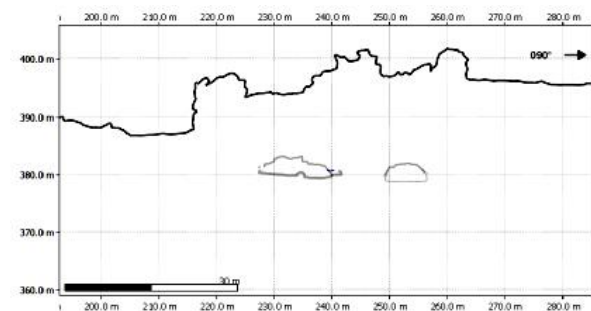


Рис. 15. Розріз через Медову печеру і поверхню, під якою вона міститься

Результатом досліджень є отримана віртуальна модель Медової печери.

Наукова новизна та практична значущість

Представлення 3D-моделі Медової печери у Львові, створеної за допомогою лазерного сканування, характеризується значною науковою новизною в контексті вивчення геометрії печер та її використання для подальших наукових досліджень. Однією із ключових інновацій є застосування передової технології лазерного сканування для детального охоплення геометричних особливостей печери, враховуючи її складну форму та різноманітні розміри. Також новизна полягає в розробленні стратегії збирання та опрацювання даних в умовах повної темряви та обмежених просторових умов печери. Врахування цих особливостей дає змогу отримати точну та реалістичну 3D-модель, яка стане основою для подальших наукових досліджень.

Отримана 3D-модель Медової печери має перспективи практичного використання. Вона може слугувати важливим інструментом для геологічних та геоморфологічних досліджень, а також для вивчення унікальних природних утворень у печерах. Також ця модель відкриває можливості для розвитку туризму, оскільки віртуальне вивчення печери забезпечить неповторний досвід для відвідувачів.

Додатково створення 3D-моделі є важливим кроком у збереженні та документуванні культурної спадщини печери. Це важливо для подальшого наукового та культурного розвитку регіону, а також для забезпечення доступу до унікальних об'єктів для науковців та громадськості.

Висновки

Результатом виконання роботи є демонстрація придатності використання наземного лазерного сканування для дослідження печер – побудови їх моделей, планів тощо. Результатами роботи можуть скористатись геологи, геоморфологи, спелеологи для подальших досліджень. В ході роботи показано ефективність знімальних робіт, швидкість опрацювання та високу якість отриманих даних. Ми рекомендуємо використовувати цей підхід для вивчення інших печер України. Результати роботи також можна використати під

час проведення екскурсій і в навчальному процесі для студентів закладів вищої освіти спеціальностей наук про Землю

Це дослідження висвітлює значущість та ефективність використання наземного лазерного сканування (НЛС) для створення детальних тривимірних моделей печер, як показано на прикладі Медової печери у Львові. Завдяки цій технології ми отримали точну та реалістичну 3D-модель печери, що відкриває нові перспективи у геологічних дослідженнях, науці, вивченні культурної спадщини та розвитку туризму.

НЛС дав змогу глибше зрозуміти геоморфологічні особливості та структурні елементи Медової печери, що має велике значення для наукових досліджень та охорони природних унікальних формацій. Створення цієї моделі є також важливим кроком у документуванні та збереженні культурної спадщини регіону, забезпечуючи доступ до цінних даних для науковців і широкої громадськості.

За результатами цього дослідження рекомендуємо застосовувати НЛС для вивчення інших печер в Україні та вважаємо, що ця технологія може відіграти ключову роль у поліпшенні якості геодезичних досліджень печер.

Література

- Зорін, Д. О. (2008). Порушення геологічного середовища Придністров'я карстовими процесами. Екологічна безпека та раціональне природокористування. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. № 1(17). С. 150–155.
- Кузик З., Ставовий А., Ільків, Т. (2017). Документування та моделювання археологічних об'єктів засобами цифрової фотограмметрії. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Вип. (1). С. 125–130.
- Маліцький А., Бубняк І. (2017). Геологічні дослідження скелі Диравець з використанням наземного лазерного сканування.
- Марусаж Х. І. (2021). Розробка методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя: дис. д-ра наук; Національний університет "Львівська політехніка".
- Шульц Р. В., Білоус Б., Гончарук, О. М. (2016). Моніторинг пам'яток архітектури за допомогою даних наземного лазерного сканування. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Вип. 46. С. 202–207.

- Beraldin, J. A., Blais, F., Cournoyer, L., Picard, M., Gamache, D., Valzano, V., ... & Gorgoglione, M. A. (2006, October). Multi-Resolution Digital 3D Imaging System Applied to the Recording of Grotto Sites: the Case of the Grotta dei Cervi. In *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, 45–52.
- Blais, F. (2004). Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*, 13 (1): 231–240. <http://dx.doi.org/10.1117/1.1631921>
- Buchroithner, M. F. & Gaisecker, T. (2009). Terrestrial laser scanning for the visualization of a complex dome in an extreme alpine cave system. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 4: 329–339. <http://dx.doi.org/10.1127/1432-8364/2009/0025>
- Bubniak, I., Bubniak, A., Shylo, E., Oliinyk, M., & Bihun, M. (2021, November). Virtual outcrop of Eocene rocks of the Sokil'skyi ridge (Outer Ukrainian Carpathians, Ivano-Frankivsk Region). In *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Vol. 2021, No. 1, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2077>
- Bubniak, I. M., Bubniak, A. M., Gavrilenko, O. D., Nikulishyn, V. I., & Golubinka, I. I. (2019, May). Using laser scanning and digital photogrammetry for creation of virtual geological outcrops: Case studies from the west of Ukraine. In *18th International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects*, Vol. 2019, No. 1, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902078>
- Caprioli, M., Minchilli, M., Scognamiglio, A. & Strisciuglio, G. (2003). Architectural and natural heritage: virtual reality with photogrammetry and laser scanning. In: *Proceedings of XIXth International Symposium CIPA*, Antalya, Turkey, 1–5.
- Chandelier, L. & Roche, F. (2009). Terrestrial laser scanning for paleontologists: the Tautavel Cave. In: XXII CIPA Symposium: Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage, Kyoto, Japan, 11–15 October, 2009, 1–5
- El-Hakim, S. F., Fryer, J. & Picard, M. (2004). Modeling and visualization of aboriginal rock art in the Baiame Cave. In: *Proceedings of the XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*: 12–23 July 2004, Istanbul, Turkey. Commission V, Working Group V/2, 990–995.
- Fryer, J. G., Chandler, J. H. & El-hakim, S. F. (2005). Recording and modelling an aboriginal cave painting: with or without laser scanning? *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2: 1–8.
- Hadad, N. A. (2011). From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites. *Journal of King Saud University of Engineering Sciences*, 23 (2): 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2011.03.001>
- González-Aguilera, D., Muñoz-Nieto, A., Gómez-Lahoz, J., Herrero-Pascual, J., & Gutierrez-Alonso, G. (2009). 3D digital surveying and modelling of cave geometry: Application to paleolithic rock art. *Sensors*, 9(02), 1108–1127.
- Kordic, B., Dapo, A. & Pribicevic, B. (2012). Application of terrestrial laser scanning in the preservation of fortified caves. In: FIG Working Week 2012. Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, Rome, Italy, 7 p.
- McFarlane, D. A., Buchroithner, M., Lundberg, J., Petters, C., Roberts, W. & Rentergen G. V. (2013). Integrated three-dimensional laser scanning and autonomous drone surface-photogrammetry at Gomantong Caves, Sabah, Malaysia. In: *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, Brno, 1: 317–319.
- Perperidoy, D. G., Tzortzioti, E. & Sigizis, K. (2010). A new methodology for surveying and exploring complex environments using 3D scanning. In: *FIG Congress 2010 – Facing the Challenges – Building the Capacity*, Sydney, 11–16 April 2010, 1–14.
- Robson-Brown, K. A., Chalmers A., Saigol T., Green C. & D'Errico F. (2001). An automated laser scan survey of the Upper Palaeolithic rock shelter of Cap Blanc. *Journal of Archaeological Science*, 28:283–289. <http://dx.doi.org/10.1006/jasc.2000.0574>
- Rüther, H., Chazan, M., Schroeder, R., Neeser, R., Held, C., Walker, S. J. & Horwitz, L. K. (2009). Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, 36: 1847–1856. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.04.012>
- Savchyn, I., Shylo, Y., Bubniak, I., & Bubniak, A. (2019, November). Creation of the geological virtual outcrop (Galindez island, western Antarctica). In *Monitoring 2019*, Vol. 2019, No. 1, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903270>
- Shaw, T. (2004). Speleologist. In: Gunn J. (Ed.), *Encyclopedia of caves and karst science*. Fitzroy Dearborn, New York, 686–689.
- Silvestre, I., Rodrigues, J. I., Figueiredo, M. J. G. & VeigaPires, C. (2013). Cave chamber data modeling and 3D web visualization. In: *Proceedings of the International Conference on Information Visualisation*, 468–473. <http://dx.doi.org/10.1109/IV.2013.103>
- Tsakiri, M., Sigizis, K., Billiris, H. & Dogouris, S. (2007). 3D laser scanning for the documentation of cave environments. In: 11th ACUUS Conference: Underground Space, Expanding the Frontiers, 10–13 September 2007, Athens, 403–408..

Ihor BUBNIAK^{1*}, Mariia OLIINYK¹, Serhiy TSIKHON², Yuriy GOLUBINKA³, Taras MARKO¹

¹ Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: ihor.m.bubniak@lpnu.ua, mariia.a.oliinyk@lpnu.ua, * <https://orcid.org/0000-0002-3548-8785>

² Geological faculty, Ivan Franko National University of Lviv, 1, Universytetska str., Lviv, 79000, Ukraine, e-mail: serhii.tsikhon@lnu.edu.ua

3D-MODEL OF MEDOVA CAVE, LVIV

The **purpose** of this article is to present and provide a detailed analysis of the 3D model of the Medova Cave in Lviv, created using laser scanning technology. The main objectives include revealing the accuracy and detailing the obtained model, as well as determining its potential applications in various fields such as geological research, scientific exploration, cultural heritage, and tourism. Additionally, the article aims to emphasize the importance and advantages of using laser scanning for creating precise and realistic 3D cave models, opening new possibilities for the study and preservation of natural unique formations. **Method.** The article describes the methodology used to create a 3D model of the Medova Cave, which involves several key steps. Firstly, a thorough reconnaissance of the cave is conducted to identify technical and logistical aspects such as temperature, humidity, movement restrictions, and lighting that are necessary for the scan. Next, ground-based laser scanning is employed, proving effective in conditions of complete darkness and limited space, to ensure accurate data collection regarding the cave's geometry. Reflective markers are strategically placed inside the cave before scanning, facilitating efficient scanning and alignment of scans. Specialized equipment such as GNSS receivers (Trimble R7) and ground-based laser scanners (Faro Focus 3D 120) are utilized for data collection. Software tools like Faro Scene are used for stitching together scans into a unified 3D point cloud model during data processing. Finally, the accuracy of marker connections is analyzed to ensure high-quality registration, and the 3D model is constructed. Detailed 3D models, including textured models and cross-sections for visualizing the internal structure of the cave, were constructed using software such as Move. **Results.** The research on the Medova Cave, employing ground-based laser scanning, yielded an accurate and detailed 3D model of the cave. This model opens new perspectives for geological and geomorphological studies, tourism development, and cultural heritage preservation. The use of advanced scanning technologies allowed for a comprehensive representation of the cave's geometric features, considering its complex structure and varied dimensions. **Scientific novelty and practical significance.** The creation of the 3D model of the Medova cave using laser scanning signifies progress in cave geometry studies. The innovation lies in the utilization of advanced laser scanning technologies to ensure a detailed representation of the cave's geometric features, accounting for its complex structure and diverse dimensions. The novelty also lies in the development of a data collection and processing strategy in conditions of complete darkness and limited cave space, resulting in an accurate and realistic 3D model. Practically, the 3D model of the Medova Cave serves as a crucial tool for geological and geomorphological research and the exploration of unique natural formations. The model opens new opportunities for tourism development, where virtual cave exploration can provide a unique experience for visitors. Creating this 3D model is a significant step in preserving and documenting cultural heritage, contributing to the scientific and cultural development of the region, and providing access to unique objects for researchers and the public.

Key words: laser scanning; 3D modeling; research; Medova cave; geometry caves; geodetic technologies; tourism; geomorphology; digital documentation of the cave.

Надійшла 15.10. 2023 р.