

ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ ПЕЧЕР: НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ПРОСТОРІВ НА ПРИКЛАДІ МЕДОВОЇ ПЕЧЕРИ ТА ПЕЧЕРИ МЛИНКИ

**Ігор Бубняк, Андрій Бубняк, Анатолій Віват, Тарас Марко,
Катерина Бойко**

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Карпінського, 6, Львів, Україна, 79013
e-mail: ihor.m.bubniak@lpnu.ua*

У статті розглянуто результати дослідження гіпсових карстових печер Млинка (Тернопільська область) та Медова (Львівська область), які належать до найцікавіших спелеологічних об'єктів Подільської височини. Мета роботи – створити високоточну цифрову 3D-модель внутрішнього простору печер з метою їх просторового аналізу, геологічної інтерпретації, оцінки морфологічних особливостей та можливості подальшого моніторингу геодинамічних процесів. Для досліджень застосовано комбінацію наземного лазерного сканування (TLS) з використанням сканера Leica ScanStation C10 та ручного мобільного лазерного сканера STONEX X120 GO, що забезпечило детальну зйомку як просторих залів, так і вузьких важкодоступних коридорів. Отримані хмари точок були оброблені в спеціалізованому програмному забезпеченні та інтегровані в геоінформаційні системи з використанням GNSS-референтних точок для точного розміщення моделей у глобальній координатній системі (UTM зона 35).

Особливу увагу приділено методиці збору, обробки та фільтрації даних, а також етапам побудови тривимірних моделей, виконаних із міліметровою деталізацією. На прикладі печери Млинка здійснено геологічну інтерпретацію структури гіпсового пласта баденського ярусу, встановлено роль інтрастратального карсту та визначено головні напрями розвитку тектонічних тріщин. У результаті обстеження Медової печери вперше виконано повне цифрове картографування об'єкта, ідентифіковано морфологічні особливості та створено точну просторову модель для подальшого аналізу.

Проведене дослідження демонструє ефективність використання сучасних технологій лазерного сканування для цілей геологічного картування підземних утворень, їх збереження, а також інтеграції в природоохоронні, наукові та туристично-освітні програми. Отримані результати можуть бути використані як основа для моніторингу стану печер, виявлення ризикових зон і створення віртуальних геотуристичних маршрутів.

Ключові слова: печери, лазерне сканування, гіпсовий карст, тривимірне моделювання, геоінформаційні системи, Поділля, печера Млинка, печера Медова, морфологічний аналіз, геоприв'язка.

Постановка проблеми. Печери – це природні підземні порожнини, що є досить великими для дослідження людиною [40; 28; 22].

Печери можуть формуватися внаслідок різних геологічних процесів. Тектонічні рухи спричиняють зміщення земної кори, що може створювати підземні порожнини. Диференціальна ерозія відбувається завдяки різним швидкостям розмивання гірських порід у різних ділянках, що також сприяє формуванню печер. Розчинення гірських порід під дією води, особливо в карстових ландшафтах, є одним із найпоширеніших механізмів утворення печер. Вулканічна активність може створювати печери через витікання

і подальше охолодження лави, утворюючи лавові трубки. Крім того, танення льодовиків спричиняє дренаж талих вод, що може утворювати льодовикові печери [40; 28].

Печери класифікують за процесами їх утворення та віком породи, у якій вони сформувалися. Первинні печери виникають одночасно з навколишньою породою, наприклад, лавові трубки, що формуються під час витікання лави.

Вторинні печери утворюються після формування породи, зазвичай унаслідок розчинення вапняку під дією води. Карстові печери є одними з найпоширеніших типів, оскільки вапнякові відклади легко піддаються розчиненню [40; 28].

Печери відіграють важливу роль у підтриманні екологічного балансу та є цінними геологічними об'єктами. Вони забезпечують середовище існування унікальних організмів та містять важливі мінеральні утворення, що дають змогу дослідникам вивчати геологічні процеси минулого.

Екологічні системи печер є унікальними, оскільки вони підтримують спеціалізовані організми, адаптовані до екстремальних умов, як-от низький рівень світла, стабільна температура та висока вологість. Деякі з цих організмів не трапляються більше ніде у світі. Ці екосистеми залежать від зовнішніх джерел органічної речовини, яка надходить із поверхні або виробляється хемосинтетичними бактеріями [31; 15; 29].

З геологічного боку, печери містять спелеотеми, як-от сталактити та сталагміти, що утворюються внаслідок осадження мінералів із води. Ці утворення є природними архівами змін клімату та геологічних процесів, оскільки містять інформацію про хімічний склад вод, які циркулювали через породи протягом тисячоліть [40; 31; 11].

Наукове та культурне значення. Печери мають значну наукову й культурну цінність, оскільки вони зберігають геологічну історію Землі, свідчення змін клімату та антропологічні сліди давніх цивілізацій. Унікальні характеристики роблять їх об'єктами як наукових досліджень, так і туристичного інтересу.

Геоспадщина печер є важливим складником природної та культурної спадщини. Вони мають естетичне, наукове та історичне значення і приваблюють туристів, що може створювати ризики для їх збереження. Тому важливим аспектом є баланс між дослідженням, популяризацією та охороною цих унікальних природних об'єктів [11; 21]. З історичного боку, печери використовували люди протягом багатьох століть як укриття, місця релігійних обрядів, поселення та археологічні об'єкти. Вони зберігають стародавні наскельні малюнки, артефакти та інші свідчення минулих епох, що дає змогу дослідникам отримувати нову інформацію про розвиток людства [21].

Середовище печер Печери є унікальним середовищем, яке характеризується специфічними умовами та мікробіологічними процесами. Вони містять різноманітні мікробні спільноти, що відіграють важливу роль у геологічних процесах, як-от мінералізація та вивітрювання порід. Ці організми адаптовані до екстремальних умов і можуть існувати навіть у повній темряві, використовуючи хемосинтез як джерело енергії [29; 15; 13].

Крім того, печери характеризуються стабільною температурою, високою вологістю та низьким рівнем освітлення. Такі умови створюють сприятливе середовище для розвитку спелеофауни, включно з бактеріями, грибами та безхребетними, які пристосувалися до життя в темряві. Завдяки цим стабільним параметрам печери можуть зберігати докази давніх кліматичних змін і слугувати природними архівами для наукових досліджень [22; 13].

У роботі [17] найбільш повно висвітлено питання, що стосуються вивчення печер.

Історія дослідження печер. Дослідження печер є важливим напрямом у природничих науках, що охоплює геологію, археологію, біологію та палеонтологію. Упродовж століть вчені з різних регіонів світу вивчали печери, розкриваючи їхню геологічну будову, екосистеми та сліди людської діяльності. У статті представлено ключові дослідження

історії печерних досліджень у різних частинах світу, що вплинули на розуміння цих природних утворень.

Іаломіцька печера, Румунія. Іаломіцька печера є одним із найважливіших карстових об'єктів у Румунії. Дослідження цієї печери дали змогу створити хронологічну послідовність основних етапів її вивчення, включно з документами, статтями та науковими працями [23].

Печера Білла Сургам, Індія. Цей печерний комплекс має найдовший запис археологічних та палеоекологічних досліджень в Індії, що сягає початку XIX століття. Результати розкопок значно розширили знання про палеолітичне заселення на субконтиненті [24].

Печери нагір'я Гватемали. Дослідження печер у центральній частині Гватемали були важливими для розуміння взаємодії між нагір'ям і низинами. Вони надали важливі дані про стародавні ритуали, владу еліт, виробництво кераміки та торгівлю між регіонами [41].

Печера Уршилор, Румунія. Систематичні розкопки цієї печери виявили значні фауністичні комплекси пізнього плейстоцену. Аналіз осадових відкладів та скам'янілостей дав змогу простежити еволюцію печери протягом останніх 300 000 років [12].

Печери Франції та Іспанії. Дослідження наскельних малюнків у декількох печерах Франції та Іспанії надали важливу інформацію про періоди людської присутності та мистецької активності. Радіовуглецевий аналіз показав, що ці зображення були створені в період від 33 000 до 14 000 років тому [37].

Печери Хайда-Гваї, Канада. Дослідження цих карстових печер розкрили палеонтологічний запис, що датується від 13 400 до 11 000 років тому, а також артефакти людської діяльності віком від 12 600 до 11 000 років. Це підкреслює екологічне та культурне значення печер у ранньому постльодовиковому періоді [16].

Печери Нахаль-Меарот, Ізраїль. Ці печери досліджуються з 1920-х років і містять довгий культурний шар, що охоплює принаймні 600 000 років. Вони важливі для вивчення як неандертальців, так і ранніх сучасних людей, а також культурних змін [18].

Печера Вайт-Скар, Велика Британія. Статті про цю печеру містять історію її відкриття, дослідження, геологічне значення та розвиток протягом двох століть [14].

Археологія печер у Словенії. Практика та дискурс археологічних досліджень печер у Словенії відображають ширші європейські традиції. Вони формувалися під впливом регіональної історії, національних дослідницьких програм і видатних учених протягом останніх 120 років [32] демонструючи важливість цих природних об'єктів для розуміння минулого людства, палеоекології та розвитку карстових систем.

Печери України та Тернопільського регіону. В Україні, особливо в західних регіонах, розташовані численні карстові печери, які мають велике наукове та туристичне значення.

Західна Україна славиться своїми гіпсовими карстовими печерами, одними з найдовших у світі [2]. Вони є прикладами гіпогенезного артізіанського спелеогенезу та еволюції інтрастратального карсту [26].

Печера «Попелюшка», що розташована в Буковинському регіоні, є однією з найбільших гіпсових печер. Вона сформувалася в міоценовій серії порід і містить унікальні геологічні утворення, як-от палеокарстові форми та карстові тріщини, заповнені алохтонним матеріалом [7].

Геологічні умови формування печер є складними, оскільки вони залежать від взаємодії між гіпсовими породами та вищерозташованими карбонатними шарами. Це впливає на морфологію печер і спричиняє унікальні особливості їх внутрішньої структури [3; 4; 7].

Печера «Буковинка», що розташована в Чернівецькій області, стала об'єктом палеонтологічних, ромагнітних і палеомагнітних досліджень. Ці дослідження допомогли встановити кліматичні умови пізнього плейстоцену та варіації геомагнітного поля впродовж голоцену [1; 9].

Україна має багату історію підземних культових споруд, зокрема православних печерних храмів та монастирів. Вони мають значну архітектурну й історичну цінність та демонструють антропогенні фактори, що вплинули на їх формування [8].

Один із найвідоміших печерних монастирських комплексів, Києво-Печерська лавра, внесений до списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО. Його печери перебувають у критичному стані та потребують реставрації. Нині проводять роботи зі створення 3D-моделей, що допомагають у процесах їх збереження [6; 33].

Печери України є не лише геологічними чудесами, а й важливими об'єктами наукових досліджень. Вони містять інформацію про палеоекологічні умови, фауну кайнозою та кліматичні зміни, що відбувалися упродовж плейстоцену [36].

Печери України, включно з Тернопільським регіоном, мають велике геологічне, історичне та культурне значення. Вони надають цінні дані для дослідження еволюції Землі, збереження біорізноманіття та розвитку туристичної галузі. Майбутні дослідження мають бути спрямовані на збереження цих унікальних природних об'єктів і їх інтеграцію у світову наукову спільноту.

Методи знімання печер. Знімання печер є важливим процесом для наукових, туристичних та інженерних цілей. З розвитком технологій методи картографування підземних порожнин значно вдосконалилися, що дає змогу отримувати високоточні цифрові моделі печер. Розглянемо традиційні та сучасні методи знімання печер, їх переваги і недоліки.

Вимірювання за допомогою рулеток, компасів і кутомірів. Один із найдавніших методів картографування печер полягає у вимірюванні відстаней за допомогою рулеток, напрямків за допомогою компасів і нахилу поверхні за допомогою кутомірів. Отримані дані використовують для побудови плану печери шляхом ручного креслення [39].

Тахеометричні методи використовують для отримання загальної форми печери, але вони менш ефективні для швидкісного й високоточного картографування складних поверхонь [19].

Наземне лазерне сканування (TLS). Один із найточніших методів, що дає змогу отримувати мільйони точок у 3D-координатах, створюючи детальні моделі внутрішньої будови печер. Цей метод забезпечує швидке отримання високоточної інформації про геометрію печер [25; 42].

Мобільне лазерне картографування (Mobile LiDAR Mapping). У цьому методі оператор переносить легкий лазерний сканер, збираючи дані в режимі реального часу. Це значно швидший підхід, порівняно з традиційними статичними вимірами, і допомагає отримувати детальні тривимірні моделі [43].

Цифрова фотограмметрія. Використання сферичних камер для швидкого збору даних, що обробляють у 3D-моделі печер. Цей метод є альтернативним варіантом для швидкого отримання цифрових даних.

Метод «Structure-from-Motion» (SfM). Дає змогу створювати тривимірні моделі шляхом об'єднання знімків із різних точок. Часто використовують разом із лазерним скануванням для деталізації карт печер [38].

Автономні літальні апарати (UAVs). Безпілотники, оснащені камерами глибини та LiDAR-сенсорами, можуть виконувати знімання печер у повній темряві, зменшуючи ризики для дослідників. Вони забезпечують зворотний зв'язок у режимі реального часу та працюють у складних умовах [35].

Знімання затоплених печер. Знімання підводних печер здійснюється за допомогою ручних ехолотів та сигнальних шнурів, що допомагають картографувати занурені проходи [34].

Тривимірне картографування морських печер. Цей метод використовує портативні ехолоти для отримання детальних моделей морських печер [20].

Георадар (GPR) у дослідженні печер. Георадар (Ground Penetrating Radar, GPR) є важливим інструментом у дослідженні печер, оскільки він дає змогу отримати детальну інформацію про приховані структури та осадові відкладення без необхідності фізичного буріння або розкопок. Поєднання GPR із лазерним скануванням дає змогу створювати високоточні тривимірні моделі печерних систем, включно з детальним аналізом геологічних шарів і можливими порожнинами. Завдяки цьому методу можна також виявляти структурні особливості печер, які не помітні при звичайному огляді, що робить його цінним інструментом для археологічних, геологічних і спелеологічних досліджень.

Інтеграція з ГІС. Сучасні методи знімання печер активно використовують геоінформаційні системи (далі – ГІС) для аналізу та візуалізації отриманих даних. Інтеграція лазерного сканування з ГІС дає змогу геоприв'язати отримані моделі та поєднати їх з іншими картографічними даними. Це дає змогу проводити просторовий аналіз взаємодії поверхневих і підземних структур, що важливо для розуміння карстових процесів, моніторингу змін у печерах та управління природними ресурсами [30].

Використання ГІС у спелеологічних дослідженнях також полегшує доступ до геоданих, оскільки дає змогу ефективно зберігати, аналізувати та візуалізувати інформацію про печерні системи. Це відкриває нові можливості для створення інтерактивних карт, що можуть бути корисними як для науковців, так і для туристичних або охоронних організацій.

Загалом, майбутнє картографування печер є перспективним, впровадження новітніх технологій сприятиме не лише підвищенню точності досліджень, а й безпечному та ефективному вивченню підземних систем.

Переваги сучасних методів знімання печер. Сучасні технології картографування печер мають низку переваг, що значно покращує якість отриманих даних і безпеку дослідників. Однією з основних переваг є висока точність та деталізація цифрових моделей, що забезпечує точне відтворення підземних структур. Завдяки цьому можна детально аналізувати морфологію печер, процеси карстоутворення й динаміку підземних вод.

Ще одним важливим фактором є швидке отримання просторової інформації. Лазерне сканування та фотограмметрія дають змогу значно скоротити час, необхідний для створення картографічних матеріалів, порівняно з традиційними методами. Це особливо важливо для досліджень у складних умовах, де доступ до печер може бути обмеженим.

Можливість картографування складних геометричних структур є ще однією перевагою сучасних технологій. Використання 3D-сканування дає змогу отримати точні цифрові моделі печер із різноманітними формами, вузькими проходами та вертикальними шахтами, що важко піддаються традиційним методам вимірювання.

Крім того, сучасні методи зменшують ризики для дослідників під час знімання. Автономні дрони та мобільні сканери допомагають виконувати картографування без необхідності перебування людини у важкодоступних або небезпечних зонах печер. Це суттєво підвищує безпеку експедицій та мінімізує вплив людини на природне середовище печер.

Виклики сучасних методів знімання печер. Попри значні переваги, сучасні методи картографування печер мають низку викликів, які обмежують їх широке застосування. Одним із головних факторів є висока вартість обладнання. Лазерні сканери, високоточні дрони та програмне забезпечення для обробки даних потребують значних фінансових вкладень, що може бути проблемою для малих дослідницьких груп і наукових установ.

Ще одним викликом є технічна складність обробки даних. Отримані лазерним скануванням або фотограмметрією великі обсяги інформації потребують потужних

комп'ютерних систем і складного програмного забезпечення для їх обробки та аналізу. Це ускладнює оперативне отримання результатів і потребує значних ресурсів [42].

Крім того, необхідність спеціалізованих навичок ускладнює впровадження новітніх технологій у широкомасштабні дослідження. Для ефективного застосування лазерного сканування або геоінформаційних систем необхідно залучати фахівців із високою кваліфікацією, що також впливає на загальну вартість досліджень.

Незважаючи на ці виклики, розвиток технологій у сфері картографування печер продовжується і перспективи їх застосування розширюються завдяки автоматизації процесів та здешевленню обладнання.

Перспективи розвитку. Розвиток технологій знімання печер не стоїть на місці, і найближчими роками можна очікувати впровадження нових інновацій, які покращать ефективність та доступність цих методів. Однією з ключових тенденцій є мініатюризація обладнання. Сучасні технології дають змогу створювати компактніші та мобільніші лазерні сканери, дрони й сенсори, що робить картографування печер більш доступним і менш затратним [42]. Це особливо важливо для дослідження важкодоступних або вузьких печерних проходів, де великі прилади не можуть бути використані.

Ще однією перспективною тенденцією є комбінування UAV і фотограмметрії. Поєднання повітряної фотограмметрії з наземним лазерним скануванням дає змогу отримати комплексну картину як поверхневих, так і підземних об'єктів. Це надає нові можливості для більш детального аналізу печерних систем, їх морфології та екологічних умов [42]. Завдяки таким технологічним інтеграціям можна покращити точність геоприв'язки печер, що особливо важливо для великих і складних систем печерних лабіринтів.

Окрім цього, подальший розвиток технологій штучного інтелекту та машинного навчання дасть змогу автоматизувати обробку отриманих даних. Використання алгоритмів аналізу тривимірних моделей може значно скоротити час, необхідний для обробки великих обсягів даних, та спростити інтерпретацію результатів.

Загалом, майбутнє картографування печер є перспективним, впровадження новітніх технологій сприятиме не лише підвищенню точності досліджень, а й безпечному та ефективному вивченню підземних систем.

Загалом, використання сучасних методів картографування печер дає змогу значно покращити якість і точність отриманих даних, що важливо для наукових, екологічних і культурних досліджень.

Лазерне сканування стало важливим інструментом для вивчення природних підземних утворень, зокрема печер. Традиційні методи картографування, як-от геодезичні вимірювання та фотограмметрія, не завжди забезпечують достатню точність й ефективність при дослідженні складних підземних середовищ. Використання сучасних технологій, таких як наземне лазерне сканування (TLS) та ручні сканери, дає змогу отримувати високоточні 3D-моделі печер, що є корисними для геологічних досліджень, моніторингу змін і збереження унікальних природних об'єктів.

У роботі розглядають приклади застосування лазерного сканування для дослідження Медової печери (Львів) та печери Млинка (Тернопільська область). В обох випадках використано комбінацію наземного лазерного сканування та ручного сканера Stonex X120 GO, що дало змогу отримати високоточні тривимірні моделі.

Методологія дослідження. Дослідження печери Млинка проводилося з використанням сучасних технологій лазерного сканування, що дало змогу створити високоточну тривимірну модель її внутрішньої структури. Основна мета методики – отримати детальні просторові характеристики печери, оцінити її геологічні особливості, а також виявити потенційні зміни й деформації. Для цього використовували комбінацію

стаціонарного та мобільного лазерного сканування, що забезпечило комплексний підхід до збору даних.

Процес дослідження передбачав попередню підготовку, визначення ключових точок сканування, проведення вимірювань та подальшу обробку даних за допомогою геоінформаційних систем. Завдяки інтеграції отриманих даних у ГІС стало можливим здійснення просторового аналізу та візуалізації внутрішньої структури печери, що значно підвищило ефективність дослідження.

Обладнання та технології. У дослідженні печери Млинки застосовували сучасні високоточні інструменти та програмні засоби, що забезпечили детальне картографування її структури.

Лазерні сканери. Для збору геометричних характеристик печери використовували такі лазерні сканери: Leica ScanStation C10 – стаціонарний сканер із високою точністю вимірювань, який дає змогу отримувати хмару точок із міліметровою роздільною здатністю STONEX X120 GO – мобільний лазерний сканер, який забезпечував швидке сканування вузьких проходів та важкодоступних зон печери (рис. 1).

Для створення цифрових моделей використовували такі технології: наземне лазерне сканування (TLS) – застосоване для загального картографування печер. Ця технологія дає змогу отримати високу точність вимірювань та побудову тривимірної моделі з високою деталізацією.

Інтеграція даних у ГІС – отримані хмари точок обробляли та аналізували в геоінформаційних системах для подальшого просторового аналізу та візуалізації печерних утворень. GNSS-референтні точки – використовували для геоприв'язки моделей у загальній координатній системі (UTM 35).



Рис. 1. Використані прилади для досліджень а)сканер Leica ScanStation C10 та б) ручний лазерний сканер STONEX X120 GO

Процес збору та опрацювання даних. Процес збору та обробки даних під час дослідження печери Млинки передбачав кількох ключових етапів, які дали змогу отримати детальну тривимірну модель її внутрішньої структури (див. рис. 2).

На першому етапі здійснювалася підготовка до сканування, яка передбачала визначення ключових точок для розміщення сканерів, встановлення міток і контрольних точок (GCPs), а також налаштування обладнання відповідно до особливостей підземного середовища. Важливим аспектом цього етапу було планування маршруту для забезпечення оптимального покриття всієї печерної системи.



Рис. 2. Блок-схема методики створення віртуальної геологічної моделі

Далі відбувалося сканування печер, яке проводилося за допомогою різних типів обладнання. Стационарні лазерні сканери (наприклад, Leica ScanStation C10) використовували для детального сканування великих порожнин, тоді як мобільні лазерні сканери (STONEX X120 GO) дали змогу отримати точні дані у вузьких проходах і важкодоступних ділянках. Дані збирали з різних положень, що забезпечувало мінімізацію тінювих зон в отриманій хмарі точок (рис. 3).

Після збору даних розпочинався етап обробки, який містив формування хмари точок, фільтрацію шумів, корекцію можливих спотворень та об'єднання даних із різних точок для створення цілісної моделі печери. Фільтрація виконувалася для видалення зайвих відбиттів лазера або неточностей, спричинених умовами сканування.

Наступним важливим етапом була геоприв'язка, яка здійснювалася з використанням GNSS-приймачів. Координати контрольних точок визначалися з високою точністю, що допомагало прив'язати отриману хмару точок до глобальної системи координат.

Це давало змогу інтегрувати дані в ГІС для подальшого аналізу.

Останнім етапом була побудова 3D-моделей, яка здійснювалася у спеціалізованому програмному забезпеченні, як-от Leica Cyclone 3DReshaper та Move. Ці програми давали змогу не лише створити цифрову репрезентацію печери, а й провести структурний аналіз. Інтеграція отриманих моделей у ГІС-системи давала змогу виконувати просторовий аналіз та розробляти інтерактивні карти печерної системи.

Усі отримані дані стали основою для детальних досліджень морфологічних особливостей печери, а також її довготривалого моніторингу та візуалізації для наукових, освітніх і туристичних цілей.

Результати досліджень. Печера Млинки (рис. 4) розташована в межах Подільської височини, що є частиною західної околиці Східноєвропейської платформи. Вона сформована в гіпсових відкладах середнього міоцену (баденський ярус), які поширені вздовж південно-західного краю платформи. Ці відклади входять до складу тираської формації і містять гіпс та карбонатні породи [27].



Рис. 3. Сканування на кількох рівнях у різних частинах печери для отримання максимально точних даних про її геометрію

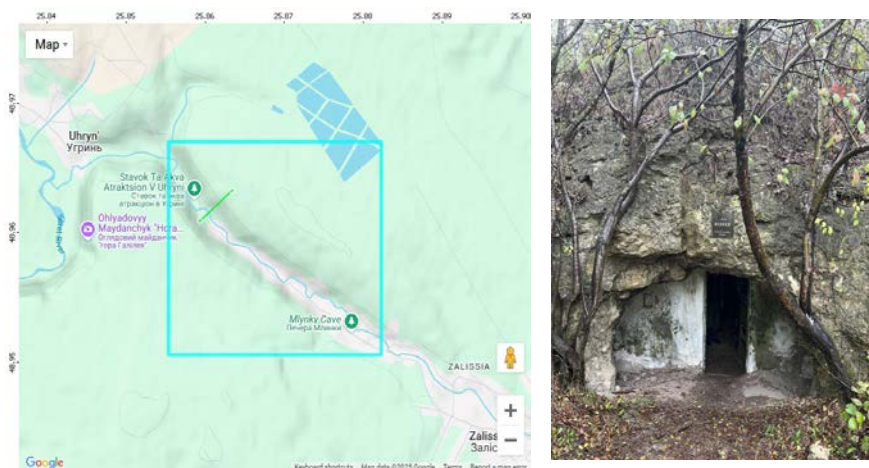


Рис. 4. Положення печери Млинки

Гіпсові пласти печери Млинки (рис. 5) належать до інтрастратального карсту, який формувався в умовах багатоярусної артезіанської системи. Гіпсовий пласт має потужність від 10 до 25 м і містить численні текстурні та структурні неоднорідності. Важливу роль у його формуванні відіграли тектонічні рухи, які сприяли утворенню багатоярусних тріщинних систем, що визначили морфологію печери [27].

Формування печери відбувалося внаслідок розвитку артезіанського карсту, де висхідні підземні потоки розчиняли гіпс у сприятливих гідродинамічних умовах. Спелеогенез у регіоні зумовлений існуванням багатоярусної мережі тектонічних тріщин, які контролюють морфологію підземних ходів. Основні тріщини простягаються в північно-західному та північно-східному напрямках, що відповідає регіональним структурним тенденціям [27].

Печера Млинки розташована в межах Волино-Подільського артезіанського басейну, де міоценові глини відіграють роль водотривкого покриву. Гіпсовий пласт спочатку виконував роль водопору, але внаслідок карстових процесів перетворився на водоносний горизонт з добре розвинутою системою тріщинної проникності. Підземні води формують висхідні потоки, які сприяють подальшому розчиненню гіпсу та розширенню печерних порожнин [27].

Печера Млинки є типовим прикладом гіпсового карсту Подільської височини. Вона сформувалася внаслідок розчинення гіпсу висхідними підземними потоками, що циркулювали через тектонічні тріщини в умовах артезіанської системи. Геологічна будова регіону, структурні особливості гіпсового пласта та гідрогеологічні умови визначили морфологію печери, її багатоярусну структуру й розвиток підземних ходів.

Під час дослідження печери Млинки створено високоточну 3D-модель з деталізацією до кількох міліметрів (рис. 6, 7). Це дало змогу отримати вичерпну інформацію про внутрішню морфологію печери, її структуру та можливі зміни в майбутньому.

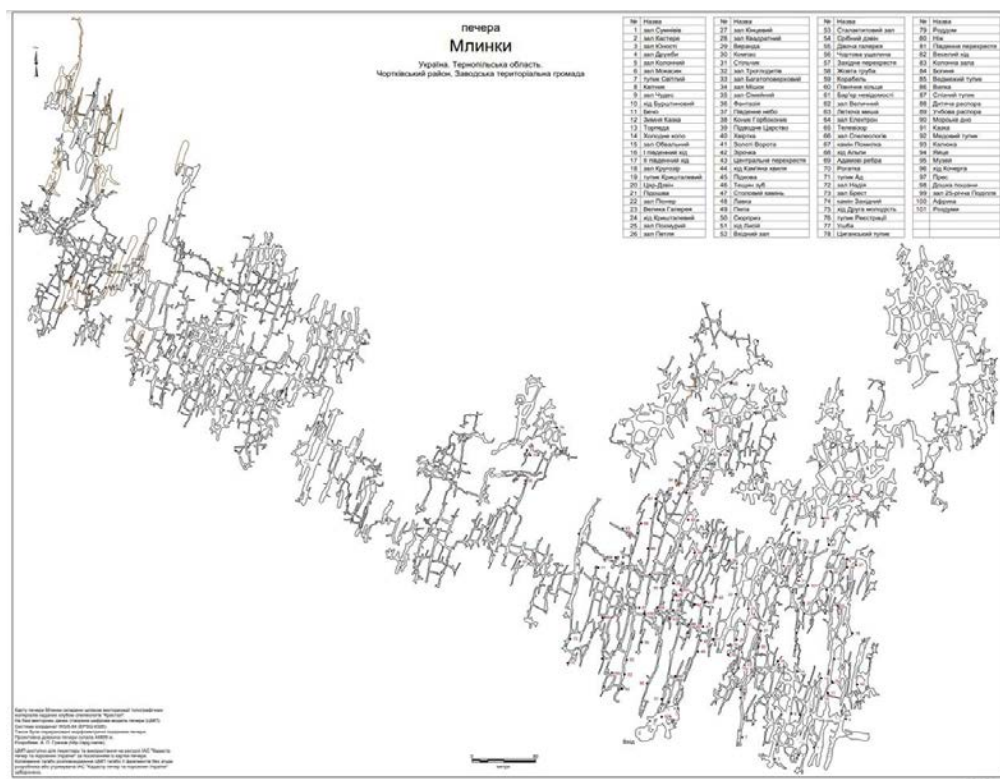


Рис. 5. Карта ходів печери Млинки

Під час аналізу виявлено ключові морфологічні особливості, серед яких складна система коридорів, різноманітні спелеотеми (зокрема, сталактити) та розвинена мережа тріщин.

Наші результати з вивчення тріщин, насамперед їх орієнтація, дуже добре узгоджуються з такими отриманими традиційними методами. На рисунку 8 порівняно

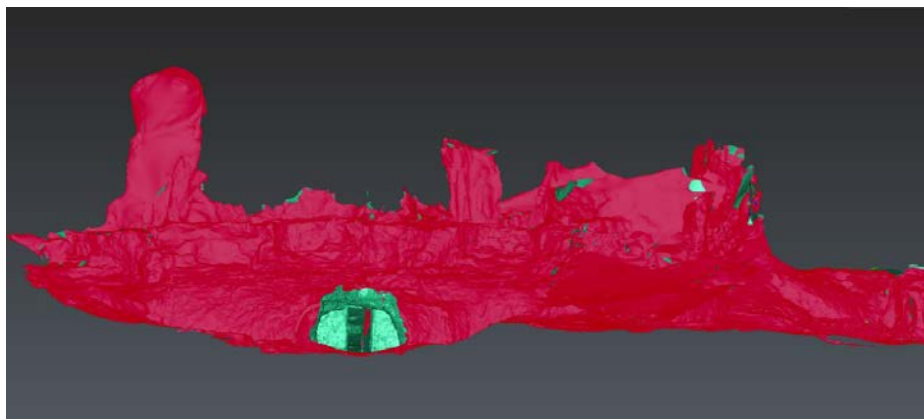


Рис. 6. Хмара точок, отримана в результаті ручного лазерного сканування частини ходів печери Млинка

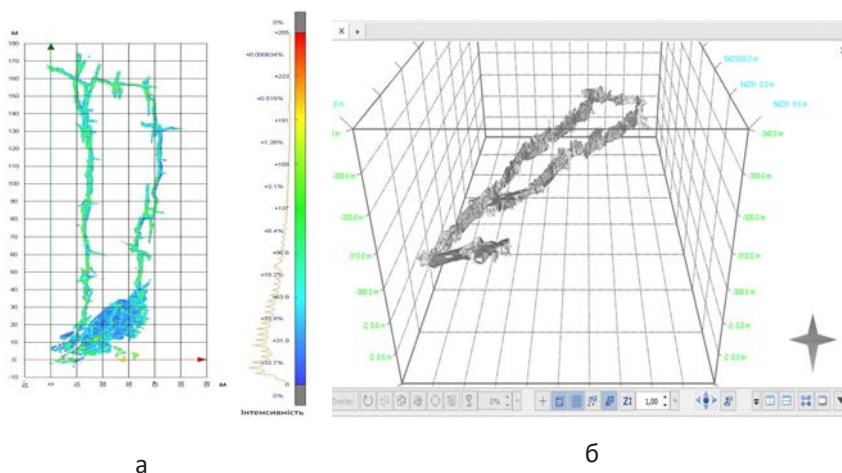


Рис. 7. а – 3D-Модель ділянки печери Млинка, відображена в інтенсивності (вигляд зверху);
б – 3D-модель частини ходів печери Млинка завантажена в програму Move

розо-діаграми тріщин однієї з ділянок печери Млинка. Тут показано результати опрацювання тріщин із використанням 3D-моделі, одержаної в цьому дослідженні, та класичні розо-діаграми, побудовані за результатами вимірів аналоговим геологічним компасом [5].

Дослідження структури печери дало змогу виконати аналіз геологічної стабільності, що містить визначення напрямків розвитку тріщин й оцінку ризиків можливих зсувів.

Уперше в процесі картографування застосовано ручний лазерний сканер, що дало змогу отримати дані навіть у найвужчих і найважкодоступніших ділянках печери. Це значно покращило якість і повноту отриманої 3D-моделі, забезпечивши можливість детально вивчення підземного простору.

Отримані результати сприяють подальшому моніторингу печери, її збереженню та використанню в наукових і туристичних цілях.

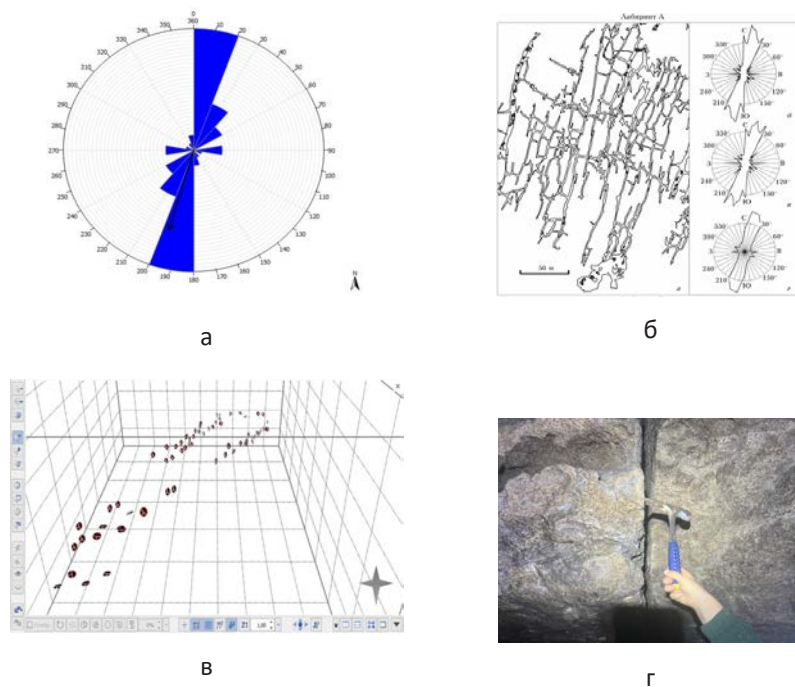


Рис. 8. а – розо-діаграма тріщин, побудована з використанням 3D-моделі; б – розо-діаграми тріщин цієї ж ділянки з роботи [5]; в – елементи залягання тріщин у програмі Move; г – типові тріщини печери Млинки

Медова печера: результати дослідження. Це ще один об'єкт, де група дослідників з Інституту геодезії національного університету Львівська політехніка проводила пілотні дослідження з використання новітніх технологій для вивчення печер [10].

Медова печера розташована в околицях міста Львова в межах Подільської височини (рис. 9).



Рис. 9. Положення печери Медова у Львові

Під час дослідження Медової печери застосовано метод наземного лазерного сканування (TLS), який дав змогу отримати детальні дані про внутрішню структуру печери. Високошвидкісне сканування забезпечило визначення просторових координат точок та створення тривимірної візуалізації печери в режимі реального часу.

Основні результати дослідження. Отримана хмара точок, що описує внутрішню структуру Медової печери, з високою точністю (рис. 9).

Виконано побудову розрізів печери, які допомагають аналізувати її морфологічні особливості та оцінювати просторові характеристики (рис. 10).

Проведено ідентифікацію «мертвих зон» ще на етапі польових робіт, що дало змогу скоригувати процес сканування для отримання повного охоплення.

Також уперше побудовано план Медової печери (рис. 11).

Використання TLS забезпечило неінвазивний метод збору просторової інформації без необхідності багаторазового сканування з різних точок, як це часто необхідно у фотограмметричних методах.

Отримані результати дають змогу створити високоточну цифрову 3D-модель печери, яка може бути використана для подальшого аналізу геологічних характеристик, оцінки стабільності порід та моніторингу змін у підземному просторі.

Висновки. Лазерне сканування виявилось ефективним інструментом для детального аналізу печер. У дослідженні печери Млинки та Медової печери вдалося отримати високоточні цифрові моделі, що відкривають нові можливості для наукових і прикладних досліджень. Подальший розвиток технологій сканування дасть змогу ще точніше оцінювати морфологію печер та їхні зміни в часі.



Рис. 10. Модель хмари точок Медової печери та розташування маркерів [10]

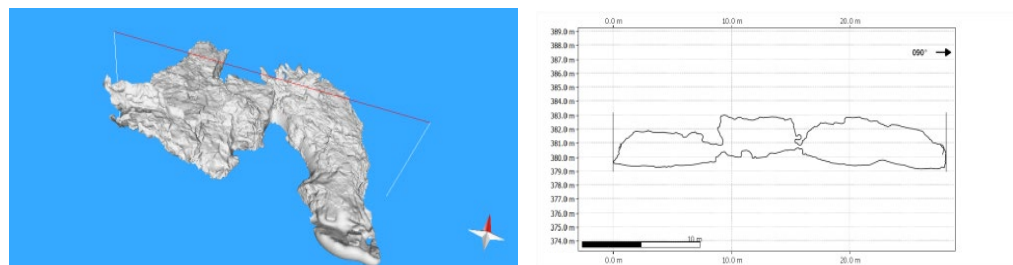


Рис. 11. Перетин Медової печери та розташування маркерів [10]

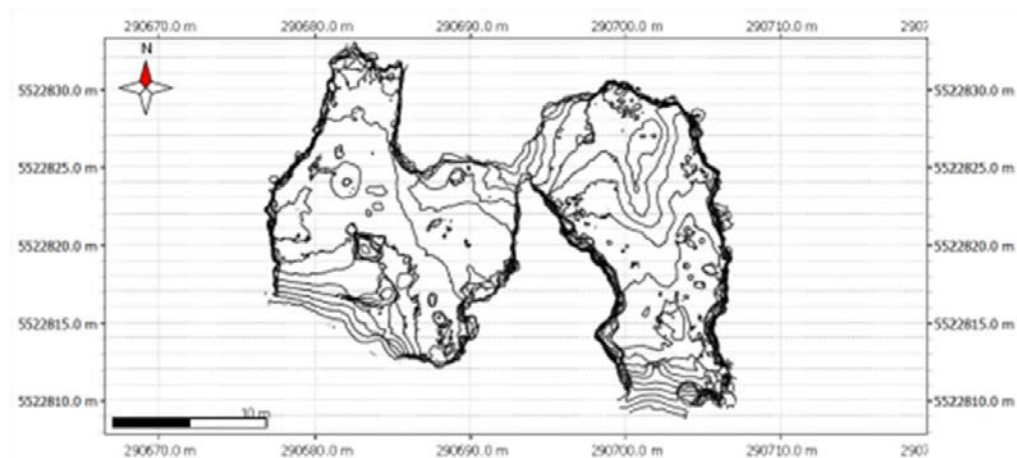


Рис. 12. План Медової печери [10]

Перспективи подальших досліджень:

- використання мобільних лазерних сканерів для швидкого картографування великих печерних систем;
- інтеграція даних з дронів для створення комплексних моделей поверхні та підземних структур;
- розробка методик автоматичного аналізу геологічних змін на основі багаточасових сканувань.

Так, сучасні методи лазерного сканування відкривають нові горизонти для геологічних, туристичних і природоохоронних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондар К. М., Ридуш Б. Т., Гордієнко Т. Р. Петромагнітні та палеомагнітні дослідження пухких відкладів печери Буковинка (Чернівецька обл., Україна). 10-та Міжнародна конференція EAGE з геоінформатики: теоретичні та прикладні аспекти: тези доп. Київ, 2011. С. СР-240. European Association of Geoscientists & Engineers.
2. Зімелєс Ю. З., Снігур В. А. Печера Млинки. Печера Угринська. Тернопіль : ФОП Шабала Н.Є., 2012. 88 с.
3. Климчук О. Б. Гідрогеологічні умови розвитку і генезис карстових порожнин в неогенових сульфатних відкладах Волино-Подільського артезіанського басейну : автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 1999. 25 с.
4. Климчук О. Б. Розвиток теорії гіпогенного карстогенезу: наукові та практичні застосування (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 27 вересня 2017 р.). *Вісник Національної академії наук України*. 2017. № 11. С. 9–29.
5. Покалюк В. В., Аронський А. А., Шафранська Н. В., Матошко А. А. Тріщинуватість печер Поділля в аспекті ротаційних і тектонічних причин утворення. *Геофізичний журнал*. 2012. Т. 34. С. 101–112.
6. Шульц Р. В., Білоус М. В., Гончарюк О. М. Моніторинг пам'яток архітектури за допомогою даних наземного лазерного сканування. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2016. № 46. С. 202–207.
7. Andreychouk V., Worobiec E., Gedl P., Worobiec G. Origin of the palaeokarst in Miocene evaporites on the SW periphery of the Eastern European Platform in the light of palynological studies: a case study of the Zoloushka Cave, Bukovina, Western Ukraine. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. 2014. Vol. 84. P. 30–41.
8. Bertash A., Keypen-Warditz D., Levoshko S. Orthodox cave churches and monasteries of the V–XX centuries in Russia and Ukraine: architectural traditions and technologies. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. P. 1829–1835.

9. Bondar K., Ridush B. Rockmagnetic and palaeomagnetic studies of unconsolidated sediments of Bukovynka Cave (Chernivtsi region, Ukraine). *Quaternary International*. 2015. Vol. 357. P. 125–135.
10. Bubniak I., Oliinyk M., Tsikhon S., Golubinka Yu., Marko T. 3D model of Medova Cave, Lviv. Geodesy, *Cartography and Aerial Photography*. 2023. Issue 98. P. 31–41.
11. Columbu A., Calabrò L., Chiarini V., De Waele J. Stalagmites: from science application to museumization. *Geoheritage*. 2021. Vol. 13. P. 1–11.
12. Constantin S., Robu M., Munteanu C. M., Petculescu A., Vlaicu M., Mirea I., та ін. Reconstructing the evolution of cave systems as a key to understanding the taphonomy of fossil accumulations: The case of Urşilor Cave (Western Carpathians, Romania). *Quaternary International*. 2014. Vol. 339. P. 25–40.
13. Coombes M.A., La Marca E.C., Naylor L.A., Piccini L., De Waele J., Sauro F. The influence of light attenuation on the biogeomorphology of a marine karst cave: a case study of Puerto Princesa Underground River, Palawan, the Philippines. *Geomorphology*. 2015. Vol. 229. P. 125–133.
14. Craven S.A. White Scar Cave, Chapel-le-Dale, North Yorkshire, England. *Cave and Karst Science*. 2006. Vol. 33, No. 2. P. 79.
15. Engel A.S. Microbes. In: *Encyclopedia of Caves* / eds. W. B. White, D. C. Culver. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2019. P. 691–698.
16. Fedje D., Mackie Q., McLaren D., Wigen B., Southon J. Karst caves in Haida Gwaii: Archaeology and paleontology at the Pleistocene–Holocene transition. *Quaternary Science Reviews*. 2021. Vol. 272. Article 107221.
17. Ford D., Williams P.D. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 562 p.
18. Frumkin A., Weinstein-Evron M. Nahal Me'arot caves: archive of human evolution against the background of prolonged karstic processes. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement*. 2021. Vol. 62. P. 283–300.
19. Gallay M., Kaňuk J., Hochmuth Z., Meneely J.D., Hofierka J., Sedlák V. Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology*. 2015. Vol. 44, No. 3. P. 277–291.
20. Gerovasileiou V., Trygonis V., Sini M., Koutsoubas D., Voultsiadou E. Three-dimensional mapping of marine caves using a handheld echosounder. *Marine Ecology Progress Series*. 2013. Vol. 486. P. 13–22.
21. Goldberg P., Sherwood S.C. Deciphering human prehistory through the geoarchaeological study of cave sediments. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*. 2006. Vol. 15, No. 1. P. 20–36.
22. Goltenboth F., Timotius K.H., Milan P.P., Margraf J. (eds.). Ecology of insular Southeast Asia: the Indonesian archipelago. Amsterdam : Elsevier, 2006. 739 p.
23. Grigore S. A brief history of Ialomița Cave (Dâmbovița County, Romania). *Annales d'Université "Valahia" Târgoviște. Section d'Archéologie et d'Histoire*. 2020. Vol. 22, No. 1. P. 113–120.
24. Haslam M., Korisettar R., Petraglia M., Smith T., Shipton C., Ditchfield P. In Foote's steps: the history, significance and recent archaeological investigation of the Billa Surgam caves in southern India. *South Asian Studies*. 2010. Vol. 26, No. 1. P. 1–19.
25. Hofierka J., Hochmuth Z., Kaňuk J., Gallay M., Gessert A. Mapovanie jaskyne Domica pomocou terestrického laserového skenovania. *Geografický časopis*. 2016. Vol. 68, No. 1. P. 3–24.
26. Klimchouk A. Ukraine giant gypsum caves. In: *Encyclopedia of Caves* / eds. W. B. White, D. C. Culver. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2019. P. 827–833.
27. Klimchouk A.V., Andreychouk V.N., Turchinov I.I. The structural prerequisites of speleogenesis in gypsum in the Western Ukraine. 2nd ed., revised. Sosnowiec–Simferopol : University of Silesia, Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009. 96 p.

28. Kempe S. Morphology of speleothems in primary (lava-) and secondary caves. In: Treatise on geomorphology / ed. J. F. Shroder. Vol. 6. Amsterdam: Elsevier, 2013. P. 251–264.
29. Koning K., McFarlane R., Gosse J.T., Lawrence S., Carr L., Horne D., та ін. Biomineralization in cave bacteria—popcorn and soda straw crystal formations, morphologies, and potential metabolic pathways. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. Article 933388.
30. Liu X., Shan Y., Ai G., Du Z., Shen A., Lei N. A scientific investigation of the Shangfang Mountain Yunshui Cave in Beijing based on LiDAR technology. *Land*. 2024. Vol. 13, No. 6.
31. Moseley M. Size matters: scalar phenomena and a proposal for an ecological definition of ‘cave’. *Cave and Karst Science*. 2009. Vol. 35, No. 3. P. 89–94.
32. Prijatelj A. History of cave archaeology in Slovenia: Politics, institutions, individuals, methods and theories. *Cave and Karst Science*. 2011. Vol. 38, No. 3. P. 137–143.
33. Shults R., Bilous M., Kovtun V. Monitoring and preservation of the Kyiv Pechersk Lavra Caves. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. Vol. 42. P. 1053–1058.
34. Straub R. Introduction to underwater cave surveying. *Mitteilungen des Verbandes der Deutschen Höhlen- und Karstforscher*. 2015.
35. Tabib W., Goel K., Yao J., Boirum C., Michael N. Autonomous cave surveying with an aerial robot. *IEEE Transactions on Robotics*. 2021. Vol. 38, No. 2. P. 1016–1032.
36. Urban J. Caves and karst sites of Poland as a contribution to geological heritage of Central Europe. *Polish Geological Institute Special Papers*. 2004. Vol. 13. P. 89–96.
37. Valladas H., Kaltnecker E., Quiles A., Tisnérat-Laborde N., Genty D., Arnold M., та ін. Dating French and Spanish prehistoric decorated caves in their archaeological contexts. *Radiocarbon*. 2013. Vol. 55, No. 3. P. 1422–1431.
38. Vassilakis E., Konsolaki A. Quantification of cave geomorphological characteristics based on multi source point cloud data interoperability. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 2022. Vol. 63. P. 265–277.
39. White W.B. Surveying caves. In: *Encyclopedia of Caves* / eds. W. B. White, D. C. Culver. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2019. P. 1013–1022.
40. White W.B., Culver D.C. Cave, definition of. In: *Encyclopedia of Caves* / eds. W. B. White, D. C. Culver. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2019. P. 255–259.
41. Woodfill B.K., Guenter S., Monterroso M. Changing patterns of ritual activity in an unlooted cave in central Guatemala. *Latin American Antiquity*. 2012. Vol. 23, No. 1. P. 93–119.
42. Zhou W., Gao Z., Li H., Xiong K. Research on karst cave mapping based on terrestrial laser scanning. *Carsologica Sinica*. 2022.
43. Zlot R., Bosse M. Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave & Karst Studies*. 2014. Vol. 76, No. 3. P. 191–202.

REFERENCES

1. Bondar, K.M., Rydush, B.T., & Hordiienko, T.R. (2011). Petromahnitni ta paleomahnitni doslidzhennia pukhkykh vidkladiv pechery Bukovynka (Chernivetska obl., Ukraina) [Petromagnetic and paleomagnetic investigations of unconsolidated deposits in the Bukovynka Cave (Chernivtsi Region, Ukraine)]. In 10-ta Mizhnarodna konferentsiia EAGE z heoinformatyky: teoretychni ta praktychni aspekty: tezy dop. (p. CP-240). Kyiv: European Association of Geoscientists & Engineers [in Ukrainian].
2. Zimels, Yu.Z., Snihur, V.A. (2012). Pechera Mlynky. Pechera Uhrynska. Ternopil: FOP Shabala N. Ye. [in Ukrainian].
3. Klymchuk, O.B. (1999). Hidrogeolohichni umovy rozvytku i henezys karstovykh porozhnyh v neohenovykh sulfatnykh vidkladakh Volyno-Podilskoho artezijskoho baseinu: avtoref. dys. d-ra heol. nauk. Kyiv, [in Ukrainian].
4. Klymchuk, O.B. (2017). Rozvytok teorii hipohennoho karstohenezu: naukovy ta praktychni zastosuvannia (za materialamy naukovoi dopovidi na zasidanni Prezidii NAN Ukrainy

- 27 veresnia 2017 r.) [Development of the theory of hypogene karstogenesis: scientific and practical applications (based on the scientific report at the meeting of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine, September 27, 2017)]. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*. No. 11. P. 9–29. [in Ukrainian].
5. Pokaliuk V.V., Aronskyi A.A., Shafranska N.V., Matoshko A.A. (2012). Trishchynuvatist pecher Podillia v aspekti rotatsiinykh i tektonichnykh prychyn utvorennia [Fracturing of the Podillia caves in the context of rotational and tectonic causes of formation]. *Geofizychnyi zhurnal*. Vol. 34. P. 101–112.
 6. Shults, R.V., Bilous, M.V., Honcheriuk, O.M. (2016). Monitorynh pamiatok arkhitektury za dopomohoiu danykh nazemnoho lazernoho skanuvannia. Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia [Monitoring of architectural monuments using terrestrial laser scanning data]. No. 46. P. 202–207.
 7. Andreychouk, V., Worobiec, E., Gedl, P., & Worobiec, G. (2014). Origin of the palaeokarst in Miocene evaporites on the SW periphery of the Eastern European Platform in the light of palynological studies: a case study of the Zoloushka Cave, Bukovina, Western Ukraine. In *Annales Societatis Geologorum Poloniae* (Vol. 84).
 8. Bertash, A., Keypen-Warditz, D., & Levoshko, S. (2016). Orthodox cave churches and monasteries of the V-XX centuries in Russia and Ukraine: architectural traditions and technologies. *Procedia engineering*, 165, 1829–1835.
 9. Bondar, K., & Ridush, B. (2015). Rockmagnetic and palaeomagnetic studies of unconsolidated sediments of Bukovynka Cave (Chernivtsi region, Ukraine). *Quaternary International*, 357, 125–135.
 10. Bubniak I., Oliinyk M., Tsikhon S., Golubinka Yu., Marko T. (2023). 3d model of Medova cave, Iviv, Geodesy, cartography and aerial photography. Issue 98, 2023, p. 31–41.
 11. Columbu, A., Calabrò, L., Chiarini, V., & De Waele, J. (2021). Stalagmites: from science application to museumization. *Geoheritage*, 13, 1–11.
 12. Constantin S., Robu M., Munteanu C. M., Petculescu A., Vlaicu M., Mirea I. et al. Reconstructing the evolution of cave systems as a key to understanding the taphonomy of fossil accumulations: The case of Urșilor Cave (Western Carpathians, Romania). *Quaternary International*. 2014. Vol. 339. P. 25–40.
 13. Coombes, M.A., La Marca, E.C., Naylor, L.A., Piccini, L., De Waele, J., & Sauro, F. (2015). The influence of light attenuation on the biogeomorphology of a marine karst cave: a case study of Puerto Princesa Underground River, Palawan, the Philippines. *Geomorphology*, 229, 125–133.
 14. Craven, S.A. (2006). White Scar Cave, Chapel-le-Dale, North Yorkshire, England. *Cave and karst science*, 33(2), 79.
 15. Engel, A. S. (2019). Microbes. In *Encyclopedia of Caves* (pp. 691–698). Academic Press.
 16. Fedje, D., Mackie, Q., McLaren, D., Wigen, B., & Southon, J. (2021). Karst caves in Haida Gwaii: Archaeology and paleontology at the Pleistocene-Holocene transition. *Quaternary Science Reviews*, 272, 107221..
 17. Ford, D., & Williams, P.D. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons.
 18. Frumkin, A., & Weinstein-Evron, M. (2021). Nahal Me ‘arot caves: archive of human evolution against the background of prolonged karstic processes. *Z Geomorphol Supp*, 62, 283–300.
 19. Gallay, M., Kaňuk, J., Hochmuth, Z., Meneely, J. D., Hofierka, J., & Sedlák, V. (2015). Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 44(3), 277–291.
 20. Gerovasileiou, V., Trygonis, V., Sini, M., Koutsoubas, D., & Voultsiadou, E. (2013). Three-dimensional mapping of marine caves using a handheld echosounder. *Marine Ecology Progress Series*, 486, 13–22..
 21. Goldberg, P., & Sherwood, S.C. (2006). Deciphering human prehistory through the geoarcheological study of cave sediments. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 15(1), 20–36.

22. Goltenboth, F., Timotius, K.H., Milan, P.P., & Margraf, J. (Eds.). (2006). Ecology of insular Southeast Asia: the Indonesian archipelago. Elsevier.
23. Grigore, S. (2020). A brief history of Ialomița Cave (Dâmbovița County, Romania). *Annales d'Université "Valahia" Târgoviște. Section d'Archéologie et d'Histoire*, 22(1), 113–120.
24. Haslam, M., Korisettar, R., Petraglia, M., Smith, T., Shipton, C., & Ditchfield, P. (2010). In Foote's steps: the history, significance and recent archaeological investigation of the Billa Surgam caves in southern India. *South Asian Studies*, 26(1), 1–19.
25. Hofierka, J., Hochmuth, Z., Kaňuk, J., Gallay, M., & Gessert, A. (2016). Mapovanie jaskyne Domica pomocou terestrického laserového skenovania. *Geografický časopis*, 68(1), 3–24.
26. Klimchouk, A. (2019). Ukraine giant gypsum caves. In *Encyclopedia of Caves*, Third Edition.
27. Klimchouk, A.V., Andreychouk, V.N., & Turchinov, I.I. (2009). The structural prerequisites of speleogenesis in gypsum in the Western Ukraine (2nd ed., revised). Sosnowiec–Simferopol: University of Silesia & Ukrainian Institute of Speleology and Karstology.
28. Kempe, S. (2013). Morphology of speleothems in primary (lava-) and secondary caves. In J. F. Shroder (Ed.), *Treatise on geomorphology* (Vol. 6, pp. 251–264). Elsevier.
29. Koning, K., McFarlane, R., Gosse, J. T., Lawrence, S., Carr, L., Horne, D., ... & Cheeptham, N. (2022). Biomineralization in cave bacteria—popcorn and soda straw crystal formations, morphologies, and potential metabolic pathways. *Frontiers in Microbiology*, 13, 933388.
30. Liu, X., Shan, Y., Ai, G., Du, Z., Shen, A., & Lei, N. (2024). A Scientific Investigation of the Shangfang Mountain Yunshui Cave in Beijing Based on LiDAR Technology. *Land*, 13(6), 895.
31. Moseley, M. (2009). Size matters: scalar phenomena and a proposal for an ecological definition of 'cave'. *Cave and Karst Science*, 35(3), 89–94.
32. Prijatelj, A. (2011). History of cave archaeology in Slovenia: Politics, institutions, individuals, methods and theories. *Cave and Karst Science*, 38(3), 137–143.
33. Shults, R., Bilous, M., & Kovtun, V. (2019). Monitoring and preservation of the Kyiv Pechersk Lavra Caves. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 1053–1058.
34. Straub, R. (2015). Introduction to underwater cave surveying. *Mitteilungen des Verbandes der Deutschen Höhlen- und Karstforscher*.
35. Tabib, W., Goel, K., Yao, J., Boirum, C., & Michael, N. (2021). Autonomous cave surveying with an aerial robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(2), 1016–1032.
36. Urban, J. (2004). Caves and karst sites of Poland as a contribution to geological heritage of Central Europe. *Polish Geological Institute Special Papers*, 13, 89–96.
37. Valladas, H., Kaltnecker, E., Quiles, A., Tisnérat-Laborde, N., Genty, D., Arnold, M., ... & Simonnet, R. (2013). Dating French and Spanish prehistoric decorated caves in their archaeological contexts. *Radiocarbon*, 55(3), 1422–1431.
38. Vassilakis, E., & Konsolaki, A. (2022). Quantification of cave geomorphological characteristics based on multi source point cloud data interoperability. *Z. Fur Geomorphol*, 63, 265–277.
39. White, W. B. (2019). Surveying caves. In *Encyclopedia of Caves*, Third Edition.
40. White, W. B., & Culver, D. C. (2019). Cave, definition of. In *Encyclopedia of Caves* (pp. 255–259). Academic Press.
41. Woodfill, B. K., Guenter, S., & Monterroso, M. (2012). Changing patterns of ritual activity in an unlooted cave in central Guatemala. *Latin American Antiquity*, 23(1), 93–119.
42. Zhou, W., Gao, Z., Li, H., & Xiong, K. (2022). Research on karst cave mapping based on terrestrial laser scanning. *Carsologica Sinica*.
43. Zlot, R., & Bosse, M. (2014). Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave & Karst Studies*, 76(3), 191–202.

LASER SCANNING OF CAVES: ADVANCED TECHNOLOGIES FOR EXPLORING UNDERGROUND SPACES BASED ON THE EXAMPLES OF MEDOVA CAVE AND MLYNKY CAVE

**Ihor Bubniak, Andrii Bubniak, Anatolii Vivat, Taras Marko,
Kateryna Boiko**

*Lviv Polytechnic National University, Karpinskyi Str., 6, Lviv, Ukraine, 79013
e-mail: ihor.m.bubniak@lpnu.ua*

This article presents the results of a study of two gypsum karst caves—Mlynky Cave (Ternopil region) and Medova Cave (Lviv region)—which are among the most remarkable speleological sites of the Podillia Upland. The primary goal of the study was to develop accurate 3D digital models of the internal cave structures for spatial analysis, geological interpretation, morphological characterization, and long-term geodynamic monitoring. A combination of terrestrial laser scanning (TLS) using a Leica ScanStation C10 and a handheld mobile laser scanner STONEX X120 GO was employed. This approach enabled detailed data acquisition from both large chambers and narrow, hard-to-access passages. The resulting point clouds were processed using specialized software and integrated into Geographic Information Systems (GIS) with precise global georeferencing via GNSS ground control points (UTM Zone 35).

Special attention is given to the methodology of data acquisition, filtering, and point cloud processing, as well as to the construction of high-resolution 3D models. In the case of Mlynky Cave, geological interpretation focused on the Badenian gypsum strata, the role of interstratal karst, and the dominant orientations of tectonic fractures that shape the cave system. The survey of Medova Cave led to its first complete digital mapping, identification of morphological features, and generation of a detailed spatial model for future studies.

The research confirms the effectiveness of modern laser scanning technologies for geological mapping of underground voids, their documentation and preservation, and their integration into conservation, scientific, and geotouristic frameworks. The obtained models and analyses provide a foundation for monitoring cave stability, identifying risk-prone areas, and developing virtual geotourism experiences.

Key words: caves, laser scanning, gypsum karst, 3D modelling, geographic information systems, Podillia, Mlynky Cave, Medova Cave, morphological analysis, georeferencing.

Дата надходження статті: 28.07.2025

Дата прийняття статті: 25.08.2025

Опубліковано: 29.10.2025