

Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЧЕТВЕРІКОВ БОРИС ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 528.4+528.8

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДЗЗ І ГЕОРАДАРНОГО
ЗНІМАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗЕМЕЛЬ ІСТОРИКО-
КУЛЬТУРНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

05.24.04 – Кадастр та моніторинг земель

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Б.В.Четверіков

Науковий консультант – Глотов Володимир Миколайович

доктор технічних наук, професор

Київ-2024

Ідентичний за змістом з іншими примірниками дисертації.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради _____ Анненков А.О.

АНОТАЦІЯ

Четверіков Б.В. Методологія використання даних ДЗЗ і георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.04 – Кадастр та моніторинг земель. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів; Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ; МОН України, 2024.

У дисертаційній роботі опрацьовано загальні відомості з теорії дослідження об'єктів історико-культурної спадщини різними методами ДЗЗ, а також наземного неінвазивного методу, такого як георадарне знімання. Проведено аналіз сучасних методів інтерферометричного опрацювання космічних радіолокаційних знімків та проаналізовано методи георадарного знімання для визначення аномалій. Робота присвячена комплексному дослідженню земель історико-культурного призначення з використанням міждисциплінарних підходів, включаючи геоінформаційний аналіз, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та георадарне знімання.

Результати дослідження показали, що інтеграція даних з дистанційного зондування (ДЗЗ) та георадарного знімання дозволяє з високою точністю визначити межі об'єктів історико-культурної спадщини та їх зони охорони. На основі отриманих даних сформовано концептуальну модель моніторингу земель історико-культурного призначення, яка включає поетапний процес збору, аналізу та інтерпретації даних.

Запропоновано використання синергії дистанційного зондування та георадарного знімання для підвищення достовірності інтерпретації даних. У роботі автором систематизовано різноманітні методи дослідження, включаючи космічне знімання, аерознімання, а також лідарне знімання. Розроблено нові підходи до 3D-моделювання об'єктів на основі аерознімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та авіаційного лідарного знімання.

Обґрунтовано ефективність використання цих методів у комплексі для детального моніторингу та аналізу об'єктів культурної спадщини. Оцінено переваги інтеграції даних різних джерел, що дозволяє створювати точні 3D-моделі та виявляти потенційні загрози для збереження об'єктів.

Проведено детальний аналіз результатів, що дозволив виокремити ключові аспекти, які необхідно враховувати для забезпечення ефективного збереження історико-культурних об'єктів. Автором виокремлено найважливіші етапи впровадження нових методик та їх застосування в практиці, що сприяє покращенню моніторингу і охорони об'єктів культурної спадщини.

У дисертаційній роботі автором розроблено і впроваджено новаторську концептуальну модель моніторингу земель історико-культурного призначення, яка базується на сучасних технологіях дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і георадарного знімання. На основі актуальних наукових досягнень і технологічних інновацій, сформовано новий підхід до вивчення об'єктів культурної спадщини, який включає як наземні, так і підземні елементи.

Запропоновано інтеграцію даних з ДЗЗ і георадарного знімання для створення детальних тривимірних моделей. У роботі систематизовано методи і технології, що дозволяють проводити детальний аналіз і моніторинг земель історико-культурного призначення, а також визначено основні етапи цього процесу.

Розроблено комплексний підхід до виявлення аномалій і уточнення меж об'єктів, що забезпечує можливість проведення перебудови їх охоронних зон. Обґрунтовано, що синергія методів ДЗЗ і георадарного знімання дозволяє досягти високої точності в аналізі даних і ефективніше зберігати об'єкти культурної спадщини.

Оцінено переваги та обмеження кожного з методів, а також їх комбінації для моніторингу земель історико-культурного призначення. Проаналізовано результати інтеграції даних у тривимірні моделі, що дозволяє чітко виявляти потенційні загрози та аномалії. Автором виокремлено ключові аспекти, які необхідно враховувати для вдосконалення технологій дослідження і

забезпечення ефективного моніторингу земель історико-культурного призначення.

У роботі також удосконалено технологію побудови тривимірних моделей з використанням даних аерознімання та георадарного знімання, що дозволяє більш детально вивчати і оцінювати стан об'єктів культурної спадщини. Проведено детальний аналіз отриманих результатів і розроблено рекомендації для подальших досліджень і практичного застосування розроблених технологій.

Особливе місце в роботі займає розробка загальних математичних моделей для поєднання радіолокаційних і георадарних даних. На основі сучасних технологій та методологічних підходів сформовано нові моделі, які забезпечують синергію інформації з різних джерел. Запропоновано інтеграцію даних радіолокації та георадарного знімання для розширення можливостей виявлення вертикальних зміщень і характеристик підземних об'єктів.

У роботі систематизовано основні математичні підходи і технології, які використовуються для комбінування даних з цих двох джерел.

Оцінено ефективність розроблених моделей на прикладі конкретних досліджень, що демонструє їхню здатність покращувати точність і надійність виявлення вертикальних зміщень та підземних об'єктів. Проаналізовано переваги і обмеження використання комбінованих даних у порівнянні з окремими методами.

Визначено ключові аспекти, які сприяють вдосконаленню математичних моделей, і проведено детальне тестування їхньої працездатності. Автором виокремлено основні досягнення в цій сфері та рекомендації для подальшого вдосконалення методів комбінування радіолокаційних і георадарних даних. Результати розроблених моделей значно покращують можливості дослідження земель історико-культурного призначення, що сприяє їх ефективному моніторингу та збереженню.

Оптимізовано технологію моніторингу земель історико-культурного призначення за допомогою супутникової радіолокаційної інтерферометрії. Ця технологія адаптована для детального аналізу вертикальних зміщень об'єктів

культурної спадщини. На прикладі Львівської цитаделі та історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» проведено класифікацію підземних елементів і інтерпретацію екстремумів вертикальних зміщень. Для Львівської цитаделі виявлено 24 точки максимальних вертикальних зміщень з діапазоном від 17 до 36 см за три роки, з динамікою деформацій від -0,7 до -10 см/рік. На території Звенигородського городища виявлено 2 точки з вертикальними зміщеннями 5,6 і 6,7 см.

У роботі також автором оптимізовано технологію георадарного знімання підземних елементів об'єктів історико-культурної спадщини. Це дозволяє детально обстежити визначені точки екстремумів і виявити значні підземні елементи на різних глибинах. Виявлено об'єкти розміром 10х3 м на глибині 0,3 м і 0,5 м на території Львівської цитаделі, а також об'єкти на глибині 0,36 м і 0,16 м на території «Древнього Звенигорода». Уточнено положення історичних структур для обох дослідних полігонів, що сприяє точному визначенню аномалій та збереженню культурної спадщини.

Покращено методику побудови та порівняння цифрових моделей поверхні (ЦМП) на основі аерознімання з БПЛА і лідарного знімання. На прикладі дослідного полігону історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» використано високоточні аерознімальні камери і лідарні сканери для створення точних ортофотопланів і ЦМП. Лідарне сканування продемонструвало вищу точність і стабільність, що забезпечує надійніший моніторинг земель історико-культурного призначення.

В розробці алгоритмів поєднання даних радіолокаційного і георадарного знімання створено єдину тривимірну модель, що покращує інтеграцію даних і підвищує точність моніторингу. Розроблено і впроваджено унікальний програмний модуль 3DDEM&RADAR, який дозволяє сумісно відображати 3D-моделі цифрових моделей поверхні та георадарного знімання. Модуль включає три функціональні блоки, що автоматично визначають ділянки для досліджень, інтегрують дані з різними розширеннями і створюють точні 3D-моделі. Це

значно покращує моніторинг історико-культурних об'єктів і точність корекції кадастрових меж земель історико-культурного призначення.

Наукова новизна роботи полягає в розробці нових підходів до комбінованого використання методів дистанційного зондування та георадарного знімання для детального дослідження та моніторингу земель історико-культурного призначення.

Практична значущість результатів полягає у можливості широкого застосування розроблених технологій у практиці охорони культурної спадщини. Запропоновані методи дозволяють автоматизувати процеси аналізу і моніторингу, що може бути використано в управлінні культурними пам'ятками, їх збереженні та реставрації. Розроблене програмне забезпечення для напівавтоматичного визначення областей інтересу та створення 3D-моделей має потенціал для використання у наукових дослідженнях, культурному управлінні та навчальному процесі.

Ключові слова: об'єкти історико-культурної спадщини, землі історико-культурного призначення, дистанційне зондування Землі, георадарне знімання, охоронна зона, математичне моделювання, безпілотний літальний апарат, лідарне знімання, концептуальна модель, розробка програмного модуля.

ABSTRACT

Chetverikov B.V. Methodology of Using Remote Sensing Data and Ground Penetrating Radar in Monitoring Cultural Heritage Lands. – Qualification Scientific Work as Manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.24.04 – Cadastre and Land Monitoring. – Lviv Polytechnic National University, Lviv; Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv; Ministry of Education and Science of Ukraine, 2024.

In the dissertation, general information on the theory of investigating historical and cultural heritage objects using various remote sensing methods, as well as non-invasive ground methods such as ground-penetrating radar, has been processed. An analysis of

modern interferometric processing methods for satellite radar imagery has been conducted, and methods for ground-penetrating radar to detect anomalies have been analyzed. The work is dedicated to a comprehensive study of historical and cultural land using interdisciplinary approaches, including geoinformational analysis, remote sensing, and ground-penetrating radar.

The research results show that integrating remote sensing and ground-penetrating radar data allows for precise determination of the boundaries of historical and cultural heritage objects and their protection zones. Based on the obtained data, a conceptual model for monitoring historical and cultural land has been developed, which includes a step-by-step process for data collection, analysis, and interpretation.

The synergy between remote sensing and ground-penetrating radar has been proposed to enhance the accuracy of data interpretation. The author has systematized various research methods, including satellite imagery, aerial imagery, and lidar scanning. New approaches to 3D modeling of objects based on aerial imagery from unmanned aerial vehicles (UAVs) and aviation lidar scanning have been developed.

The effectiveness of using these methods in combination for detailed monitoring and analysis of cultural heritage objects has been substantiated. The benefits of integrating data from different sources have been evaluated, allowing for the creation of accurate 3D models and identification of potential threats to preservation.

A detailed analysis of the results has been carried out, highlighting key aspects that need to be considered for effective preservation of historical and cultural objects. The author has identified the most important stages in implementing new methodologies and their practical applications, which contribute to improving the monitoring and protection of cultural heritage objects.

In the dissertation, the author has developed and implemented an innovative conceptual model for monitoring historical and cultural land, based on modern remote sensing and ground-penetrating radar technologies. Based on current scientific achievements and technological innovations, a new approach to studying cultural heritage objects has been formulated, incorporating both surface and subsurface elements.

The integration of remote sensing and ground-penetrating radar data for creating detailed three-dimensional models has been proposed. The work systematizes the methods and technologies that enable detailed analysis and monitoring of historical and cultural land, and outlines the main stages of this process.

A comprehensive approach to detecting anomalies and refining object boundaries has been developed, allowing for the restructuring of their protection zones. It has been demonstrated that the synergy of remote sensing and ground-penetrating radar methods achieves high accuracy in data analysis and more effectively preserves cultural heritage objects.

The advantages and limitations of each method, as well as their combinations for monitoring historical and cultural land, have been assessed. The results of integrating data into three-dimensional models have been analyzed, which allows for clear identification of potential threats and anomalies. The author has identified key aspects necessary for improving research technologies and ensuring effective monitoring of historical and cultural land.

The technology for constructing three-dimensional models using aerial imagery and ground-penetrating radar data has been improved, allowing for a more detailed study and assessment of the condition of cultural heritage objects. A detailed analysis of the obtained results has been conducted, and recommendations for further research and practical application of the developed technologies have been made.

A significant part of the work involves developing general mathematical models for combining radar and ground-penetrating radar data. Based on modern technologies and methodological approaches, new models have been created that ensure synergy of information from different sources. Integration of radar and ground-penetrating radar data has been proposed to expand the capabilities of detecting vertical displacements and characteristics of subsurface objects.

The main mathematical approaches and technologies used for combining data from these two sources have been systematized. The effectiveness of the developed models has been evaluated through specific studies, demonstrating their ability to improve accuracy and reliability in detecting vertical displacements and subsurface objects. The

advantages and limitations of using combined data compared to individual methods have been analyzed.

Key aspects contributing to the improvement of mathematical models have been identified, and detailed testing of their performance has been conducted. The author has highlighted the main achievements in this field and recommendations for further refinement of methods for combining radar and ground-penetrating radar data. The results of the developed models significantly enhance the ability to study historical and cultural land, contributing to their effective monitoring and preservation.

The technology for monitoring historical and cultural land using satellite radar interferometry has been optimized. This technology has been adapted for detailed analysis of vertical displacements in cultural heritage objects. For the Lviv Citadel and the historical and cultural reserve "Ancient Zvenyhorod," classification of subsurface elements and interpretation of vertical displacement extremes have been conducted. For the Lviv Citadel, 24 points of maximum vertical displacements with a range of 17 to 36 cm over three years have been identified, with deformation dynamics from -0.7 to -10 cm/year. In the Zvenyhorod settlement area, two points with vertical displacements of 5.6 and 6.7 cm have been detected.

The author has also optimized the ground-penetrating radar technology for investigating subsurface elements of historical and cultural heritage objects. This allows for detailed examination of identified extreme points and detection of significant subsurface elements at various depths. Objects measuring 10x3 meters at depths of 0.3 meters and 0.5 meters have been identified in the Lviv Citadel, as well as objects at depths of 0.36 meters and 0.16 meters in the "Ancient Zvenyhorod" area. The positions of historical structures for both research sites have been clarified, contributing to accurate anomaly detection and preservation of cultural heritage.

The methodology for constructing and comparing digital surface models (DSM) based on UAV aerial imagery and lidar scanning has been improved. Using high-precision aerial cameras and lidar scanners, accurate orthophotos and DSMs have been created for the historical and cultural reserve "Ancient Zvenyhorod." Lidar scanning

has demonstrated higher accuracy and stability, providing more reliable monitoring of historical and cultural land.

In the development of algorithms for combining radar and ground-penetrating radar data, a unified three-dimensional model has been created, enhancing data integration and improving monitoring accuracy. A unique software module, 3DDEM&RADAR, has been developed and implemented, allowing for the joint display of 3D models of digital surface models and ground-penetrating radar data. The module includes three functional blocks that automatically determine research areas, integrate data with various extensions, and create accurate 3D models. This significantly improves the monitoring of historical and cultural objects and the accuracy of cadastral boundary corrections for historical and cultural land.

The scientific novelty of the work lies in the development of new approaches to the combined use of remote sensing and ground-penetrating radar methods for detailed research and monitoring of historical and cultural land. The practical significance of the results is the potential for broad application of the developed technologies in heritage preservation practice. The proposed methods allow for the automation of analysis and monitoring processes, which can be used in cultural heritage management, preservation, and restoration. The developed software for semi-automatic identification of areas of interest and creation of 3D models has the potential for use in scientific research, cultural management, and educational processes.

Keywords: cultural heritage objects, historical and cultural lands, remote sensing, ground penetrating radar imaging, protective zone, mathematical modeling, unmanned aerial vehicle, lidar imaging, conceptual model, software module development.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Trevoho, I., Chetverikov, B., Babiy, L. & Malanchuk, M. (2020). Monitoring of displacements and deformations of the earth's surface near the Stebnyk city using radar images of Sentinel-1. *Geodesy and Cartography*, 69.(1.), 85–96. <https://doi.org/10.24425/gac.2020.131079> (Web of Science)

2. Ievsiukov, T., Chetverikov, B., Openko, I., Kovalchuk, I., Shevchenko, O., Stepchuk, Y., Tykhenko, R. & Makarov, O. (2022). Topographic and geodetic support for the development of the GIS register of Polish burials – case study on Baikove cemetery in Kyiv. *Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*, 11, 398–405. (Web of Science)
3. Chetverikov B., Różycki S., Malitskyy A. & Babiy L. (2024). Application of Orthophoto Maps Created from UAV Aerial Images for Monitoring Historical and Cultural Heritage Lands. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 6(2), 144–163. <https://doi.org/10.30564/jees.v6i2.6360> (Scopus)
4. Chetverikov, B., Hlotov, V. & Bakula, K. (2024). Clarification of the Boundaries of Lands of Historical and Cultural Heritage and Determination of Their Protection Zones by Remote Sensing Methods. *Land*, 13(7), 923. <https://doi.org/10.3390/land13070923> (Scopus, Q1, Web of Science)
5. Chetverikov, B., Babiy, L., Oryński, S. & Różycki, S. (2024). Methods for Designating Protective Zones of Historical and Cultural Purpose Using Non-Invasive Methods—Two Case Studies for Ukraine and Poland. *Remote Sensing*, 16(13), 2330. <https://doi.org/10.3390/rs16132330> (Scopus, Q1, Web of Science)
6. Chetverikov B, Hlotov V & Bakula K. (2024). Development of a Software Module for Studying Historical and Cultural Heritage Objects Using Non-Invasive Research Data. *Heritage*, 7(8), 4131-4148. <https://doi.org/10.3390/heritage7080194> (Scopus, Q1, Web of Science)
7. Четверіков Б. В. & Процик М. Т. (2023). Розроблення макета та основних функцій програмного модуля візуалізації результатів обробки геопросторових даних. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 2 (46), 106–112. (Index Copernicus, Google Scholar)
8. Четверіков Б.В., Бондар К.М., Хоменко Р.В., Діденко С.В. & Шейхет М.Г. (2017). Визначення розташування історичних об'єктів за допомогою фотограмметричного методу та методів наземних неруйнівних досліджень.

- Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 85, 94-103. (Index Copernicus, Google Scholar)
9. Chetverikov B., Lompas O., Protsyk M. & Teteruk D. (2019) Estimation accuracy of orthotransformation of space images applying satellite Pleiades-1 for GNSS surveying. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 89, 36-43 (Index Copernicus, Google Scholar)
10. Chetverikov B.V., Babiy L.V., Protsyk M.T. & Ilkiv T.J. (2019). Error estimation of DEM of orthotransformation of aerial images obtained from UAVs on the mountainous local site in the village Shidnytsya. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 90, 65-73. (Index Copernicus, Google Scholar)
11. Четверіков Б. В., Хінціцький О. В. & Калинич І. Методика картографування об'єктів історико-культурної спадщини засобами ГІС-технологій з використанням архівних картографічних та аероматеріалів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(41), 97–103. (Index Copernicus, Google Scholar)
12. Четверіков Б. В., Ванчура Р. Б. & Смолій К. Б. (2022). Методика визначення планового положення інфраструктури зруйнованого Звенигородського замку. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(43), 71–77. (Index Copernicus, Google Scholar)
13. Четверіков Б., Бабій Л., Кузик З., Заяць І. & Процик М. (2022). Дослідження цифрових моделей рельєфу нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини, створених за різні роки. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 96, 65–76. (Index Copernicus, Google Scholar)
14. Четверіков Б. (2023). Застосування методів радіолокаційної інтерферометрії та георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(45). (Index Copernicus, Google Scholar)

15. Chetverikov B. & Babiy L. (2016). Determination of boundaries of ancient burial places using the archived aerial and cartographic materials. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(31), 111-114. (Google Scholar)
16. Четверіков Б., Михайлюк В. & Согор А. (2017). Технологія створення цифрової моделі місцевості на прикладі Сирецького району м.Києва з використанням архівних даних. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(33), 116-119. (Google Scholar)
17. Четверіков Б. (2017). Методика визначення перенесення меж Нового єврейського кладовища у Львові за допомогою геоінформаційних систем. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, II(34), 98-101. (Google Scholar)
18. Четверіков Б. (2018). Методика визначення меж зруйнованого старого некрополя у м.Броди за допомогою ГІС-технологій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(35), 169-172. (Google Scholar)
19. Четверіков Б. В., Шейхет М. Г. & Грицюк Т. Ю. (2021). Визначення меж некрополів і меморіалів дистанційними та наземними неінвазивними методами: колективна монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 128с.
20. Четверіков Б. В. (2021). Визначення історичної території юдейського кладовища в м. Бердичів у контексті сучасної містозабудови засобами ГІС-технологій. *Простір в історичних дослідженнях*, №2, 118–123.

Наукові праці, які зсвідчують апробацію матеріалів дисертації

21. Kostyanchuk A., Chetverikov B. & Trevoho I. (2021). Methods of creation an Atlas of National Parks and protected areas of Ukraine. GeoTerrace-2021: міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 4–6 жовтня 2021 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus).
22. Chetverikov B. (2022). Research of the DEM of the Zvenyhorod hillfort for priority areas for the analysis of vertical displacements. GeoTerrace-2022 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 3–5 жовтня 2022 р.,

- Львів, Україна. (SciVerse Scopus).
23. Chetverikov B., Babiy L., Kuzyk Z. & Zaiats I. Comparison of 3D models of mass graves created on the basis of aerial survey data in 1944 and 2015. GeoTerrace-2022 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 3–5 жовтня 2022 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus)
24. Chetverikov B. & Trevoho I. (2023). The application of web mapping for the research and documentation of historical and cultural heritage objects. GeoTerrace-2023 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 2–4 жовтня 2023 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus)
25. Chetverikov B. & Protsyk M. (2023). Analysis of vertical ground displacements of the Lviv Citadel territory based on radar survey data. GeoTerrace-2023 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 2–4 жовтня 2023 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus)
26. Четверіков Б. В. (2016). Створення цифрової моделі місцевості концтабору Stalag-328 (Цитадель) за допомогою ГІС-технологій. Матеріали III Міжнародної наукової конференції. Пам'ятки Тустані в контексті освоєння Карпат у доісторичну добу та в середньовіччі; проблеми їх збереження та використання, 179–180.
27. Четверіков Б. В. (2016). Визначення розташування історичних об'єктів за допомогою фотограмметричного методу та методів наземних неруйнівних досліджень. Матеріали тез XXI Міжнародної науково-технічної конференції "Геофорум-2016", 41–42.
28. Четверіков Б. В. (2016). Визначення місць масових поховань у Бабиному Яру за архівними картографічними та аероматеріалами. Збірник тез доповідей. Друга Міжнародна науково-технічна конференція «Геопростір-2016», 15–16.
29. Четверіков Б. В. (2016). Визначення ансамблю братніх могил району Білогорща (м. Львів) неруйнівними методами. GeoTerrace-2016 : міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених (15-17 грудня 2016 р., Львів), 126–129.

30. Четверіков Б. В. (2017). Аналіз сучасного стану стародавніх кладовищ м. Львова на основі картографічних матеріалів та даних ДЗЗ. Екогеофорум 2017. Актуальні проблеми та інновації : міжнародна науково-практична конференція (22-25 березня 2017 р., Івано-Франківськ), 316–317.
31. Четверіков Б. В. & Бондар К. М. (2017). Визначення меж масових розстрілів і поховань часів Другої світової війни фотограмметричним та геофізичними методами. Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку : матеріали восьмої міжнародної науково-технічної конференції, 14-16 вересня 2017 р., Львів, Східниця, Україна, 60–63.
32. Четверіков Б. & Марко О. (2017). Методика створення WEB-карти об'єктів історико-культурної спадщини м. Львова GeoTerrace-2017: міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, 14-16 грудня 2017, Львів, Україна, 125–129.
33. Chetverikov B., Babiy L., Protsyk M. & Ilkiv T. (2019). Error estimation of orthotransformation of aerial images obtained from UAVs on the mountainous local site in the village Shidnytsya. Environmental engineering, photogrammetry, geoinformatics. Modern technologies and development perspectives : the 9th International scientific-technical conference, 17–20 September 2019, Lublin, Poland, 50–51.
34. Четверіков Б. В. (2020) Методика створення ГІС концентраційних таборів нацистської Німеччини періоду 1941–1944 років. Геофорум-2020: матеріали 25-ої Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, Брюховичі, Яворів, 1–3 квітня 2020 р.), 17–20.
35. Четверіков Б. В., Тревого І. С. & Грицюк Т. (2021). Визначення меж концентраційних таборів в Україні за допомогою ГІС-технологій та аналіз збереження їх територій в порівнянні з європейським досвідом. Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, 28-30 жовтня 2021 р., Ужгород, 97–101.

- 36.Зборщик В. І. & Четверіков Б. В. (2022). 3D моделювання архітектурних об'єктів історико-культурної спадщини за допомогою мобільного додатку. Геофорум-2022 : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6–8 квітня 2022 р., Львів, Яворів, Брюховичі, 8–10.
- 37.Chetverikov B., Różycki S., Babių L. & Malitskyu A. (2023). Application of Orthophotomaps Created from UAV Aerial Images for Monitoring Historical and Cultural Heritage Sites. Współczesne technologie geoinformacyjne w modelowaniu przestrzeni: I Kongres geoinformacyjny (X Ogólnopolskie sympozjum geoinformacyjne) Kraków, 25–27 października 2023 : streszczenia referatów, 154–155.
- 38.Четверіков Б. & Бабій Л. (2023). Методика визначення охоронних зон земель історико-культурного призначення за допомогою даних радіолокаційної інтерферометрії. Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку: тези доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції, Львів, 8–10 листопада 2023 р., 6.
- 39.Четверіков Б. В. (2023). Дослідження об'єктів історикокультурної спадщини фотограмметричним та геофізичним методами. Геофорум-2023: матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 19–21 квітня 2023 р., Львів, Брюховичі, Україна, 7–10.
- 40.Четверіков Б. В., Маліцький А. В. & Тревого І. С. (2023). Застосування ортофотопланів, створених за аерофотознімками з БПЛА для моніторингу земель історико-культурного призначення. Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції, 26-28 жовтня 2023 р., Ужгород, 80–84.
- 41.Четверіков Б. В. & Тревого І. С. (2023). Методика комплексного дослідження об'єктів історико-культурної спадщини за даними ДЗЗ і герорадарного знімання. Інноваційні технології у плануванні територій : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 5-7 жовтня 2023 р., Одеса, 35–39.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ТА НЕІНВАЗИВНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У ВИВЧЕННІ ЗЕМЕЛЬ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	35
1.1. Склад земель історико-культурного призначення.....	46
1.2. Моніторинг земель історико-культурного призначення.....	52
1.3. Дистанційні та неінвазивні методи дослідження земель історико-культурного призначення.....	56
1.3.1. Супутникове оптико-електронне знімання.....	56
1.3.2. Супутникове радіолокаційне знімання.....	61
1.3.3. Аерознімання.....	63
1.3.4. Лазерне сканування.....	72
1.3.5. Наземне георадарне знімання.....	80
1.4. Визначення невирішених задач досліджень.....	85
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМЛІ ТА ПІДЗЕМНИХ АНОМАЛІЙ.....	87
2.1. Фізична основа формування даних методами радіолокаційного і георадарного знімання.....	87
2.2. Методи інтерферометричного визначення вертикальних зміщень за даними радіолокаційного знімання та їх аналіз	94
2.3. Методи визначення аномалій георадарного знімання та їх аналіз.....	105

2.4. Математичне поєднання результатів опрацювання радіолокаційних даних та георадарного знімання.....	115
Висновки та рекомендації до розділу 2.....	120
РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДЗЗ І ГЕОРАДАРУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗЕМЕЛЬ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	121
3.1. Кадастровий моніторинг змін земельних ресурсів за допомогою даних ДЗЗ і георадару.....	125
3.2. Визначення вертикальних зміщень ділянок поверхні методом супутникової радіолокаційної інтерферометрії (побудова карти вертикальних зміщень).....	134
3.3. Дослідження ділянок екстремумів вертикальних зміщень георадаром на предмет аномалій.....	161
Висновки та рекомендації до розділу 3.....	172
РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ДЛЯ ПОБУДОВИ І АНАЛІЗУ ЦМП ОБ'ЄКТІВ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ.....	173
4.1. Виконання аерознімання з БПЛА для точного визначення планового положення об'єктів історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» (створення ортофотоплану і карти висот).....	175
4.2. Виконання лідарного знімання з БПЛА території історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» та опрацювання результатів.....	181
4.3. Дослідження та порівняння ЦМП тестової ділянки за даними аерознімання та лідарного знімання.....	192

4.4. Створення концептуальної моделі використання даних ДЗЗ і георадару для вивчення земель історико-культурного призначення.....	201
Висновки та рекомендації до розділу 4.....	208
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ НАПІВАВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТЕЙ ІНТЕРЕСУ ТА СТВОРЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ 3D-МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ.....	210
5.1. Розробка алгоритмів створення програмного забезпечення для напівавтоматичного визначення ділянок досліджень та відображення загальної 3D-моделі ЦМР і георадарного знімання...	210
5.2. Розробка макету оболонки та визначення основних функцій програми (модуля) 3DDEM&RADAR.....	215
5.3. Написання коду програми (модуля) 3DDEM&RADAR для визначеного функціоналу.....	223
5.4. Апробація програми (модуля) 3DDEM&RADAR.....	249
Висновки та рекомендації до розділу 5.....	261
ВИСНОВКИ.....	263
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	265
ДОДАТКИ.....	301

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА –	Безпілотні літальні апарати
ГІС –	Геоінформаційна система
ГНСС –	Глобальна навігаційна супутникова система
ДЗЗ –	Дистанційне зондування Землі
ЛА –	Літальний апарат
НЛС (TLS) –	Наземне лазерне сканування
ОІКС –	Об’єкти історико-культурної спадщини
РЛЗ –	Радіолокаційне знімання
СКП –	Середня квадратична похибка
ЦММ –	Цифрова модель місцевості
ЦМП –	Цифрова модель поверхні
ЦМР (DEM) –	Цифрова модель рельєфу
АОІ –	Область інтересу
ВІМ –	Інформаційне моделювання будівництва
DGPRi –	Двочастотне зображення землі за допомогою георадару
DInSAR –	Диференційна інтерферометрія з синтезованою апертурою
InSAR –	Інтерферометрія з синтезованою апертурою
FBD –	Режим подвійної різниці між вузькими променями
FBS –	Режим повного діапазону
GPR –	Георадар
GSD –	Просторова розрізненість геометричної площини
LIDAR –	Дистанційне вимірювання з використанням лазерної радіо- дальномірної системи

LoS –	Інтерферометрія з лінією огляду
PPK –	Режим кінематики постпроцесу
PS –	Метод постійних розсіювачів
SBAS –	Метод інтерферометрії малих базисних ліній
SLAM –	Технологія одночасної локалізації та картографування (при наземному лазерному скануванні)
WGS –	Світова геодезична система координат
VTOL –	Вертикальний зліт та посадка БПЛА

ВСТУП

Моніторинг земель ведеться з метою забезпечення органів державної влади, місцевого самоврядування, фізичних та юридичних осіб інформацією про стан земель, своєчасне виявлення негативних процесів, що викликають погіршення їхнього стану, забезпечення прав власників землі, землевласників, землекористувачів, орендарів на інформацію про стан земель. Вирішуючи завдання збору, накопичення, зберігання, оновлення, систематизації, обробки, узагальнення та надання споживачам інформації про землі, моніторинг земель є важливим елементом інформаційного забезпечення ведення державного кадастру, раціонального землекористування, землеустрою, контролю за використанням земель, їх охорони та інших функцій державного управління земельними ресурсами України.

Історичний розвиток держави супроводжується створенням численних пам'яток, які забезпечують історико-культурну спадщину країни. Особливістю об'єктів історико-культурного спадщини є: кількісна обмеженість, створення природним шляхом (без спеціального наміру), тимчасовий процес (усвідомлення історико-культурної спадщини приходить з часом). Державна політика спрямована на збереження таких об'єктів, які розташовані на певній земельній ділянці. Саме процеси присвоєння об'єкту історико-культурного статусу, умови виділення земельної ділянки під нього та її оцінка, органи управління об'єктами та землями цієї категорії вимагають детального вивчення, що й склало актуальність даного дослідження [198].

Це особливо яскраво проявляється під час здійснення моніторингу специфічної складової частини категорії земель територій, що особливо охороняються, - земель історико-культурного призначення. Складаючи за приблизною площею менше 10% всіх земель територій, що особливо охороняються, землі історико-культурного призначення останнім часом починають привертати все більш пильну увагу фахівців, підприємців і політиків у зв'язку з неухильним зростанням національної самосвідомості, переосмисленням ролі українського народу в загальносвітовому історичному та

культурному процесі, формування нових підходів до освіти, активізації туристичної промисловості [178].

Потреба перегляду, оновлення та розвитку методологічного багажу та методичного інструментарію моніторингу земель історико-культурного призначення обумовлена їх сучасним станом. Виникла необхідність подальшої розробки та конкретизації методології досліджень даної категорії земель на рівні концептуальних підходів та методів дослідження, що спираються на досягнення всіх суспільних наук.

Таким чином, назріла потреба розширити впровадження нових методик не тільки в дослідницьку роботу, а й у навчальні курси та програми. Гуманізація всіх суспільних та технічних наук, що відбувається в останні десятиліття, реалізація в дослідженні та навчанні історії підходу, в якому в центрі вивчення знаходиться людина, неможлива без міждисциплінарного синтезу, використання методів та напрацювань суміжних технічних та гуманітарних дисциплін – картографії, фотограмметрії, геодинаміки, геології, соціології, культурної та соціальної антропології, археології та інших.

Питанням моніторингу земель історико-культурного призначення займалися і займаються серед українських вчених Петраковська О.С., Мартин А.Г., Губар Ю.П., Бурштинська Х.В., Тревого І.С., Донець О.В., Вяткін К.І., Паньків З.П., Третяк А.М., Поливач К.А., Мозолевський Б.О., Виноградов О.О., Господар О.В., Авраменко О.О., Светличний І.В. та інші.

Серед закордонних вчених, що займалися даною тематикою, можна відмітити праці таких науковців як Colin Renfrew, Timothy Darvill, Ian Hodder, David Lowenthal та Steven Mithen (Велика Британія); Michael E. Smith, Sarah Parcak, Anthony Aveni, Fikret Yegül, Anna Roosevelt та Lynn Meskell (США); Ian Lilley (Австралія); Kirsty Rowan (Канада); Suzan van der Leeuw (Нідерланди); Carlos Pimentel (Мексика); Niels Andreasen (Данія); Alfredo González-Ruibal (Іспанія) та інші.

Обґрунтування теми дослідження.

Актуальним завданням є не тільки пошук різного роду об'єктів історико-культурної спадщини, але і їх детальне вивчення. Методи фотограмметрії та електротомографії принципово дозволяють відновити форму та геометричні параметри об'єктів історико-культурної спадщини, виявити їх структуру (шаруватість-однорідність) та оцінити склад ґрунтів [263].

У практиці застосування фотограмметричних та геофізичних методів щодо об'єктів історико-культурної спадщини виразні результати отримані у виявленні похованих залишків кам'яних конструкцій: фундаментів веж та стін, підземних ходів та інших елементів фортифікаційних споруд. Враховуючи високу контрастність фізичних властивостей каменю по відношенню до ґрунту, використовується практично весь спектр геофізичних методів: електророзвідка, магніторозвідка, сейсморозвідка, георадарна зйомка та ін. Дослідження земляних оборонних споруд у більшості випадків спрямовані на виявлення ліній укріплень, які візуально не простежуються, наприклад, засипані рови та згладжені оранням вали. У деяких випадках застосування різних модифікацій електророзвідки дозволяє відновити форму частини укріплень, що збереглася, їх структуру та оцінити склад ґрунтів. Аналіз геофізичної карти дозволяє попередньо визначити межі об'єкта та його структурних частин, загалом відновити планування та виявити "приховані" оборонні споруди. Для уточнення геометричних параметрів проводяться дослідження методом електротомографії - "стратиграфічна" геофізична зйомка. Ефективність такого підходу доведена щодо середньовічних городищ. З погляду виявлення меж братських поховань та оцінки їх структури найцікавіші результати отримуються при вирішенні наступних завдань: 1) виявлення та оцінка конфігурації об'єктів, які були реконструйовані (вирівняні) раніше та нині візуально не фіксуються; 2) відновлення розташування ділянок об'єктів, які на сьогоднішній день не фіксуються на місцевості (зазвичай такі об'єкти виражені в рельєфі фрагментарно та неоднозначно); 3) оцінка форми, розмірів і структури об'єктів.

Застосування методу радіолокаційної інтерферометрії доцільно при моніторингу територій історико-культурного призначення на предмет просідання земної поверхні, відповідно можливого нововиявлення підземних об'єктів пам'ятки, що в свою чергу може вплинути на загальну площу об'єкта і охоронну зону.

Радіолокаційне знімання – це один із видів аерокосмічного знімання, яке здійснюється за допомогою радіолокатора – активного мікрохвильового сенсора, здатного випромінювати та приймати розсіяні земною поверхнею поляризовані радіохвилі в певних діапазонах довжин хвиль (частот). Зворотній сигнал несе в собі інформацію про фізичні та геометричні властивості поверхні. Радіолокаційне знімання (РЛЗ) забезпечує спостереження за об'єктами, прихованими рослинністю і навіть розташованих у неглибокому приповерхневому шарі землі або води (заглиблені трубопроводи, лінії електропередач, підводні споруди тощо). Крім того, за радіолокаційними зображеннями можна виявити рухомі об'єкти, отримати інформацію про рельєф зондованої місцевості, і про її певні фізичні властивості: електропровідність, вологість тощо.

Комплексні дослідження історико-культурних пам'яток та геоінформаційний аналіз міждисциплінарних даних дозволяють реалізувати ефективний алгоритм вивчення та збереження цих пам'яток та земель на яких вони знаходяться. Порівняльний аналіз матеріалів ДЗЗ та результатів геофізики дозволяє обґрунтувати межі об'єкта історико-культурної спадщини, виділити ділянки культурного шару різної охорони. Необхідність комплексних міждисциплінарних досліджень визначається тим, що кожен із методів (за винятком археології) дає лише непряму інформацію про стан та структуру культурного шару. Зіставлення даних різних методів у геоінформаційній системі, принцип послідовного уточнення інформації та можливість різнобічного аналізу об'єктів історико-культурної спадщини забезпечують високий рівень достовірності інтерпретації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота пов'язана з науковими планами роботи кафедри фотограмметрії та геоінформатики Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка» за тематикою: «Методи, моделі і технології моніторингу стану довкілля та окремих об'єктів засобами фотограмметрії, дистанційного зондування та геоінформатики», за номером державної реєстрації 0118U001548. Робота пов'язана з планами, темами і науковою тематикою робіт галузевої науково-дослідної лабораторії (ГНДЛ-95) Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка». За останні роки автор брав участь у госпдоговірних науково-дослідних роботах «Створення ортофотопланів в масштабі 1:2000 з висотою перерізу 1 м на частину території Долинської і Болехівської міських рад загальною площею 20,11 км.кв», тема № 817 та інших.

Дисертаційна робота ґрунтується на законодавчій та нормативно-правовій базі, яка є джерелом моніторингу земель історико-культурної спадщини в Україні: Конституції України, Земельному кодексі України, Закону України «Про Державний земельний кадастр», Закону України «Про землеустрій», Закону України «Про охорону культурної спадщини», Порядку проведення моніторингу земель і ґрунтів.

Дослідження здійснено також в рамках проєкту NAWA (Польського національного агентства з питань академічного обміну) – освітнє і наукове стратегічне партнерство між Варшавською політехнікою та Національним університетом «Львівська політехніка» (2023-2024pp).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є обґрунтування науково-теоретичних основ, методичних положень та практичних рекомендацій щодо удосконалення просторової ідентифікації та моніторингу земель історико-культурного призначення на основі використання геоінформаційних технологій, даних ДЗЗ і георадарного знімання

Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено такі завдання:

1. Дослідити особливості земель історико-культурного призначення.

2. Систематизація завдань та змісту просторової ідентифікації і моніторингу території ОЖС , виявлення проблем та визначення напрямів їх вирішення на основі використання геоінформаційних технологій, даних ДЗЗ і георадарного знімання.
3. Розробити математичну модель поєднання результатів опрацювання радіолокаційних даних та георадарного знімання.
4. Оптимізувати технологічні моделі моніторингу земель історико-культурного призначення методами супутникової радіолокаційної інтерферометрії та георадарного знімання для дослідження земель історико-культурного призначення.
5. Розробити технологію поєднання результатів опрацювання георадарних даних з даними радіолокаційного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення.
6. Удосконалити технологічну модель побудови та порівняння ЦМП нерухомих площинних об'єктів історико-культурної спадщини за даними аерознімання з БПЛА і лідарного знімання.
7. Розробити концептуальну модель технології ведення геоінформаційного моніторингу земель історико-культурного призначення з використанням даних ДЗЗ і георадарного знімання.
8. Розробити алгоритми поєднання результуючих файлів опрацювання даних радіолокаційного і георадарного знімання з різними розширеннями, для моніторингу земель історико-культурного призначення.
9. Розробити програмне забезпечення (модуль) для сумісного відображення загальної 3D-моделі ЦМП і георадарного знімання 3DDEM&RADAR

Об'єкт дослідження – об'єкти історико-культурної спадщини та землі історико-культурного призначення.

Предмет дослідження – моделі, методи і технології просторової ідентифікації та моніторингу території історико-культурних пам'яток з використанням даних ДЗЗ та георадарного знімання.

Методи дослідження.

Проведені дослідження ґрунтуються на результатах теоретико-методологічних та технологічних наукових розробках, що мають концептуально важливе та принципове значення для розв'язання сформульованих задач дисертаційної роботи.

Дослідження проводились на основі міждисциплінарного підходу, з використанням досягнень таких наук та дисциплін як: математика, кадастр територій, геодезія, геоматика, географія, дистанційне зондування, геоінформатика, фотограмметрія, картографія, геофізика та інших.

У роботі використано методи теоретичних та експериментальних досліджень. Зі сфери аналітичних досліджень застосовано порівняльний аналіз та математичне моделювання. При здійсненні експериментальних досліджень використано методи з картографії, фотограмметрії, космічного зондування Землі та технології ГІС.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації виконано теоретичне узагальнення і одержано практичні результати вирішення науково-прикладної проблеми розробки методологічних основ та інформаційно-технологічних моделей моніторингу земель історико-культурного призначення з використанням даних ДЗЗ і георадарного знімання, зокрема:

Вперше:

1. Доведено особливості синергії методів ДЗЗ і георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення.
2. Розроблено концептуальну модель моніторингу земель історико-культурного призначення за даними ДЗЗ і георадарного знімання.
3. Розроблено математичну модель поєднання результатів опрацювання радіолокаційних даних та георадарного знімання.
4. Розроблено модель системи інтегрування і відображення 3D-моделі ЦМР з результатами георадарного знімання та здійснено програмну реалізацію системи, яка забезпечує ефективне вирішення важливої прикладної задачі в сфері моніторингу земель історико-культурного призначення, а саме

визначення історичних меж об'єктів з врахуванням їхніх наземних та підземних елементів.

Удосконалено:

1. Технологічну модель застосування супутникової радіолокаційної інтерферометрії для моніторингу земель історико-культурного призначення.
2. Технологічну модель георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення.

Набули подальшого розвитку:

1. Методика опрацювання різнорідних даних дистанційних і неінвазивних досліджень для моніторингу земель історико-культурного призначення.
2. Технологічна модель створення ЦМП нерухомих площинних об'єктів історико-культурної спадщини за даними аерознімання з БПЛА і лідарного знімання.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені моделі, методи і технології мають практичне значення для підвищення ефективності вирішення прикладних завдань в сфері збереження та охорони історико-культурної спадщини, а саме: для визначення або коригування меж та оперативного моніторингу території ОІКС; для виявлення підземних елементів ОІКС; для виявлення вертикальних зміщень земної поверхні на території ОІКС. Ці результати орієнтовані на практичне використання в системі управління в сфері історико-культурної спадщини, зокрема в центральних органах влади та органах місцевого самоврядування при формуванні технічних вимог на надання послуг щодо виконання наукових, науково-проєктних досліджень для визначення меж територій ОІКС, проведення постійного та періодичного моніторингу стану ОІКС, їх території та земель історико-культурного призначення. Розроблені технології та практичні методики призначені для безпосереднього використання підприємствами, що виконують роботи за замовленнями органів державної влади і органів місцевого самоврядування щодо розроблення науково-проєктної та землевпорядної документації щодо визначення та встановлення меж територій

ОКС, регламентів використання території і об'єктів історико-культурної спадщини.

Результати дисертації практично апробовані при виконанні дослідження території конкретних реальних об'єктів історико-культурної спадщини, зокрема: ансамблю оборонних споруд «Львівська цитадель» у м.Львові та території історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» у с.Звенигород Львівської області.

Отримані наукові результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі під час підготовки фахівців ОКР магістр за освітньою програмою «Геоінформаційні системи і технології» у Національному університеті «Львівська політехніка» (м. Львів).

Особистий внесок здобувача полягає у виконанні теоретичних та експериментальних досліджень, опрацюванні отриманих результатів, формулюванні основних положень та висновків. Дисертаційне дослідження є одноосібною науковою працею з питань удосконалення теоретичних, методологічних та практичних аспектів дослідження земель історико-культурного призначення дистанційними та неінвазивними методами. Наведені в роботі науково-практичні положення виконані здобувачем особисто. Із наукових праць, опублікованих у співавторстві у дисертації використано лише власні розробки, а саме: [114] – здійснено постановку завдання, виконано експериментальні дослідження, проаналізовано різночасові картографічні дані та матеріали ДЗЗ, встановлено історичні межі концтабору Sthalag-328 та братських поховань на основі інтерпретації архівних аерознімків; [40] – постановка завдання, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, створення ЦММ історичних об'єктів Сирецького району в м.Києві станом на 1944 рік; [41] – постановка завдання, сформовано технологічну схему міждисциплінарних досліджень та висновки. Побудовано плани братських поховань часів Другої світової війни на основі інтерпретаційних можливостей архівних аероматеріалів; [42] – здійснено постановку завдання, сформовано основні положення та висновки. Доведено, що частина Нового єврейського

кладовища у м.Львові була знищена за радянських часів та забудована, визначено історичну межу кладовища; [43] – постановка завдання, виконано теоретичні та експериментальні дослідження, сформовано основні положення та висновки; [44] – запропоновано та реалізовано методику визначення фундаментів зруйнованих історичних споруд, за допомогою цифрового опрацювання зображень. Здійснена постановка завдання та сформовано основні положення та висновки; [115] – виконано постановку завдання, запропоновано методику визначення похибок ортотрансформування космічних зображень, сформовано основні положення та висновки; [116] – запропоновано методику побудови ЦМР за синтезованими даними, отриманими за БПЛА і космічних знімальних систем, сформовано постановку завдання та висновки; [262] – виконано дослідження вертикальних зміщень земного покриву методом супутникової радіолокаційної інтерферометрії, здійснено постановку завдання, сформовано основні положення та висновки; [45] – здійснено постановку завдання, сформовано основні положення та висновки, запропоновано та реалізовано технологічну схему визначення історичних меж об'єкта історико-культурної спадщини за архівними аероматеріалами і картографічними даними; [46] – запропоновано методику картографування об'єктів історико-культурної спадщини засобами ГІС-технологій з використанням архівних картографічних та аероматеріалів, зроблена постановка завдання, сформовано основні положення та висновки; [47] – постановка завдання, сформовано основні положення та висновки. Виконано експериментальні дослідження з визначення планового положення інфраструктури зруйнованого Звенигородського замку; [48] – виконано дослідження цифрових моделей рельєфу нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини, сформовано основні положення та висновки; [49] – запропоновано методику поєднання методів радіолокаційної інтерферометрії та георадарного знімання для дослідження об'єктів історико-культурної спадщини. Виконана постановка завдання, сформовано основні положення та висновки; [50] – розроблено макет та основні функції програмного модуля візуалізації результатів обробки геопросторових даних; [51] – запропоновано методику

визначення охоронних зон земель історико-культурного призначення за допомогою даних радіолокаційної інтерферометрії, сформовано основні положення та висновки; [117] – запропоновано методику застосування ортофотопланів, створених за аерознімками з БПЛА для моніторингу земель історико-культурного призначення, сформовано основні положення та висновки; [263] – запропоновано методику поєднання фотограмметричного і геофізичного методу для дослідження об'єктів історико-культурної спадщини і сформульовано основні висновки та рекомендації; [52] – здійснено визначення меж нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини картографічним методом за допомогою ГІС-технологій; [53] – запропоновано різні технологічні схеми досліджень різноманітних об'єктів історико-культурної спадщини, сформовано основні висновки.

Наукові положення і результати, які виносились на захист у кандидатській дисертації, не використовувались.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати наукових досліджень, що включені до дисертації, пройшли апробацію на: міжнародних науково-технічних конференціях: III Міжнародній науковій конференції «Пам'ятки Тустані в контексті освоєння Карпат у доісторичну добу та в середньовіччі; проблеми їх збереження та використання» (Львів, 2016); Міжнародних науково-технічних конференціях "Геофорум" (Львів-Яворів-Брюховичі, 2016, 2020, 2022, 2023, 2024рр.); Другій Міжнародній науково-технічній конференції «Геопростір-2016» (Київ, 2016р.); Міжнародних науково-технічних конференціях молодих вчених GeoTerrace (Львів, 2016, 2017, 2021, 2022, 2023 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Екогеофорум 2017. Актуальні проблеми та інновації» (Івано-Франківськ, 2017 р.); XVIII міжнародній науково-технічній конференції «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку» (Львів-Східниця, 2017р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні» (Ужгород-Мукачево, 2018, 2021, 2023 рр.); The 9th

International scientific-technical conference «Environmental engineering, photogrammetry, geoinformatics. Modern technologies and development perspectives» (Lublin, Poland, 2019); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології у плануванні територій» (Одеса, 2020, 2021, 2022, 2023pp.); I Kongres geoinformacyjny (X Ogólnopolskie sympozjum geoinformacyjne) Kraków, 25–27 października 2023; X Міжнародна науково-технічна конференція «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку», Львів, 8–10 листопада 2023 р.; IV Akademia Kartografii i Geoinformatyki “Modelowanie Czasoprzestrzenne” Włocław 22-24 maja 2024r.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 41 праці, із них: 6 - статей у наукових періодичних виданнях, які внесені до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 7 - статей у наукових фахових виданнях України, які внесені до міжнародних наукометричних баз даних; 5 - статей у наукових фахових виданнях України; 1- монографія; 1- стаття у інших виданнях України; 5 - публікації у збірниках матеріалів конференцій, що входять до наукометричної бази даних Scopus; 16 - публікації у збірниках матеріалів конференцій.

Основні положення, що виносяться на захист:

- теорія математичного поєднання результатів опрацювання радіолокаційних даних та георадарного знімання;
- теорія та розробка концептуальної моделі використання даних ДЗЗ і георадару для моніторингу земель історико-культурного призначення.
- теорія та технологія опрацювання даних супутникового радіолокаційного і георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення;
- технологія дослідження та порівняння ЦМП тестової ділянки за даними аерознімання та лідарного знімання.

- теоретичні алгоритми створення програмного забезпечення для відображення загальної 3D-моделі ЦМР і георадарного знімання, з метою моніторингу земель історико-культурного призначення.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів основної частини, загальних висновків, списку літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 312 сторінок машинописного тексту, з них: 247 сторінок основної частини, 16 сторінок анотації, 103 рисунків, 14 таблиць, 35 сторінок - 293 позиції списку літературних джерел і 5 додатків на 12 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ТА НЕІНВАЗИВНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У ВИВЧЕННІ ЗЕМЕЛЬ ІСТОРИКО- КУЛЬТУРНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Відповідно до статті 54 Конституції України культурна спадщина охороняється законом. В Україні правові, організаційні, соціальні та економічні відносини у сфері охорони культурної спадщини регулюються Законом України «Про охорону культурної спадщини» № 1805-III від 05.06.2000 (із змінами) (далі – Закон), відповідно до статті 3 якого державне управління у сфері охорони культурної спадщини покладається на Кабінет Міністрів України, спеціально уповноважені органи охорони культурної спадщини, до яких належать:

- центральні органи виконавчої влади, що забезпечують формування та реалізують державну політику у сфері охорони культурної спадщини (яким відповідно до Положення про Міністерство культури України, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 03 вересня 2014р. № 495 є Міністерство культури України (далі – Мінкультури));
- орган виконавчої влади Автономної Республіки Крим;
- обласні, районні, Київська та Севастопольська міські державні адміністрації;
- виконавчий орган сільської, селищної, міської ради.

Ключовими актами, які визначають напрями реалізації державної політики у сфері охорони культурної спадщини є: Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, ратифікована із заявою Законом від 16 вересня 2014 року № 1678-VII; Середньостроковий план пріоритетних дій Уряду до 2020 року та плани пріоритетних дій Уряду, затверджені розпорядженням Кабінету Міністрів України від 3 квітня 2017 р. № 275-р.

Слід зазначити, що державна політика у сфері охорони культурної спадщини за час дії Закону не забезпечила створення інституційно спроможних органів

охорони культурної спадщини, а тому не стала ефективною, оскільки в областях не створені окремі структурні підрозділи з питань охорони культурної спадщини, а лише покладені окремі функції органу охорони культурної спадщини на вже існуючі структурні підрозділи обласних, районних, Київської та Севастопольської міських державних адміністрацій.

Існуючий обсяг нерухомих об'єктів культурної спадщини України, що перебувають на державному обліку складає в даний час понад 170 тисяч об'єктів культурної спадщини [24]. Це об'єкти культурної спадщини, які занесено до Державного реєстру нерухомих пам'яток України; об'єкти культурної спадщини, які взято на державний облік відповідно до законодавства, що діяло до набрання чинності цим Законом, до вирішення питання про включення (не включення) об'єкта культурної спадщини до Державного реєстру нерухомих пам'яток України та об'єкти культурної спадщини до вирішення питання про їх реєстрацію як пам'ятки, що вносяться до Переліку об'єктів культурної спадщини і набувають правового статусу щойно виявлених об'єктів культурної спадщини.

Розрізняються 8 видів пам'яток: пам'ятки археології (72472), пам'ятки історії (49168), пам'ятки монументального мистецтва (2351), пам'ятки архітектури та пам'ятки містобудування (15996), пам'ятки садово-паркового мистецтва (332), ландшафтні пам'ятки (7) та пам'ятки науки і техніки (46) (рис.1.1).



Рис.1.1. Діаграма кількісних показників класифікації пам'яток у відсотках

Можна окреслити основні проблеми сучасної системи обліку нерухомої культурної спадщини:

- відсутність єдиної уніфікованої державної системи обліку та збереження нерухомої культурної спадщини України, її використання у суспільному житті та захисту традиційного характеру середовища історично населених місць, що забезпечить збирання, накопичення, обробку, захист, облік та надання інформації про об'єкти культурної спадщини, археологічні території, що охороняються, історично населені місця, історико-культурні заповідники та заповідні території і об'єкти всесвітньої спадщини ЮНЕСКО, а також відомості пов'язані з їх пам'яткоохоронним статусом;
- відсутність обміну інформацією, пов'язаною з пам'яткоохоронним статусом об'єктів культурної спадщини між різними держателями державних інформаційних систем;
- відсутність вільного доступу до загальної інформації про об'єкти нерухомої культурної спадщини та відсутність оприлюднення відповідної публічної інформації у формі відкритих даних відповідно до Закону України «Про доступ до публічної інформації»;
- відсутність можливості отримання актуальних та достовірних відомостей про пам'яткоохоронний статус об'єктів нерухомої культурної спадщини;
- відсутність національної інфраструктури даних про нерухомі об'єкти культурної спадщини.

Відповідно до Закону з метою захисту традиційного характеру середовища передбачені наступні заходи охорони:

1. Оголошення топографічно визначених територій чи водних об'єктів, в яких містяться об'єкти культурної спадщини або можлива їх наявність охоронюваними археологічними територіями.

2. Встановлення зон охорони пам'яток: охоронних зон, зон регулювання забудови, зон охоронюваного ландшафту, зон охорони археологічного культурного шару.

3. Визначенні історичних населених місць України та визначення в них історичних ареалів.

Необхідно зазначити, що в Україні відсутні об'єкти, що оголошені археологічними територіями, які охороняються. Враховуючи, що норма статті, що надає можливість надавати відповідний статус територіям існує з моменту прийняття Закону, існує вірогідність у недоцільності окремого статусу для територій, в яких містяться об'єкти культурної спадщини або можлива їх наявність, з метою захисту традиційного характеру їх середовища [31, 32, 33].

Щодо встановлення зон охорони пам'яток, то загальна статистика пам'яток навколо яких встановлені зони охорони складає 14335.

Важливе місце в охороні культурної спадщини з метою запобігання руйнування або заподіяння шкоди, забезпечення захисту, збереження, утримання, відповідного використання об'єкта культурної спадщини, захисту традиційного характеру середовища в інтересах нинішнього і майбутніх поколінь займає запровадження ефективного контролю у сфері охорони культурної спадщини [173].

Контроль забезпечується шляхом створення системи моніторингу (постійного або періодичного) за результатами якого приймаються ефективні управлінські рішення, що включають розробку механізму оптимального функціонування об'єкта контролю, запобігання його руйнуванню або заподіянню шкоди, застосування заходів реагування у разі виявлення порушень Закону та інших нормативно-правових актів про охорону культурної спадщини.

Об'єктом контролю є: пам'ятка національного значення, її територія, зона охорони; пам'ятка місцевого значення, її територія, зона охорони; історичний ареал населеного місця, внесеного до Списку історичних населених місць України (далі - історичний ареал); археологічна територія, що охороняється; історико-культурний заповідник державного значення; історико-культурний заповідник місцевого значення; історико-культурна заповідна територія; щойно виявлений об'єкт культурної спадщини.

Предметом контролю є стан збереження, утримання та відповідного використання об'єкта контролю.

Суб'єктами контролю є: органи охорони культурної спадщини, які здійснюють його самостійно через посадових осіб уповноважених структурних підрозділів або шляхом залучення членів Українського товариства охорони пам'яток історії та культури чи громадських організацій, статутними завданнями яких передбачена діяльність у сфері охорони культурної спадщини та які діють у відповідній сфері не менше трьох років; адміністрація історико-культурного заповідника щодо території історико-культурного заповідника та об'єктів культурної спадщини, на ній розташованих; зон охорони історико-культурного заповідника; адміністрація історико-культурної заповідної території щодо історико-культурної заповідної території та об'єктів культурної спадщини, на ній розташованих; зон охорони історико-культурної заповідної території; орган, до сфери управління якого належить історико культурний заповідник щодо території історико-культурного заповідника; його зони охорони; орган, до сфери управління якого належить історико-культурна заповідна територія щодо історико-культурної заповідної території; її зони охорони; власники пам'яток, щойно виявлених об'єктів та уповноважені ним органи щодо цих об'єктів та їх територій.

Система моніторингу включає постійний, періодичний моніторинг та дослідження пам'ятки.

Постійний моніторинг – це аналіз інформації про пам'яткоохоронний статус об'єкта контролю, відповідність встановленим режимам його використання та вимогам щодо захисту, збереження, утримання цього об'єкта.

Інформація про пам'яткоохоронний статус об'єкта контролю включає: відомості Реєстру, Переліків; облікову документацію, охоронний договір, наукову проєктну документацію, що визначає режими використання об'єкта контролю та запланованих робіт на ньому, архівні матеріалів наукових установ, відомості державних інформаційних систем та інші відомості, які свідчать про стан об'єкта контролю.

Постійний моніторинг повинен проводитися органами охорони культурної спадщини, адміністраціями історико-культурних заповідників, історико-культурних заповідних територій та органами, до сфери управління якого вони належать відповідно до планів, що затверджуються на початку року.

Узагальнена інформація результатів постійного моніторингу є основою формування пропозицій до програм соціально-економічного розвитку відповідної території, проєктів місцевого і державного бюджетів та щорічного звіту органів охорони культурної спадщини про стан збереження об'єктів культурної спадщини та використовується для забезпечення формування Мінкультури політики у сфері охорони культурної спадщини.

Періодичний моніторинг – це збір, опрацювання та аналіз інформації про об'єкт контролю з безпосереднім візуальним обстеженням його на місці. Періодичний моніторинг проводиться всіма суб'єктами контролю.

Органи охорони культурної спадщини повинні забезпечувати проведення періодичного моніторингу планово не рідше ніж раз на п'ять років та за потребою.

За результатом проведеного періодичного моніторингу має складатися акт візуального обстеження.

Дослідження – це дії, спрямовані на одержання нової інформації про об'єкт контролю та обумовлені змінами його стану, виникнення загрози для його збереженості, або у випадках, визначених законом.

Запропонована система контролю у сфері охорони культурної спадщини знайшла відображення у проєкті наказу Мінкультури «Про затвердження Правил із організації та здійснення контролю у сфері охорони культурної спадщини», який листом від 13.09.2018 року за № 2481/10-1/14-18 було направлено до Державної регуляторної служби України.

Проте, рішенням Державної регуляторної служби України від 16.11.2018 року № 505 відмовлено в погодженні проєкту регуляторного акту з підстав відсутності повноважень Мінкультури у розробці відповідного акту.

Охорона і використання земель історико-культурного призначення на державному рівні регламентується окрім Конституції України наступними законами та нормативною документацією: статтями 53 і 54 Земельного кодексу України; Законом України "Про охорону культурної спадщини"; статтями 2, 25, 47, 55, 57 Закону України «Про землеустрій»; Законом України «Про ведення державного земельного кадастру».

Одним із напрямків російської агресії проти України, є намагання знищити українську ідентичність, а відповідно і історико-культурну спадщину народу, що частково лежить в основі цієї ідентичності. Російські війська руйнують пам'ятки архітектури, музеї, здійснюють ракетні атаки на меморіали і некрополі.

За останні роки цифрові технології значно змінили спосіб, яким ми сприймаємо та зберігаємо культурну спадщину. Віртуальні музеї, електронні бібліотеки та архіви, цифрові колекції та артефакти, а також соціальні мережі, дозволяють ділитися та досліджувати культурні досягнення у всьому світі. Проте, разом з цими змінами, з'явилися нові виклики і загрози, пов'язані зі збереженням та захистом цифрової культурної спадщини.

В Україні цифрова культурна спадщина також під загрозою. На жаль, через недостатнє фінансування та недбалість багатьох установ культури, значна частина культурних артефактів та документів перебуває у вкраденому або зруйнованому стані. Тому, важливо зберегти та оцифрувати ці матеріали, щоб вони були доступні для наступних поколінь та для дослідження.

Одним зі способів порятунку української культурної спадщини є оцифрування та зберігання її в електронних форматах. Це може бути зроблено за допомогою спеціалізованих програм та технологій, таких як сканування, фотографування та відеозйомка. Оцифровані матеріали можна зберігати в електронних архівах та онлайн-бібліотеках, що забезпечить їх доступність та збереження для майбутніх поколінь.

Україна використовує цифрові технології для збереження та популяризації своєї культурної спадщини. Наприклад, Національний музей ім. Андрея Шептицького в Львові створив власну електронну платформу "MyHeritage", щоб

зберегти етнографічну спадщину Західної України. Також в Україні діє програма "Культурна спадщина онлайн", яка дозволяє доступ до онлайн-колекцій музеїв, архівів та інших культурних установ.

Проте, збереження та популяризація культурної спадщини за допомогою цифрових технологій вимагає не тільки розробки відповідних ініціатив та проєктів, але й створення відповідних правових та організаційних механізмів для захисту та управління культурною спадщиною в цифровій формі.

За визначенням [12] *землі історико-культурного призначення* – землі, на яких розташовані пам'ятки культурної спадщини, їх комплекси (ансамблі), історико-культурні заповідники, історико-культурні заповідні території, музеї просто неба, меморіальні музеї-садиби.

Інвентаризація земель історико-культурного призначення - це процес створення повної інформаційної бази про території, на яких розміщуються об'єкти культурної спадщини. Інвентаризація земель історико-культурного призначення є важливим етапом охорони культурної спадщини, оскільки дозволяє забезпечити контроль за використанням цих територій, що допомагає зберегти національну історію та культуру.

Основні завдання інвентаризації земель історико-культурного призначення:

- Визначення меж земель історико-культурного призначення та створення кадастру таких земель.
- Визначення категорій цих земель в залежності від ступеня їх важливості для збереження національної історії та культури.
- Створення бази даних про об'єкти культурної спадщини, які знаходяться на землях історико-культурного призначення.
- Визначення режимів використання земель історико-культурного призначення з урахуванням їх значення для збереження культурної спадщини.
- Розробка програм збереження та реконструкції об'єктів культурної спадщини, які знаходяться на землях історико-культурного призначення.

Інвентаризація земель історико-культурного призначення дозволяє забезпечити раціональне використання земельних ресурсів та збереження культурної спадщини для майбутніх поколінь

Україна має законодавчу базу, яка регулює діяльність органів виконавчої влади у сфері використання та охорони земель історико-культурного призначення. Основним законом є Закон України "Про охорону культурної спадщини", який містить положення про органи виконавчої влади у цій сфері.

Згідно з цим законом, до компетенції органів виконавчої влади у сфері охорони культурної спадщини належить, зокрема:

- затвердження та реалізація державної політики у галузі охорони культурної спадщини;
- здійснення контролю за станом об'єктів культурної спадщини та їх охороною;
- розроблення та затвердження правил використання земель історико-культурного призначення;
- забезпечення виконання нормативно-правових актів з питань охорони культурної спадщини;
- проведення реставраційних та реконструкційних робіт на об'єктах культурної спадщини;
- здійснення моніторингу за станом земель історико-культурного призначення та їх використанням.

Органи виконавчої влади, які здійснюють контроль за використанням земель історико-культурного призначення, зобов'язані проводити регулярні інвентаризації цих земель та складати переліки об'єктів культурної спадщини, що знаходяться на них.

Також, на регіональному рівні функції з охорони культурної спадщини здійснюють спеціалізовані органи виконавчої влади - обласні управління культури та туризму.

Особливу увагу варто приділити новітнім технологіям у вивченні історико-культурної спадщини, таких як: опрацювання великих даних (big data); побудова розумних міст (smart city); застосування нейронних мереж.

Великі дані, що є масштабними обсягами даних, які збираються, зберігаються та обробляються, можуть бути корисними для збереження та дослідження культурної спадщини.

Один з основних способів використання великих даних в контексті культурної спадщини - це створення цифрових копій культурних об'єктів. Такі копії дозволяють віртуально відвідати музеї, пам'ятки, архітектурні споруди, що може стимулювати туризм та сприяти популяризації культурної спадщини.

Крім того, великі дані можуть використовуватися для аналізу зміни стану культурної спадщини протягом часу. Аналітичні інструменти дозволяють відстежувати стан об'єктів культурної спадщини, їх руйнування та реставрацію.

Також, великі дані можуть використовуватися для збору статистичної інформації про використання культурної спадщини, що може допомогти у визначенні пріоритетів та напрямів розвитку в цій галузі.

Проте, при використанні великих даних в сфері культурної спадщини необхідно дотримуватися принципу обережного ставлення до інформації, забезпечувати конфіденційність та захист персональних даних. Також, необхідно враховувати місцеві закони та культурні особливості при зборі та опрацюванні даних.

Розумне місто - це місто, в якому застосовуються інноваційні технології та системи управління з метою покращення якості життя громадян, підвищення ефективності і сталості міських систем та забезпечення екологічної безпеки.

Оновлення культурної спадщини в середовищі розумного міста є важливою задачею, що може забезпечити збереження та популяризацію культурних цінностей міста.

Одним з підходів до оновлення культурної спадщини в середовищі розумного міста є використання цифрових технологій. Це можуть бути віртуальні тури, мобільні додатки, інтерактивні виставки та інші інноваційні

рішення, які дозволяють відтворити та досліджувати культурні об'єкти на новому рівні.

Крім того, оновлення культурної спадщини в середовищі розумного міста може передбачати використання зелених технологій та енергоефективних рішень. Наприклад, використання сонячних батарей для освітлення вулиць або вітрогенераторів для генерації електроенергії для культурних об'єктів.

Також, оновлення культурної спадщини в середовищі розумного міста може передбачати залучення громадськості до процесу збереження та відновлення культурних об'єктів. Це може бути здійснене через різноманітні програми волонтерства, краудфандингу та інших соціальних ініціатив.

Управління цифровою нематеріальною культурною спадщиною може бути важливим завданням для збереження та популяризації культурних традицій та народних звичаїв. Одним зі способів управління цифровою нематеріальною культурною спадщиною є використання моделей глибокого навчання.

Моделі глибокого навчання, такі як нейронні мережі, можуть бути використані для розпізнавання та аналізу нематеріальної культурної спадщини, такої як фольклорні тексти, народні пісні, ритуали та інші форми культурного доробку.

Наприклад, за допомогою нейронних мереж можна створити систему, яка здатна розпізнавати народні пісні та віднести їх до певного регіону чи етнічної групи. Також можливо використовувати нейронні мережі для створення інтерактивних систем, які забезпечують доступ до культурної спадщини та навіть відтворення фольклорних тексти з можливістю вибору різних варіантів виконання.

Однак, використання моделей глибокого навчання для управління цифровою нематеріальною культурною спадщиною також потребує врахування етичних та культурних аспектів. Наприклад, необхідно забезпечувати конфіденційність та безпеку даних, збереження автентичності та ідентичності культурної спадщини та уникати спотворення традицій та використання їх для комерційних цілей.

1.1. Склад земель історико-культурного призначення

Згідно з положеннями пункту «г» статті 150 Земельного кодексу України, землі історико-культурного призначення віднесені до категорії особливо цінних земель. Це статус, що надає їм не лише важливого правового значення, але й підвищує необхідність постійного моніторингу їхнього стану та використання. Особливий статус таких земель обумовлений їхнім культурним, історичним, науковим та архітектурним значенням для національної спадщини України, а також для всього людства, у випадку об'єктів світової культурної спадщини. Моніторинг земель історико-культурного призначення набуває надзвичайної важливості для збереження унікальних культурних цінностей, що розташовані на цих територіях, та для запобігання їхньому руйнуванню або неналежному використанню.

Будь-яке порушення або незаконне використання таких земель може призвести до втрати важливих культурних та історичних свідчень, які вже ніколи не зможуть бути відновлені. Саме тому законодавець виділяє ці землі в окрему категорію особливо цінних, яка потребує постійного контролю та моніторингу.

З точки зору юридичного забезпечення, стаття 150 Земельного кодексу України чітко регламентує правила використання особливо цінних земель, серед яких і землі історико-культурного призначення. Будь-які зміни у статусі або призначенні таких земель повинні бути погоджені з органами охорони культурної спадщини та відповідати нормам, встановленим законодавством України. Це забезпечує правовий захист земель від неконтрольованих дій, які можуть призвести до руйнівних наслідків для об'єктів культурної спадщини.

Землі історико-культурного призначення охоплюють території, на яких розташовані об'єкти, що мають історичне, архітектурне, мистецьке або культурне значення. Це можуть бути історико-культурні заповідники, музеї-заповідники, меморіальні парки, кладовища (як цивільні, так і військові), пам'ятники та меморіальні споруди, що відзначають визначні історичні події або особистостей. До цієї категорії належать також городища, кургани, давні

поховання, пам'ятники археології, скульптури та інші об'єкти, що відображають культурний або військовий контекст минулих епох. Важливе місце займають також архітектурні комплекси, історичні центри міст, стародавні забудови, будівлі цивільного, промислового, військового або культового призначення, а також об'єкти народного зодчества і садово-паркової архітектури.

Законодавство України, зокрема Земельний кодекс (ЗКУ) і Закон України "Про охорону культурної спадщини", визначає склад і категорії земель історико-культурного призначення. Згідно зі ст. 53 ЗКУ [290], до цієї категорії включаються території, на яких розташовані культурні пам'ятки, археологічні зони та інші об'єкти, що мають наукове та історичне значення. Однак, Закон України "Про охорону культурної спадщини"[291] у ст. 34 доповнює цей перелік, додаючи до земель історико-культурного призначення охоронні зони, які відіграють важливу роль у захисті пам'яток від негативних впливів. Це створює певні правові неузгодженості, оскільки ЗКУ не завжди враховує ці додаткові території, однак такий підхід не слід вважати спробою обмежити категорію земель культурного призначення.

Землі історико-культурного призначення можна узагальнено визначити як території, на яких розміщені об'єкти, що мають історичну, архітектурну або культурну цінність. Вони можуть включати не лише самі об'єкти, але й охоронні зони навколо них, що забезпечують додатковий захист від руйнівного впливу людської діяльності або природних факторів. Ці території можуть належати також до інших категорій земель, таких як землі природно-заповідного фонду або житлової забудови, що додатково ускладнює їхній правовий статус.

Одним із викликів, пов'язаних із землею історико-культурного призначення, є те, що певні території, як-от заповідники народних художніх промислів, формально не віднесені до цієї категорії, хоча їхнє призначення та режим часто співпадають із загальними принципами збереження культурної спадщини. Наприклад, Закон України "Про народні художні промисли" регулює питання охорони таких заповідних зон, однак вони не згадуються в контексті земель

історико-культурного призначення у ЗКУ, що створює певну правову невизначеність і потребує подальшого доопрацювання законодавства.

Землі історико-культурного призначення є важливими як з точки зору культурного збереження, так і для національної ідентичності. В Україні на цих територіях знаходиться понад 140 тисяч об'єктів нерухомих пам'яток культурної спадщини, що підлягають державній охороні. Загальна площа таких земель складає близько 43,7 тисяч гектарів, і ці території мають велике значення для наукових досліджень, туризму та культурного виховання суспільства.

Землі історико-культурного призначення можуть також бути предметом різних форм землекористування. Їх використовують не лише для збереження об'єктів культурної спадщини, але й для організації наукових, освітніх та туристичних заходів. Вони є об'єктами, які потребують комплексного управління, що включає планування, охорону, регуляцію доступу до територій та контроль за діяльністю, що може вплинути на збереження цих об'єктів.

Значення цих територій постійно зростає у зв'язку з розвитком туризму, оскільки історичні пам'ятки привертають велику кількість відвідувачів як з України, так і з-за кордону. Однак це створює також ризики для збереження об'єктів, особливо в умовах недостатнього контролю або незадовільного стану інфраструктури. Важливим аспектом є створення умов для сталого туризму, який би забезпечував збереження культурної спадщини, але не завдавав шкоди самим об'єктам.

Крім того, землі історико-культурного призначення можуть перебувати під загрозою через незаконну діяльність, як-от незаконні будівельні роботи, пошук археологічних артефактів або зміни у землекористуванні без належного погодження з органами охорони культурної спадщини. Це може призвести до значних втрат як для науки, так і для суспільства в цілому. Одним із засобів боротьби з такими явищами є створення ефективних механізмів моніторингу та контролю за використанням цих земель, що можуть включати сучасні технології, такі як дистанційне зондування Землі та геоінформаційні системи.

У сучасних умовах важливу роль у збереженні земель історико-культурного призначення відіграє міжнародна співпраця. Багато об'єктів на території України мають світове значення і входять до переліку об'єктів всесвітньої спадщини ЮНЕСКО. Це накладає додаткові обов'язки на державу щодо їхнього збереження і забезпечення належного управління. Водночас, міжнародні організації та інститути часто надають фінансову і технічну допомогу для збереження таких об'єктів, що допомагає підтримувати їхню цілісність і зберігати для майбутніх поколінь.

Землі історико-культурного призначення є важливою складовою частиною культурного ландшафту України. Вони відіграють вирішальну роль у збереженні національної пам'яті та забезпеченні передачі культурної спадщини майбутнім поколінням. Завдяки ефективному управлінню цими землями можна не лише зберегти важливі об'єкти, але й забезпечити їхнє належне використання в економічних, туристичних та освітніх цілях.

Належне правове регулювання і контроль за станом земель історико-культурного призначення є важливим завданням для держави. Водночас, це питання потребує постійного вдосконалення законодавства, включаючи узгодження між різними законами і кодексами, які регулюють цю сферу. Лише комплексний підхід, що враховує як правові, так і практичні аспекти управління землями історико-культурного призначення, дозволить забезпечити їхнє збереження і сталий розвиток.

Сучасні технології моніторингу та управління земельними ресурсами можуть суттєво полегшити процес збереження таких об'єктів. Наприклад, використання супутникових знімків дозволяє в режимі реального часу відстежувати будь-які зміни у землекористуванні на цих територіях, а геоінформаційні системи допомагають інтегрувати інформацію про об'єкти культурної спадщини та їхні охоронні зони, що дозволяє краще планувати їхнє використання і охорону.

Використання земель історико-культурного призначення, регульоване статтею 54 Земельного кодексу України [290], є важливим аспектом правового регулювання, яке спрямоване на збереження культурної спадщини країни. Землі

цього типу можуть перебувати у власності держави, комунальних органів або приватних осіб. Це забезпечує гнучкість у використанні таких земель, але водночас накладає значні обмеження та вимоги щодо їхнього використання для збереження об'єктів культурної спадщини, що мають особливе історичне, архітектурне або культурне значення.

Землі історико-культурного призначення – це не просто території, де знаходяться пам'ятки, а й простір, який потребує особливого підходу до управління. Історико-культурні заповідники, об'єкти всесвітньої спадщини, меморіальні комплекси, музеї просто неба та інші подібні об'єкти мають бути захищені не тільки від фізичної руйнації, але й від діяльності, яка може негативно впливати на їхнє існування та сприйняття. З метою забезпечення такого захисту навколо цих об'єктів встановлюються спеціальні охоронні зони, у межах яких заборонена будь-яка діяльність, що може зашкодити культурним об'єктам або перешкоджати їхньому використанню за призначенням. Охоронні зони є інструментом правового регулювання, який дозволяє обмежити будівельну діяльність, розвиток промисловості або інші види діяльності, що можуть зашкодити культурним пам'яткам.

Одним із найважливіших аспектів управління землями історико-культурного призначення є визначення та впровадження чіткого порядку їхнього використання, що закріплюється у спеціальному законодавстві. Наприклад, Закон України "Про охорону культурної спадщини" встановлює особливі режими використання таких земель, що мають на меті збереження історичної та культурної цінності об'єктів. Цей закон деталізує права й обов'язки власників та користувачів таких земель, а також накладає певні обмеження на їхнє використання.

Стаття 54-1 Земельного кодексу України також містить положення, що стосуються обмежень у використанні земель у межах територій, які включають пам'ятки культурної спадщини, археологічні зони та історико-культурні заповідники [290]. Це важливо, оскільки такі землі не можуть використовуватися у будь-який спосіб, який суперечить їхньому культурному або історичному

призначенню. Наприклад, на територіях, де розташовані археологічні пам'ятки або історичні ареали міст, можуть бути встановлені обмеження щодо будівництва, сільськогосподарської діяльності або інших форм землекористування. Це робиться для того, щоб уникнути будь-якої діяльності, яка могла б призвести до пошкодження або руйнації культурних цінностей.

Такі обмеження накладаються незалежно від того, кому належать ці землі – державі, громаді або приватним особам. Всі суб'єкти землекористування повинні дотримуватися встановлених правил та режимів охорони. Цей режим включає обмеження на будівельні роботи, регуляцію інфраструктурних проєктів, контроль над використанням природних ресурсів і навіть обмеження у сфері туризму та рекреації, якщо це може призвести до негативних наслідків для пам'яток.

Особливо важливою є роль Державного земельного кадастру у забезпеченні дотримання таких обмежень. Усі обмеження щодо використання земель історико-культурного призначення повинні бути чітко зафіксовані у кадастрі, що забезпечує їхню публічність та юридичну значущість. Це означає, що будь-які дії щодо цих земель, включаючи продаж, передачу в оренду або зміну їхнього цільового призначення, повинні відповідати правовим нормам і бути погоджені з органами охорони культурної спадщини. У кадастрі міститься інформація про точні межі земельних ділянок, що підпадають під обмеження, а також їхнє правове положення.

Одним із інструментів, що забезпечує правильне використання таких земель, є науково-проектна документація, яка визначає режим їхнього використання. Ця документація розробляється з урахуванням історичних, культурних і археологічних особливостей об'єктів, що знаходяться на цих землях. Вона включає в себе рекомендації щодо забудови, охоронних заходів і дозволених видів діяльності, що можуть проводитися на відповідних територіях. Поки така документація не буде затверджена, власники та користувачі земель мають керуватися загальними положеннями законодавства, що стосуються охорони культурної спадщини.

Землі історико-культурного призначення є особливими об'єктами, які потребують ретельного регулювання та захисту. Вони відображають культурну ідентичність нації, тому їхнє збереження є важливим завданням як для держави, так і для суспільства в цілому. Однак, незважаючи на те, що законодавство регулює більшість аспектів використання таких земель, на практиці часто виникають труднощі з дотриманням вимог щодо охорони пам'яток. Це може бути пов'язано як з браком фінансування для належної охорони, так і з недосконалістю механізмів контролю та моніторингу.

Окрім законодавчих вимог, у використанні земель історико-культурного призначення важливо враховувати соціальні та економічні аспекти. В умовах зростання урбанізації, розвитку інфраструктури та туристичної індустрії, ці землі можуть стати об'єктами тиску з боку забудовників або приватних інвесторів, що може призвести до їхньої деградації. З одного боку, розвиток туризму на таких землях може сприяти збереженню та популяризації культурної спадщини, а з іншого – без належного контролю та планування це може призвести до комерціалізації та втрати автентичності пам'яток.

Міжнародні зобов'язання України у сфері охорони культурної спадщини, зокрема в рамках ЮНЕСКО, також відіграють важливу роль у визначенні підходів до використання земель історико-культурного призначення. Об'єкти всесвітньої спадщини, розташовані на території України, підлягають особливому режиму охорони, який відповідає міжнародним стандартам. Це накладає додаткові зобов'язання на державу щодо забезпечення їхньої цілісності, а також створює можливості для залучення міжнародної підтримки у вигляді грантів або технічної допомоги для збереження таких об'єктів.

1.2. Моніторинг земель історико-культурного призначення

Моніторинг земель історико-культурного призначення — це комплекс заходів, спрямованих на виявлення та запобігання будь-яким загрозам, які можуть негативно впливати на стан цих територій. Це включає контроль за

змінами у землекористуванні, будівництвом, екологічним станом земель, а також запобігання незаконній діяльності, такій як археологічне мародерство чи неконтрольовані земляні роботи. Важливо, що цей моніторинг не обмежується лише державними органами: місцеві громади, наукові установи, приватні особи та міжнародні організації також залучаються до процесу збереження культурної спадщини.

Моніторинг земель історико-культурного призначення є важливим інструментом для збереження культурної спадщини, забезпечення її цілісності та запобігання негативним впливам людської діяльності або природних процесів. Цей процес охоплює систематичне спостереження, оцінку стану та контроль за використанням земель, на яких розташовані об'єкти історичного, археологічного, культурного або архітектурного значення. Його основною метою є забезпечення збереження цих територій від руйнівного впливу, а також надання можливості своєчасно виявляти потенційні загрози, що можуть призвести до знищення або пошкодження об'єктів.

Землі історико-культурного призначення мають особливий статус в законодавстві України і перебувають під охороною держави. Ці землі належать до категорії особливо цінних земель, що підкреслює їх важливість для суспільства та майбутніх поколінь. Моніторинг таких земель дозволяє не лише зберегти їхній поточний стан, але й запобігти незворотним втратам, які можуть бути спричинені природними катаклізмами, незаконними будівельними роботами або неконтрольованою урбанізацією.

Моніторинг земель історико-культурного призначення базується на використанні сучасних технологій, таких як дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційні системи (ГІС), супутникові знімки та БПЛА. Використання цих технологій дозволяє проводити постійний нагляд за великими територіями, швидко виявляти зміни в землекористуванні або появу незаконної діяльності. ДЗЗ, наприклад, дає можливість аналізувати зміни в рослинному покриві, структуру ґрунту, виявляти сліди земляних робіт або будівельної активності, які можуть загрожувати об'єктам культурної спадщини. Геоінформаційні системи

допомагають інтегрувати дані з різних джерел, зокрема кадастрових реєстрів, архівних документів і супутникових зображень, що дозволяє створювати комплексні карти зони охорони пам'яток та історичних об'єктів.

Одним із ключових аспектів моніторингу є забезпечення правового захисту земель історико-культурного призначення. В Україні правові норми щодо охорони цих земель регламентуються Земельним кодексом України [290], Законом "Про охорону культурної спадщини"[291] та іншими нормативно-правовими актами. Моніторинг дозволяє забезпечити дотримання цих законодавчих вимог, контролювати діяльність на землях культурного призначення, вчасно реагувати на порушення і забезпечувати юридичне оформлення усіх змін, що відбуваються на цих територіях. Важливим є внесення інформації про статус земель і режим їхнього використання в Державний земельний кадастр, що забезпечує прозорість і доступність даних для всіх зацікавлених сторін.

Ще одним важливим завданням моніторингу є попередження природних катастроф і процесів, що можуть загрожувати культурним об'єктам. Ерозія ґрунту, зсуви, повені та інші природні явища можуть призвести до руйнування історичних пам'яток, археологічних комплексів і споруд, що мають культурне значення. За допомогою технологій моніторингу можна відстежувати зміни в природних умовах та оцінювати їхній вплив на збереження об'єктів. Сучасні програми аналізу даних дозволяють прогнозувати можливі загрози і розробляти плани запобігання руйнуванню або зменшення шкоди, що може бути завдана природними процесами.

Моніторинг земель історико-культурного призначення також виконує важливу роль у боротьбі з незаконною діяльністю. Незаконне будівництво, розкопки або сільськогосподарська діяльність на таких землях можуть призвести до втрати цінних археологічних артефактів або руйнування архітектурних пам'яток. Систематичний моніторинг дозволяє виявляти такі порушення на ранніх етапах і оперативно вживати заходів для їхнього припинення. Окрім

цього, важливу роль відіграє контроль за будівельними роботами поблизу охоронних зон, які можуть створювати загрозу для цілісності пам'яток.

На додаток до технічних засобів, важливу роль у моніторингу відіграють наукові дослідження та археологічні експедиції. Вони допомагають уточнювати межі історичних та культурних зон, виявляти нові об'єкти або підтверджувати цінність вже відомих пам'яток. Археологічні розкопки, проведені з дотриманням сучасних методологічних стандартів, дозволяють не лише розширити знання про минуле, але й забезпечити їхнє документування для подальшого збереження.

Крім того, міжнародні організації, такі як ЮНЕСКО, відіграють важливу роль у підтримці моніторингу земель історико-культурного призначення. Об'єкти, внесені до списку світової спадщини, підлягають особливому режиму моніторингу і збереження відповідно до міжнародних стандартів. Це створює додаткові можливості для залучення фінансових ресурсів та міжнародної технічної допомоги для підтримки таких об'єктів.

Моніторинг земель історико-культурного призначення також тісно пов'язаний із питаннями місцевого самоврядування та громадської участі. Місцеві громади часто мають найближчий контакт з об'єктами культурної спадщини і можуть допомагати у збереженні цих об'єктів. Залучення громадськості до процесу моніторингу сприяє підвищенню відповідальності за збереження культурної спадщини, а також створює можливості для розвитку місцевих ініціатив у цій сфері [292].

В цілому, моніторинг земель історико-культурного призначення є необхідним для збереження культурної спадщини України та її передачі майбутнім поколінням. Він поєднує в собі правові, наукові, технічні та соціальні аспекти, спрямовані на забезпечення ефективного контролю за станом земель та об'єктів, що мають історичне, археологічне або культурне значення. Завдяки постійному моніторингу можна своєчасно реагувати на загрози, планувати заходи з охорони пам'яток і забезпечувати їхнє належне використання в інтересах суспільства.

1.3. Дистанційні та неінвазивні методи дослідження земель історико-культурного призначення

1.3.1. Супутникове оптико-електронне знімання

Супутникове оптико-електронне знімання - це потужний інструмент для моніторингу земель історико-культурного призначення. Він дозволяє отримувати високоякісні зображення з поверхні Землі з високою просторовою розрізненістю і деталізацією.

Одним з основних застосувань супутникового знімання є вивчення та моніторинг змін у ландшафті, у тому числі тих, що пов'язані з культурними об'єктами. Супутникові знімки можуть бути використані для виявлення нових об'єктів, а також для моніторингу змін у наявних об'єктах, зокрема збереження різних історичних пам'яток та забезпечення їх охорони.

Для досягнення максимальної ефективності використання супутникового знімання під час моніторингу земель історико-культурного призначення, необхідно враховувати декілька чинників. Одним з них є просторова розрізненість знімків - вона повинна бути достатньою для виявлення найменших змін у стані земельних ділянок історико-культурного призначення. Також важливо враховувати часовий і просторовий аспекти знімання, зокрема періодичність знімків та їх покриття певної території [5, 6, 7].

Важливим етапом є оцінка точності ортотрансформації космічних зображень, отриманих з різних супутників, для визначення меж земель історико-культурного призначення. Це надає можливість систематично відслідковувати зміни та гарантує достовірність отриманих даних [115, 116].

У випадку оцінки похибки ЦМР при ортотрансформації космічних знімків на гірській території, атмосферні умови можуть впливати на точність ЦМР. Важливо узгоджувати методи та алгоритми для зменшення систематичних та випадкових похибок при використанні космознімків в гірських регіонах [116].

У світі сучасних досліджень стародавніх кладовищ використовуються новітні технології, такі як ДЗЗ та картографічні матеріали, для отримання

детальної інформації про їхню територію та структуру. Це надає можливість аналізу змін у розташуванні та стані кладовищ, виявлення археологічних об'єктів та вивчення їхньої взаємодії з навколишнім середовищем [58].

Порівняльний аналіз збереження територій концентраційних таборів в Україні з європейським досвідом визначає загальні тенденції та відмінності у підходах до збереження історичних об'єктів. Це допомагає висвітлити можливості для покращення управління та збереження концентраційних таборів в Україні, враховуючи взяті на озброєння підходи та практики у Європі [61, 62].

Використання супутникових знімків для моніторингу стану пам'яток культурної спадщини має значний потенціал у забезпеченні їх захисту та збереження [25].

Використання технологій дистанційного зондування для моніторингу історичних центрів міст, які є світовими об'єктами культурної спадщини, визначається як ключовий аспект. Аналіз супутникових даних дозволяє оперативно виявляти зміни та потенційні загрози, сприяючи ефективному управлінню ризиками в умовах небезпеки (рис.1.2).

Дослідження в сфері археології та культурної спадщини в різних регіонах світу вказують на великий потенціал та важливість використання технологій дистанційного зондування та супутникових мультиспектральних даних для вивчення та збереження культурної спадщини [190, 182].

Наприклад, у Північному заході Індії дослідження використовує історичні карти для виявлення та обстеження могильних утворень. Результати свідчать про великий потенціал для вивчення розподілу об'єктів культурної спадщини в Центральній Азії. У Центральній Індії використання дистанційного зондування дозволяє виявляти трансформації ґрунтів та ландшафту, які містять об'єкти культурної спадщини, що допомагає визначити можливі ризики для цих об'єктів [151, 239].



Рис.1.2. Перспективи використання супутникових знімків для моніторингу стану пам'яток культурної спадщини

У Кіпрі, проєкт Athena є центром відмінності з дистанційного зондування, використовуючи супутникові дані для дослідження та збереження культурної спадщини [153]. Дослідження в Кіпрі аналізує ризики для культурної спадщини, використовуючи дистанційне зондування та геоінформаційні системи, а також вивчає вплив природних та антропогенних чинників на збереження об'єктів культурної спадщини. Також, досліджується практичне використання дистанційного зондування для управління об'єктами, що підкреслює ефективність та важливість сучасних технологій у збереженні та вивченні культурних об'єктів [133, 259].

У дослідженні еволюції та динаміки альпійських ландшафтів активно використовуються методи дистанційного зондування для аналізу змін у

природному середовищі. Цей підхід дозволяє не лише вивчати, але й визначати вплив природних та антропогенних факторів на ландшафти Альп [203].

Управління об'єктами культурної спадщини використовує індекси дистанційного зондування та методи просторового аналізу, сприяючи ефективному моніторингу та управлінню станом та збереженням культурних об'єктів [136].

Об'єднуючи описи досліджень, що розглядають використання супутникових знімків та дистанційного зондування для моніторингу та дослідження культурної спадщини, підкреслюється загальний підхід та важливість цих технологій у збереженні та вивченні історичних і археологічних об'єктів [101, 245].

Аерокосмічна зйомка розглядається як ефективний інструмент для дослідження та охорони археологічної спадщини, враховуючи організаційні та правові аспекти використання таких технологій [19, 204, 1].

Основні результати наукового проєкту «Правові та організаційні аспекти використання аерокосмічної зйомки для дослідження й охорони археологічної спадщини України» визначають ключовий внесок та значущість використання аерокосмічних методів у сфері археологічного дослідження та збереження культурної спадщини.

Глибоке вивчення даних дозволяє систематизувати та вивчити правові аспекти використання аерокосмічних зйомок для дослідження та охорони археологічної спадщини в Україні. Враховуючи організаційні вимоги, проєкт розкриває потенціал сучасних технологій в археології та підкреслює їхню ефективність у збереженні та вивченні цінних історичних об'єктів.

Загальні висновки проєкту "Advances in Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management" представленого в роботі авторів Rosa Lasaponara та Nicola Masini, [68] висвітлюють науковий внесок у використанні сучасних методів дистанційного зондування для археологічних досліджень та управління культурною спадщиною.

Проєкт об'єднує різні аспекти використання дистанційного зондування для археологічних досліджень, акцентуючи увагу на передових технологіях у

вивченні ландшафтів, археологічних розкопок та інших аспектів культурної спадщини. Загальні висновки проекту підкреслюють необхідність розробки та вдосконалення правових та організаційних аспектів використання цих технологій для забезпечення їхнього успішного застосування в археології та управлінні культурною спадщиною [68].

Використання супутникової зйомки дозволяє отримати високоякісні та детальні зображення з висоти, що дозволяє досліджувати об'єкти, недоступні для звичайних земних методів. Однак, використання супутникової зйомки для дослідження та охорони археологічної спадщини потребує дотримання певних організаційних та правових аспектів, а саме [14]:

1. *Отримання дозволів.* Для проведення супутникової зйомки для дослідження та охорони археологічної спадщини необхідно отримати дозволи від відповідних органів влади. Це можуть бути місцеві, національні та міжнародні органи влади, які регулюють використання аерокосмічних засобів.
2. *Забезпечення конфіденційності.* Деякі об'єкти археологічної спадщини можуть бути конфіденційними або захищеними законом, тому використання аерокосмічних засобів для їх дослідження і охорони потребує забезпечення конфіденційності отриманих даних та забезпечення їх захисту від несанкціонованого доступу.
3. *Визначення обсягу робіт.* Для забезпечення ефективного та безпечного використання аерокосмічних засобів для дослідження та охорони археологічної спадщини потрібно визначити обсяг робіт та необхідний період часу для їх виконання.

Використання оптико-електронних космічних знімальних систем у дослідженні земель історико-культурного призначення має переваги у високій просторовій розрізненості та широкому охопленні території [22]. Завдяки цим системам можна отримати значущу інформацію про стан об'єктів та їх розташування, сприяючи ефективному моніторингу та збереженню культурної спадщини. Однак, недоліками можуть бути обмеження у зображенні при поганих

атмосферних умовах та неможливість отримання деталізованої інформації в густо забудованих або затемнених місцях.

1.3.2. Супутникове радіолокаційне знімання

Супутникове радіолокаційне знімання - це ще один потужний інструмент для моніторингу земель історико-культурного призначення. Радіолокаційна технологія базується на відбиванні сигналів від поверхні Землі, що дозволяє отримувати зображення з високою просторовою розрізненістю інформації про рельєф, структуру і склад поверхні, а також про певні об'єкти на поверхні, включаючи культурні та історичні об'єкти.

Одним з основних застосувань супутникової радіолокації є моніторинг змін у ландшафті, виявлення відмінностей у рельєфі та зміни морфологічної структури, в тому числі тих, що пов'язані з культурними об'єктами. Це може бути особливо корисно в місцях, де доступність для традиційних методів знімання є обмеженою.

Супутникове радіолокаційне знімання також може бути використане для виявлення складних археологічних об'єктів, таких як поховання або залишки старовинних замків та фортець. Використання радіолокаційної технології дає змогу отримати зображення під поверхнею землі, що дозволяють виявити структури, які можуть бути невидимі на поверхні, такі як фундаменти будівель або стародавні поховання.

У цілому, супутникове радіолокаційне знімання є важливим інструментом для моніторингу земель історико-культурного призначення, забезпечуючи можливість отримання високоякісних зображень та важливої інформації для збереження історичної спадщини [238].

Супутниковий моніторинг повеней на землях історико-культурного призначення є важливим завданням, оскільки забезпечує оперативний контроль за різними аспектами повеней, такими як рівень води, її рух і розташування постраждалих територій. Для цього можуть використовуватися дані

радіолокаційної зйомки С-діапазону, які дозволяють отримувати зображення з високою просторовою розрізненістю та точністю.

Радіолокаційна зйомка С-діапазону дозволяє вимірювати висоту води та відстежувати її рух, що допомагає розраховувати масштаб повені та прогнозувати її подальший розвиток. Крім того, ці дані можуть використовуватися для визначення розташування постраждалих територій і оцінки рівня пошкоджень.

Однією з головних переваг використання радіолокаційної зйомки С-діапазону є можливість збору даних незалежно від погодних умов і освітлення, що забезпечує постійний моніторинг повеней. Крім того, дані можуть бути опрацьовані та проаналізовані за допомогою різних програмних засобів, що дозволяє отримати різноманітну інформацію про повінь та її наслідки.

Однак, використання радіолокаційної зйомки С-діапазону має деякі обмеження, такі як складність розрізнення деяких об'єктів, таких як дерева та будівлі, а також складність інтерпретації отриманих даних [26].

Застосування радіоінтерферометрії в контексті культурної спадщини дозволяє постійно відстежувати рухи структур і деформації ґрунту. Ця технологія надає інформацію про стійкість археологічних об'єктів, що дозволяє вживати заходи на ранніх етапах для забезпечення їхньої безпеки. Загалом, інтеграція супутникових радіотехнологій внесе значний вклад у моніторинг і збереження як природних ландшафтів, так і культурної спадщини [253, 191].

Тема радіолокації з синтезованою апертурою надає комплексний огляд принципів і роботи цих методів. Це важливий ресурс для вивчення та освоєння принципів роботи радіолокаційних систем, їхньої апертури і можливостей в опрацьованні зображень [205, 248, 206].

Загальна тенденція полягає у використанні сучасних методів опрацьовання радіолокаційних даних для покращення розуміння та моніторингу земної поверхні, що робить ці дослідження важливими для наукових і прикладних робіт у галузі дистанційного зондування та геоінформаційних технологій [266, 74].

Ці теми сприяють розвитку та вдосконаленню методів інтерферометрії у дистанційному зондуванні об'єктів культурної спадщини, що розширює можливості моніторингу та аналізу впливу різних факторів на історичні та культурні об'єкти [246].

Використання InSAR дозволяє отримувати детальні дані про зміни в культурних об'єктах з високою просторовою та часовою розрізненістю. Техніка багатотемпорального InSAR виявляє та аналізує мікрорухи частин будівель, що є важливим для попередження можливих пошкоджень і збереження цінних історичних об'єктів [185, 199, 252, 255].

Радіолокаційна інтерферометрія відкриває нові перспективи для дослідження потенційних небезпек і загроз, допомагаючи глибше зрозуміти стан історичних об'єктів. Метод диференційної радіолокаційної інтерферометрії є інноваційним інструментом для моніторингу структурних і земельних деформацій, що стає ефективним засобом для збереження та сталого розвитку об'єктів культурної спадщини [141, 220, 267].

Аналіз використання радіолокаційної інтерферометрії в контексті комплексів історико-культурної спадщини показує, що цей метод не лише визначає потенційні небезпеки і зміни у стані археологічних структур, але й забезпечує високу просторову розрізненість для отримання детальних даних про рухи землі та деформації об'єктів. Це має важливе значення для науковців і консерваторів, які вивчають і забезпечують збереження історичних споруд [254, 268].

1.3.3. Аерознімання

Аерознімання є одним з найбільш ефективних методів моніторингу земель історико-культурного призначення. Цей метод використовує пілотовані літаки або безпілотні літальні апарати (БПЛА), які обладнані спеціальними камерами, що можуть отримувати зображення з високою просторовою розрізненістю. Зображення, отримані з фіксацією географічних координат центрів проекцій, можуть бути опрацьовані та інтерпретовані за допомогою спеціального

програмного забезпечення для отримання важливої інформації про Землю і об'єкти на ній.

Застосування аерознімання для моніторингу земель історико-культурного призначення має декілька переваг. По-перше, цей метод дозволяє отримувати зображення з високою просторовою розрізненістю, що дозволяє виявляти навіть найменші деталі, включаючи структури та ознаки, пов'язані з історичними об'єктами. По-друге, аерознімання дозволяє швидко та ефективно охоплювати великі території, що забезпечує можливість виявляти та моніторити зміни у ландшафті на значній площі [17].

Крім того, аерознімання може бути використане для виявлення структур та об'єктів, які можуть бути невидимими на поверхні землі, таких як фундаменти будівель або складні археологічні структури. Завдяки технології інфрачервоного зондування, аерознімання може також допомогти виявити структури, які зазвичай не видно на поверхні землі через рослинність [21].

Аерознімання з пілотованих літальних апаратів

Аерознімання з пілотованих літальних апаратів (ЛА) є одним з ефективних методів моніторингу земель історико-культурного призначення. Для цього використовуються спеціальні літальні апарати, обладнані датчиками, що забезпечують високу просторову розрізненість і точність знімання.

Перевагами аерознімання з пілотованих ЛА є те, що вони можуть працювати на великих висотах і дозволяють отримувати зображення з високою якістю та просторовою розрізненістю. Це дозволяє знімати великі території за короткий проміжок часу, а також виявляти навіть найменші деталі із високою точністю. Для опрацювання інформації, отриманої з пілотованого ЛА, можна використовувати програмні засоби, що дозволяють аналізувати дані та визначати потрібні параметри.

Окрім того, аерознімання з пілотованих ЛА дає змогу виявляти найскладніші структури, пов'язані з історичними об'єктами, та визначати їхню метрику і геометричні параметри. Такі дані можуть бути використані для відтворення 3D-

моделей історичних об'єктів, що забезпечує їх детальніше вивчення і збереження.

Однак, використання пілотованих ЛА має свої недоліки, зокрема, це дорога технологія і вимагає високо кваліфікованого персоналу для її використання. Крім того, з моменту запуску до приземлення літального апарату займає певний час, що може призвести до затримок в зборі і обробці даних.

Фотограмметричні методи дистанційного зондування земної поверхні є корисним інструментом для археологів, які шукають сліди минулих цивілізацій та культур. Ці методи включають збір даних про земну поверхню з висоти за допомогою спеціальних камер, встановлених на літаках.

Фотограмметрія також використовується для виявлення різних геологічних формацій, які можуть вказувати на наявність археологічних пам'яток під землею. Наприклад, зображення з висоти можуть допомогти виявити зміни в рельєфі землі, які можуть бути пов'язані з давніми поселеннями або могилами.

В Україні використання аерозйомки для охорони об'єктів культурної спадщини регулюється різними законами та нормативними документами. Згідно зі статтею 28 Закону України "Про охорону культурної спадщини", зйомка та використання аерозйомки об'єктів культурної спадщини можливі лише за дозволом компетентних органів у сфері охорони культурної спадщини. Дозвіл на зйомку надається на підставі письмової заяви від юридичних та фізичних осіб, які мають право здійснювати діяльність у цій галузі.

Також, відповідно до Правил використання засобів зондування Землі, затверджених наказом Державної служби з нагляду за здійсненням розвідувальної діяльності від 27.02.2015 № 27, зйомка об'єктів культурної спадщини можлива лише за дотримання певних вимог. Зйомка не повинна порушувати цілісність та оригінальний вигляд об'єктів культурної спадщини та не повинна створювати загрозу для їх збереження. Під час зйомки не допускається захоплення зображень інших об'єктів, які не мають стосунку до культурної спадщини.

Для дослідження напівзруйнованих або повністю зруйнованих об'єктів історико-культурної спадщини часто використовуються дані архівної аерозйомки з пілотованих літальних апаратів, особливо періодів Другої світової війни та радянського періоду.

Дослідження, пов'язані з визначенням меж та реконструкцією історичних об'єктів за допомогою аеро- та картографічних матеріалів, є важливими для збереження та документування культурної спадщини. Ці дослідження спрямовані на точне визначення меж старовинних місць поховань за допомогою архівних аерознімків та картографічних даних. Методика базується на ретельному аналізі архівних матеріалів для відтворення розташування та розмірів старовинних кладовищ, з особливою увагою до виявлення територій, пов'язаних із сакральними об'єктами [114, 42-46].

Серед наукових праць також є ряд досліджень, де методика включає обробку та аналіз архівних картографічних матеріалів у віртуальному середовищі. Це дозволяє створювати точні та детальні карти об'єктів історико-культурної спадщини [52, 54, 60].

Використання аерозйомки та високоточних методів опрацювання зображень дозволяє археологам отримувати детальні та об'єктивні дані про ландшафтні особливості, археологічні об'єкти та їх оточення. Ці методи допомагають виявляти структури та артефакти, які можуть бути непомітними на поверхні, і забезпечують важливий інструмент для попередження руйнувань та втрати історичних цінностей [55, 56, 57].

У контексті України, де культурна спадщина має особливу вагу, правові засади використання аерозйомки для охорони об'єктів культурної спадщини є критично важливими. Археологічні розкопки та збереження історичних об'єктів пов'язані зі специфічними вимогами та відповідальністю перед минулими поколіннями та майбутніми нащадками. Правовий фреймворк повинен забезпечити баланс між науковими дослідженнями та збереженням культурної спадщини, а також враховувати етичні аспекти збереження цілісності історичних місць. Законодавство повинно також визначити процедури та стандарти для

використання аерозйомки, забезпечуючи високий рівень захисту та конфіденційності інформації, отриманої за допомогою дистанційного зондування [9].

Такий підхід до використання фотограмметричних методів вписується в загальний контекст застосування новітніх технологій в археології та дослідженнях історико-культурних артефактів. Він також підкреслює важливість правового регулювання у цьому процесі, щоб забезпечити збалансований розвиток науки та збереження культурної спадщини для майбутніх поколінь [23].

Аналіз артефактів, зафіксованих на аерознімках, дозволяє розкрити культурні та релігійні аспекти історичних об'єктів. Використання аерознімків як засобу документування та аналізу сприяє вивченню культурної семантики та контексту об'єктів, що є важливим для розуміння їх значення в культурному та релігійному вимірах.

Зазначена техніка розширює горизонти досліджень і дозволяє науковцям та дослідникам глибше дізнатися про історичні та культурні аспекти об'єктів. Використання аерознімків, особливо у поєднанні з сучасними технологіями опрацювання, стає потужним інструментом для археологічних та культурологічних досліджень, дозволяючи виводити нові знання та змінювати способи аналізу та розуміння культурних артефактів [67, 225].

Застосування перспективних аерознімків дозволяє отримати унікальний погляд на об'єкти культурної спадщини, що забезпечує більш детальне та реалістичне відображення їх структури. Цей підхід не лише полегшує документування, але й розширює можливості аналізу та інтерпретації археологічних об'єктів. Використання перспективних аерознімків у культурному документуванні відкриває нові перспективи для досліджень та збереження спадщини [156, 79].

Застосування штучного інтелекту та дистанційного зондування для археологічних досліджень вказує на те, що сучасні технології можуть значно полегшити та прискорити процес археологічного дослідження. Ця тема

відкриває перспективи для розвитку методів, що поєднують інтелектуальні технології та можливості дистанційного зондування для археологічних досліджень [69].

Аерознімання з БПЛА

Аерознімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ще одним ефективним методом моніторингу земель історико-культурного призначення. БПЛА можуть бути різних типів і конфігурацій, включаючи мультикоптери, літаки, дирижаблі та інші. Вони обладнані спеціальними камерами та датчиками, що дозволяють здійснювати знімання з високою просторовою розрізненістю.

Переваги використання БПЛА полягають у тому, що вони є більш доступними і менш дорогими, порівняно з пілотованими ЛА. Вони також можуть здійснювати зйомку в обмеженому просторі та на низьких висотах, які недосяжні для пілотованих ЛА. Крім того, вони дозволяють проводити зйомку в режимі реального часу та отримувати дані навіть у важкодоступних місцях.

Однак, використання БПЛА також має свої недоліки. Наприклад, якщо знімання проводиться в поганих погодних умовах, це може призвести до зменшення якості отриманого зображення. Крім того, акумулятори, що живлять БПЛА, можуть вийти з ладу під час польоту, що також може призвести до втрати даних. Необхідно також мати високо кваліфікованих операторів БПЛА, щоб забезпечити безпечний та ефективний політ.

БПЛА (безпілотні літальні апарати), також відомі як дрони, можуть бути використані для документування культурної спадщини з високою точністю та деталізацією (рис.1.3).

Об'єкти культурної спадщини різні за характером, структурою, деталізацією і вимагають різних методів і підходів до опрацювання інформації [167, 276].



Рис.1.3. Приклади використання БПЛА для документування культурної спадщини

На прикладі дослідження у рамках проєкту JPI PROTHEGO на об'єкті Коірокоїтія продемонстровано ефективність використання БПЛА та геодезичних методів для моніторингу деформацій землі, що є критичним для збереження історичних пам'яток [175].

Крім того, збирання даних з використанням магнітно-резонансної томографії (GPR) та аерознімків з БПЛА дозволяє отримувати деталізовану інформацію для документування культурної спадщини. Цей підхід, відображений у контексті проєкту збирання даних з GPR та аерознімків, відкриває нові можливості для збереження та вивчення історичних об'єктів, які можуть бути пошкоджені або зникнути [78, 117].

Використання безпілотних літальних апаратів в екологічному моніторингу дозволяє збирати дані про великі площі та з великої висоти, що забезпечує швидке та ефективне нагромадження даних про стан довкілля [36, 269](рис.1.4).



Рис.1.4. Основні особливості використання БПЛА в екологічному моніторингу

Отже, використання БПЛА в екологічному моніторингу є ефективним та економічним способом збору даних про довкілля.

Безпілотні літальні апарати дозволяють збирати дані про архітектурні об'єкти, історичні пам'ятки та археологічні знахідки без ризику їх пошкодження. Нижче розглянемо деякі приклади використання БПЛА в цій галузі [169, 260](рис.1.5).



Рис.1.5. Приклади використання БПЛА в галузі культурної спадщини та археології

БПЛА можуть використовуватися для зйомок важкодоступних місць, таких як печери, гірські вершини або труднодоступні фрагменти міста. Вони можуть бути використані для швидкого та точного документування пошкоджень та руйнувань, що можуть виникнути через природні катастрофи, війну або негативні впливи людської діяльності.

Застосування БПЛА дозволяє використовувати фотограмметрію, щоб створювати детальні та точні картографічні матеріали. БПЛА забезпечують велику кількість зображень, які можуть бути опрацьовані фотограмметричними програмами для створення точних моделей будівель та міських ландшафтів [70, 207, 89, 192, 197, 261].

Через проведення кейс-стадів можна досліджувати ефективність різних методів та алгоритмів опрацювання зображень з використанням БПЛА для документування історичних будівель. Це дозволить ідентифікувати найоптимальніші та продуктивні підходи до розв'язання проблем густоти зображень і визначити їхню застосовуваність у практичних ситуаціях [82, 187, 144, 87, 202].

Важливість цього методу полягає в тому, що вона відкриває нові можливості для збереження культурної спадщини за допомогою сучасних технологій. Крім того, кейси, які досліджують впровадження цифрового збереження культурних об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів, є важливими, оскільки вони демонструють практичність та ефективність цього підходу в реальних умовах. Вони дозволяють зрозуміти переваги та обмеження цієї технології, а також виявити можливості для подальшого вдосконалення процесу документування та збереження культурної спадщини [195, 218, 273, 231].

1.3.4. Лазерне сканування

Лазерне сканування, також відоме як лідарне сканування, є ефективним методом моніторингу земель історико-культурного призначення. Цей метод полягає в тому, що лазерний промінь надходить на поверхню Землі, а потім повертається до приладу, що дозволяє виміряти відстань між ним та поверхнею. Лазерне сканування дозволяє отримувати детальні 3D-моделі об'єктів, які можуть бути використані для моніторингу земель історико-культурного призначення.

Однією з переваг лазерного сканування є те, що воно дозволяє отримати детальну інформацію про форму та розміри об'єктів. Це може бути особливо корисно для моніторингу земель історико-культурного призначення, оскільки це дозволяє отримувати детальну інформацію про будівлі, пам'ятки архітектури та інші історичні об'єкти. Крім того, лазерне сканування може бути використано

для визначення точного положення об'єктів на Землі та для реконструкції структур, що зруйновані або пошкоджені.

Однак, недоліком лазерного сканування є те, що цей метод вимагає спеціального обладнання, що може бути досить дорогим. Крім того, процес сканування може зайняти багато часу та ресурсів, що також може збільшити загальну вартість проєкту моніторингу. Також, важливо враховувати, що лазерне сканування не може використовуватися в поганих погодних умовах або в нічний час, коли недостатня освітленість може призвести до зниження якості отриманого зображення [65].

Наземне лазерне сканування

Наземне лазерне сканування (НЛС або TLS) - це один з методів моніторингу земель історико-культурного призначення, що базується на використанні лазерного сканування зі стаціонарної точки. У цьому методі лазерний промінь постійно направлений на об'єкт зі стаціонарної точки, що дозволяє отримувати точні та детальні 3D-моделі [16]. Наземне лазерне сканування може бути використано для моніторингу будь-якого типу земель, включаючи землі історико-культурного призначення.

Однією з переваг наземного лазерного сканування є його точність та можливість отримання детальної інформації про структуру об'єктів. Крім того, відмінною перевагою наземного лазерного сканування є можливість виконувати дослідження в умовах обмеженого простору та обмеженого доступу до об'єкту [229, 230].

Недоліком наземного лазерного сканування є те, що воно може зайняти значно більше часу, ніж сканування з повітря або з космосу. Крім того, цей метод вимагає фізичної присутності технічних спеціалістів на місці, що може призвести до додаткових витрат. Також, важливо враховувати, що якість отриманого зображення може залежати від того, наскільки добре зорієнтований лазерний промінь, тому необхідно виконувати точне налаштування приладу перед початком сканування [107, 97, 240].

Лідар є потужним інструментом для виявлення та характеристики біодетеріогенів на кам'яній культурній спадщині. Біодетеріогени - це мікроорганізми, які можуть спричинити руйнування кам'яних конструкцій та інших матеріалів, з яких виготовляються пам'ятки культурної спадщини. Також, лідар може використовуватися для оцінки рівня забруднення та зносу кам'яних поверхонь, що може бути спричинено не тільки біодетеріогенами, а й іншими чинниками, такими як атмосферні опади, вітер, та інші.

Для виявлення біодетеріогенів лідар може бути поєднаний з іншими методами, такими як мікроскопія, аналіз мікробіологічних зразків та інші. Це дозволяє детально проаналізувати види та рівень біодетеріогенів на пам'ятках культурної спадщини та розробити ефективні стратегії їхнього контролю і захисту [247, 288, 272, 176].

Флуоресцентне гіперспектральне лідарне зображення є новим технологічним рішенням для дослідження культурної спадщини. Воно поєднує в собі переваги гіперспектрального зображення з високою чутливістю флуоресценції, що дозволяє виявляти деякі складні процеси, які не можуть бути визначені за допомогою звичайних методів зображення.

Останні досягнення в цій області включають розробку нових алгоритмів опрацювання даних, що дозволяють досягти високої точності виявлення різних типів матеріалів, які використовуються в культурній спадщині. Ці алгоритми використовуються для автоматичного розпізнавання образів на основі їхньої спектральної сигнатури та флуоресцентної характеристики. Також, нові методи обробки даних, дозволяють відокремлювати сигнали флуоресценції від шумів та інших перешкод. Ці методи дозволяють збільшити точність визначення флуоресценції та знизити ймовірність помилкових даних.

Інтегрований мультимедійний підхід до збереження та документування культурної спадщини - це підхід, що використовує різноманітні технології та методи для збереження та документування культурної спадщини. Він поєднує в собі дистанційне зображення LIDAR, фотограмметрію, гіперспектральне

зображення та інші технології, що дозволяють збирати різноманітні дані про об'єкти культурної спадщини.

Перевагою цього підходу є те, що він дозволяє зібрати значну кількість даних з високою точністю та просторовою розрізненістю. Завдяки цьому можна проводити детальний аналіз та дослідження різних аспектів культурної спадщини, таких як її стан, історію, архітектуру та інші.

Наземне лазерне сканування є особливо корисним для документування складних форм, таких як вітражі, скульптури та архітектурні деталі, які важко виміряти за допомогою традиційних методів. Також, ця технологія дозволяє документувати стан пам'яток на різних етапах їхньої історії, що допомагає зберігати їх для наступних поколінь [233, 162].

Наземне лазерне сканування може бути ефективним інструментом для документування культурної спадщини. Однак, на жаль, в процесі використання цієї технології можуть виникати деякі проблеми (рис.1.6).



Рис.1.6. Проблеми, що виникають в процесі виконання наземного лазерного сканування

Використання ручного мобільного лазерного сканера (SLAM) для документування культурної спадщини може бути корисним інструментом для збору точних тривимірних даних про об'єкти культурної спадщини. Однак, точність залежить від кількох факторів, таких як якість обладнання, умови освітлення, швидкість руху, дистанція від об'єкта і джерела потенційних помилок.

Одним з головних факторів, що впливає на точність, є якість самого обладнання. Різні моделі пристроїв мають різні можливості та точність вимірювання. Також, у разі ручного мобільного пристрою LiDAR, точність може бути порушена через тремтіння рук або нестабільність пристрою при русі.

Умови освітлення також можуть вплинути на точність збору даних. Умови зниженої видимості, наприклад, в темряві або в хмарну погоду, можуть знизити якість отриманих даних.

Джерела потенційних помилок включають проблеми зі зчитуванням даних, наявність перешкод (таких як рослини або інші предмети, що перешкоджають лазерному скануванню), і спотворення даних внаслідок відбиття лазерного променя від поверхні об'єкта.

Авіаційне лідарне знімання

Авіаційне лідарне знімання може бути корисним інструментом для моніторингу земель історико-культурного призначення. Лідар (Light Detection and Ranging) - це технологія, яка використовує лазери для вимірювання відстаней до поверхні Землі. Лідарні знімки дозволяють отримувати дуже детальну інформацію про рельєф землі та її характеристики.

Одна з головних переваг лідарного знімання полягає в тому, що воно може проникати через рослинний покрив та виявляти різні зміни на поверхні землі, які можуть бути пов'язані з археологічними або історичними об'єктами. Наприклад, лідар може виявити різні форми терас, стін або каналів, які можуть вказувати на наявність давніх поселень або землеробських структур.

Завдяки високій деталізації, отримані зображення можуть бути використані для створення тривимірних моделей поверхні землі, які дозволяють вивчати її

характеристики з більшою точністю та деталізацією. Це може бути корисним для виявлення змін у рельєфі, що можуть свідчити про наявність давніх структур або історичних об'єктів [289, 258, 147].

Інтеграція лазерного сканування та фотограмметрії при 3D/4D збереженні культурної спадщини є важливою та цікавою областю дослідження. Ця технологія дозволяє створювати високоякісні три- та чотиривимірні моделі культурної спадщини з високою точністю та деталізацією.

Інтегруючи ці дві технології, можна отримати ще більш точні 3D моделі. Наприклад, можна використовувати лазерне сканування для отримання точок об'єкта, які потім можуть бути поєднані зі знімками для створення повної 3D моделі з високою точністю та деталізацією [90, 80, 264; 281, 129].

Крім того, інтеграція лазерного сканування та фотограмметрії також може допомогти створити 4D модель, яка відображає не тільки форму об'єкта, але й його стан за різний час.

Зазвичай, напівавтоматичне виявлення культурної спадщини з даних лідару включає в себе кілька етапів. Спочатку, необхідно підготувати дані, очистивши їх від шуму та інших непотрібних артефактів. Потім, можна використовувати алгоритми машинного навчання для автоматичного виявлення об'єктів культурної спадщини у хмарах точок. Однак, такі алгоритми можуть допускати помилки, тому важливо здійснити ручну перевірку та корекцію результатів [73, 283].

Дані, отримані з лазерного сканування, опрацьовуються та візуалізуються з використанням GIS, що дозволяє аналізувати дані та виявляти зміни в структурі і складі лісу та культурної спадщини з часом [171, 189].

Дослідження показують, що інтегрований підхід повітряного лазерного сканування до питань управління лісами та культурної спадщини є ефективним та корисним інструментом для збору і аналізу даних. Він дозволяє збирати точну та детальну інформацію про ліси і культурну спадщину, а також візуалізувати та аналізувати дані в ГІС.

Ландшафтна археологія використовує міждисциплінарний підхід, який поєднує археологічні, географічні, екологічні та історичні дослідження. Цей підхід дозволяє зрозуміти, як люди змінювали та використовували ландшафт в різний час та в різних культурах [71, 237, 228].

Ландшафтна археологія також допомагає зберегти культурну спадщину та допомагає управляти нею, шляхом вивчення її взаємодії з природним середовищем і визначення її потенційного значення для сучасного суспільства [81, 201, 208, 265].

Застосування ландшафтної археології можна знайти в різних сферах, включаючи міське планування, туризм та охорону навколишнього середовища.

Створення легких і мініатюрних лідарів для БПЛА є актуальною проблемою, оскільки такі пристрої можуть бути використані в різних сферах, включаючи зйомку з повітря, картографування, моніторинг довкілля та військові операції [189; 189, 241].

У майбутньому можна очікувати подальшого розвитку легких і мініатюрних лідарів для БПЛА, що дозволить використовувати їх в різних сферах, включаючи науку, медицину, аграрний сектор та інші. Однак, необхідно також вирішити проблему стійкості лідарів на борту БПЛА, оскільки вони можуть бути чутливими до вібрацій та інших впливів [277, 236, 213, 221].

Генерація ортомозаїк високої просторової розрізненості з історичних аерознімків є важливим етапом у реконструкції історичних об'єктів та збереженні культурної спадщини. Для цього можна використовувати дані аерознімання та лідара, що дозволяє створювати ортомозаїки високої якості з меншими витратами часу та ресурсів (рис.1.7).

Отримані ортомозаїки можуть бути використані для подальшого аналізу історичних об'єктів та збереження культурної спадщини. Вони можуть допомогти в ідентифікації раніше невидимих деталей та змін, які сталися з часом, а також можуть служити джерелом інформації для використання у віртуальних турів та інтерактивних музейних виставках [106, 234, 99, 249].



Рис.1.7. Генерація ортомозаїк з аерознімків за допомогою лідару

Автоматизоване картографування культурної спадщини за допомогою повітряного лідару та швидшого R-CNN може бути дуже корисним для збору та аналізу геоданих, що належать до культурної спадщини (рис.1.8).

Покинуті ландшафти можуть мати приховану культурну спадщину, яка може бути важливою для історії та культури регіону. Для ідентифікації та інтерпретації такої спадщини можна використовувати бортовий лідар, який може допомогти оператору зібрати якісні геодані про поверхню Землі [271, 200]. Нижче наведено декілька можливих застосувань цієї технології:

- Виявлення стародавніх стежок та доріг. Бортовий лідар може виявляти стежки та дороги, які можуть бути приховані під товстим шаром рослинності або землі. Це може допомогти зрозуміти, якими шляхами люди подорожували в минулому та як вони вплинули на розвиток регіону.
- Виявлення занедбаних місць поховання. Бортовий лідар може допомогти виявити занедбані місця поховання, такі як кладовища або поодинокі могили.

Це може бути важливою інформацією для дослідження історії та культури регіону.

- Виявлення залишків стародавніх споруд. За допомогою бортового лідара оператор може виявляти залишки стародавніх споруд, таких як фортеці, замки та храми. Це може допомогти зрозуміти, як жили та працювали люди в минулому та які впливи вони мали на розвиток регіону.
- Виявлення залишків культурних ландшафтів. Бортовий лідар може допомогти виявити залишки культурних ландшафтів, таких як терасовані поля, кам'яні мурали та дороги.



Рис.1.8. Застосування технології напівавтоматичного картографування культурної спадщини за допомогою технології повітряного лідара

1.3.5. Наземне георадарне знімання

Наземне георадарне знімання є ще одним ефективним інструментом для моніторингу земель історико-культурного призначення. Георадар (Ground

Penetrating Radar - GPR) - це технологія, яка використовує електромагнітні хвилі для виявлення об'єктів, що знаходяться під поверхнею землі.

Георадар може допомогти виявити різні об'єкти, які знаходяться під землею, такі як структури, залишки будівель, печери, підземні переходи та інші артефакти. Георадарний зонд, що видає електромагнітні хвилі, підключається до спеціального приладу, який приймає відбиті електромагнітні хвилі. Інформація про знаходження та глибину об'єктів на великій глибині може бути використана для створення двовимірних та тривимірних зображень об'єктів, які знаходяться під поверхнею землі.

Однією з переваг георадару є те, що він може бути використаний для виявлення об'єктів, які знаходяться на різних глибинах, що може допомогти відновити історію розвитку місцевості. Також, георадар може виявляти об'єкти під різними типами ґрунтів, таких як пісок, глина, каміння, що може бути корисно для виявлення елементів, які знаходяться під складними ґрунтовими умовами [94, 104, 108].

Георадарна томографія є одним з найбільш ефективних методів діагностики культурної спадщини. Цей метод заснований на вимірюванні електромагнітних властивостей ґрунту та матеріалів, які знаходяться під поверхнею землі, з використанням радіохвиль.

Інтерполяція є ключовим етапом в обробці даних георадарної томографії. Цей процес дозволяє отримати значення радіовідбиваючих властивостей ґрунту на тих частинах території, де не були проведені прямі вимірювання (рис.1.9).

Одним із ключових параметрів, що визначає можливості GPR, є роздільна здатність. Роздільна здатність - це мінімальна відстань між двома об'єктами, яку можна розрізнити на зображенні GPR. Це залежить від частоти використовуваної радіохвилі, глибини сканування та рівня шуму [128, 148, 180].

Техніка георадара є корисним інструментом для виявлення пошкоджень від вологи об'єктів археології та культурної спадщини. Виявлення пошкоджень від вологи є важливим для збереження культурної спадщини, так як вони можуть призвести до руйнування або пошкодження історичних структур і предметів.

Однак, роздільна здатність георадара залежить від його параметрів, таких як частота, тип антени, інтерпретаційні алгоритми тощо [212, 216].

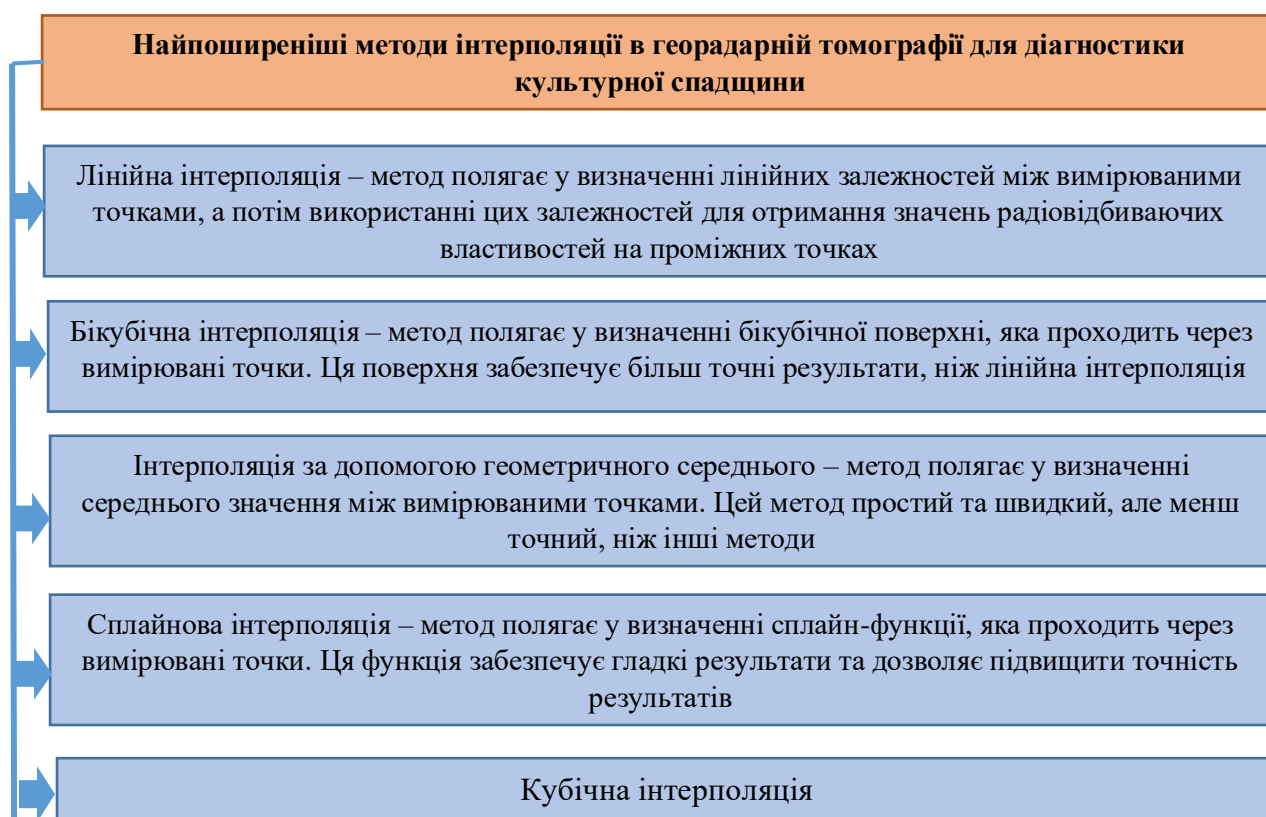


Рис.1.9. Найпоширеніші методи інтерполяції в георадарній томографії для діагностики культурної спадщини

Неінвазивні археологічні дослідження за допомогою георадара застосовуються для визначення меж місць масових поховань часів Другої світової війни. Георадар здатен зібрати інформацію про глибину та розташування підземних об'єктів, таких як поховання, без необхідності руйнування земної поверхні. Георадар використовують для виявлення структурних змін в ґрунті, що можуть свідчити про масове поховання. Дані збираються за допомогою високочастотного георадара з частотою не менше 250 МГц, який забезпечує високу роздільну здатність на глибині до 1 метра.

Поєднання георадарної та сейсмозв'язки може бути корисним під час дослідження будівель культурної спадщини, особливо коли мова йде про

готичну архітектуру, яка має складні конструкції зі стовпами, дугами та склепіннями [226, 103].

У 2018 році група дослідників з Університету Барселони застосувала поєднання георадарної та сейсмозв'язки для оцінки стану будівлі готичної церкви Санта-Марія-дель-Мар у Барселоні, Іспанія. Дослідження зосередилося на оцінці стану дахів, колон та землі цієї історичної споруди.

Георадарна томографія була використана для оцінки глибини фундаментів та виявлення можливих вирв у землі під будівлею. Сейсмозв'язка була застосована для вимірювання швидкості звуку у матеріалах будівлі, включаючи камінь, бетон та мурування. Результати цих досліджень дозволили дослідникам зробити висновки про стан будівлі та її потенційні проблеми.

Зазвичай роздільна здатність георадару в програмах культурної спадщини становить від 5 до 20 сантиметрів. Проте, при використанні спеціалізованих антен з вузьким кутом зору та високої частоти можна досягти роздільної здатності до 1 сантиметра. На практиці ж, роздільна здатність георадару в програмах культурної спадщини залежить від багатьох чинників, таких як тип ґрунту, глибина об'єкта та його розмір, наявність забруднень у ґрунті тощо [98, 92, 113, 217].

Інші методи, такі як магнітна сейсміка і електромагнітна індукція, також можуть бути корисними для археологічних досліджень, дозволяючи виявляти об'єкти зі зміненими магнітними та електричними властивостями [274, 222, 243].

Існує багато геофізичних методів, які можуть бути використані для неруйнівної оцінки культурної спадщини (рис.1.10).

Ці методи можуть бути використані окремо або комбіновані для більш точної оцінки стану культурної спадщини та виявлення похованих об'єктів [223, 154, 183, 224].

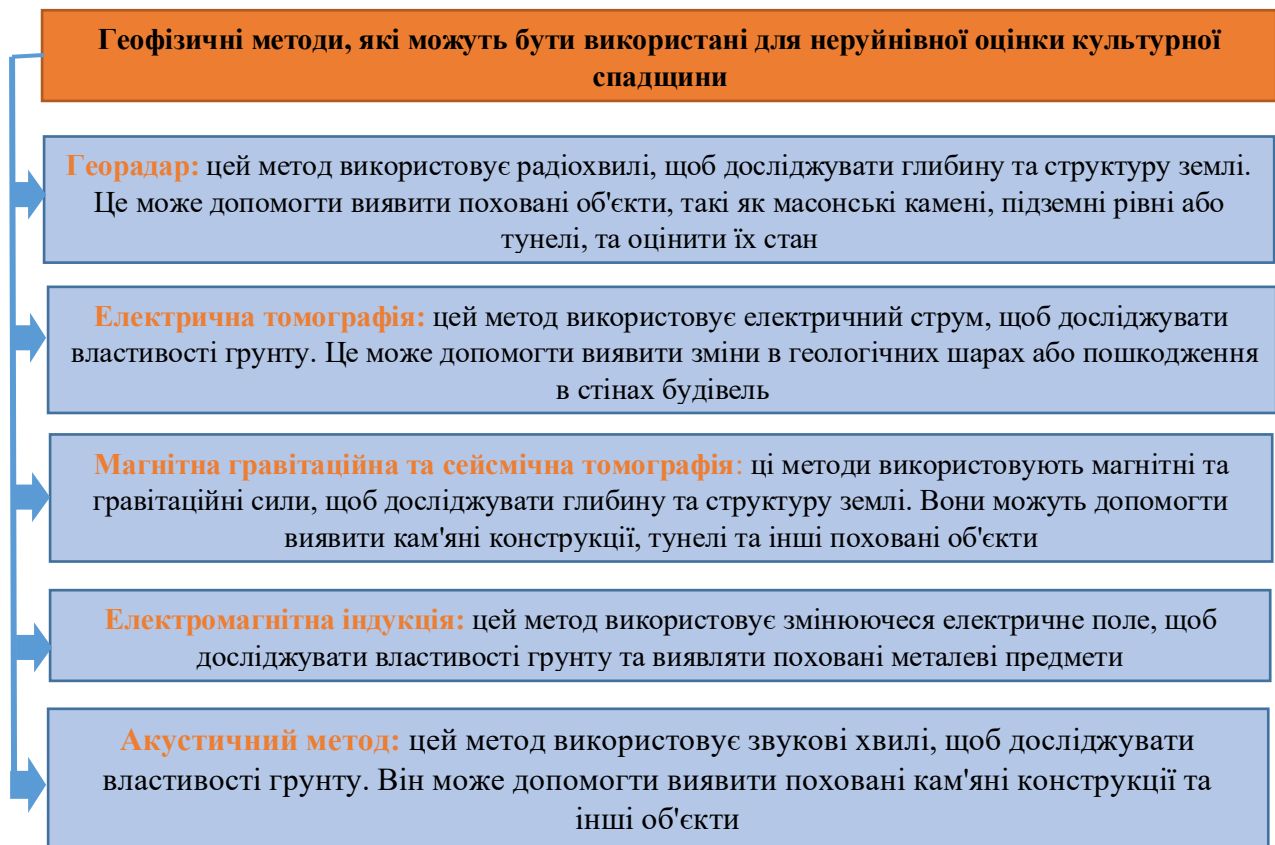


Рис.1.10. Геофізичні методи, які можуть бути використані для неруйнівної оцінки культурної спадщини

Інтеграція геофізичних і фотографічних даних може бути використана для візуалізації складних елементів ОІКС. Цей метод дозволяє поєднувати інформацію з різних джерел та зображень, що дозволяє отримувати більш повну та точну картину структури та історії археологічних об'єктів.

Фотографічні дані можуть бути зібрані за допомогою дронів, що забезпечує високу деталізацію та дозволяє отримати 3D-моделі об'єктів. Геофізичні методи, такі як GPR, магнітометрія та електрорезистивність, можуть бути використані для виявлення складу та структури гірських порід, які використовувалися для видобування каменю [93, 196, 144, 125].

Інтеграція геофізичних та фотографічних даних є важливим інструментом для археологічних досліджень, оскільки вона дозволяє дослідникам отримати більш повну та точну картину про об'єкти, що досліджуються.

1.4. Визначення невирішених задач досліджень

Дистанційні та неінвазивні методи досліджень земель історико-культурного призначення стають все більш популярними і включають в себе різноманітні техніки, які не пошкоджують артефакти чи історичні місця.

Проте, незважаючи на значний прогрес у цій галузі, є деякі невирішені задачі, зокрема:

1. Недостатня точність та надійність методів: в деяких випадках неінвазивні методи досліджень можуть бути недостатньо точними та надійними. Наприклад, георадар може дати неточні результати через наявність різноманітних перешкод або особливостей ґрунту.
2. Обмеження доступу до місць досліджень: незважаючи на те, що більшість дистанційних та неінвазивних методів можуть бути виконані з відстані, іноді складно здійснити дослідження через обмеження доступу до місць досліджень, особливо у випадку, коли місця знаходяться у приватній власності.
3. Обмежена глибина дослідження: більшість неінвазивних методів не здатні досліджувати глибину більш як декілька метрів, що ускладнює дослідження глибоко розташованих історичних об'єктів.
4. Висока вартість: деякі методи досліджень можуть бути витратними і складними для виконання, що може обмежити їх використання.
5. Інтерпретація результатів: незважаючи на те, що деякі методи досліджень можуть дати достатньо точні результати, їх інтерпретація може бути складною та вимагати експертної оцінки тощо.
6. Автоматизація опрацювання даних: розробка ефективних алгоритмів та програм для автоматизованого опрацювання великих обсягів даних, зокрема для виявлення та аналізу слідів археологічних об'єктів.
7. Удосконалення технік ідентифікації матеріалів: розвиток методів ідентифікації матеріалів на основі спектроскопії та георадарного знімання для точнішого розрізнення археологічних деталей та інших матеріалів.

8. Створення інтегрованих платформ: розробка інтегрованих платформ, що об'єднують дані з різних джерел (дистанційне зондування, георадар тощо) для отримання повноцінної та всебічної інформації.
9. Методології для археологічних розкопок: розробка методологій, які дозволяють використовувати дистанційні методи зондування та георадарне знімання як допоміжні засоби для планування та моніторингу археологічних розкопок.

З проаналізованих літературних джерел, простежується тенденція частішого застосування міждисциплінарних методів дослідження земель історико-культурного призначення, як більш ефективних у дослідженні у порівнянні з певними окремими методами.

Часто, в роботах науковців зустрічається поєднання 2-3 методів дослідження об'єктів історико-культурної спадщини, наприклад методів ДЗЗ в поєднанні з наземними методами, як інвазивного, так і неінвазивного характеру. Але поєднання цих методів у більшості випадків носить хаотичний емпіричний характер, при цьому науковці не подають можливі теоретичні основи їх поєднання чи доповнення один іншим. У тих же випадках, коли автори пропонують логічне поєднання методів, їх кількість складає 2-3.

Досі не існує чітко визначеної концептуальної моделі поєднання міждисциплінарних методів (картометричного, геофізичного, фотограмметричного, геодезичного і т.д.) дистанційних неінвазивних досліджень для комплексного вивчення площинних нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини та земель історико-культурного призначення.

Розв'язання цих завдань дозволить значно покращити ефективність та точність застосування дистанційних методів зондування та георадарного знімання в археологічних дослідженнях і моніторингу земель історико-культурного призначення.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМЛІ ТА ПІДЗЕМНИХ АНОМАЛІЙ

Теоретичні положення визначення вертикальних зміщень землі та підземних аномалій включають різноманітні методи, які використовують різні геофізичні явища. Головні методи містять радіолокаційні, гравітаційні, геодезичні, сейсмічні та георадарні техніки.

В кожному з цих методів теоретична база полягає у зв'язку між змінами властивостей підземних середовищ та виявленням відповідних змін у вимірюваних сигналах чи полях.

В цьому розділі розглянемо дистанційні та неінвазивні методи досліджень, такі як радіолокаційний і георадарний.

2.1. Фізична основа формування даних методами радіолокаційного і георадарного знімання

Методи радіолокаційного та георадарного знімання базуються на взаємодії електромагнітних хвиль з об'єктами в середовищі. Радіолокаційні системи використовують радіохвилі, а георадарні системи - високочастотні електромагнітні імпульси. При проходженні електромагнітної хвилі через середовище відбуваються різні процеси, які формують сигнали, що отримуються на приймачі [66, 83, 91].

Перелічимо основні відмінні риси георадарного знімання порівняно з радіолокацією:

1) *Частотно-залежне згасання в середовищі.* Середовище діє на сигнал як фільтр нижніх частот. Тому для забезпечення необхідної дальності зондування потрібно знижувати середню частоту діапазону сигналу. Це веде до зниження просторової розрізненості.

2) *Неможливість використання високих частот* - причина відмови від радіоімпульсів і перехід до надширокосмугових відеоімпульсів. При

використанні радіоімпульсів з великим числом періодів в імпульсі та низькою частотою сигнали мають неприйнятно довшу тривалість, а радар - низьку просторову розрізненість. У відеоімпульсах число напівперіодів скорочується до 2-3, що збільшує просторову розрізненість і робить її прийнятною для практичних цілей.

3) *Використання низьких частот означає зовсім інший підхід до конструювання антен для георадару та методики зондування.* У георадарі, що працює в середовищі з втратами, неможливо сильно підвищити спрямованість випромінювання за рахунок переходу на високі частоти та використання спрямованих антен або фазованих антенних ґрат. Тому антени в більшості випадків малоспрямовані, а кутова просторова розрізненість радара підвищується шляхом застосування синтезованої апертури.

4) *Якщо середовище має значні втрати, метод синтезованої апертури виявляється малоефективним.* При великому згасанні серед усіх можливих положень антени сигнал буде найбільшим лише в невеликій кількості точок, найближчих до об'єкта зондування. В інших сусідніх положеннях антенної системи він буде набагато меншим і може маскуватися відбиттям від інших об'єктів або відбиттями, що заважають, від об'єктів у повітрі.

5) *Складність середовища поширення і більша кількість типів хвиль, що поширюються.* Грунт зазвичай складається з шарів, що чергуються. Діелектрична проникність шарів ґрунту, як правило, наперед невідома. Можливі кратні відбиття між межами шарів, між шаром та поверхнею ґрунту. У шарах з низькими втратами, розташованими між шарами з високою провідністю або вологістю, можливі хвилеводні типи поширення. Крім просторових хвиль відбувається поширення бічних хвиль. В таблиці 2.1 подані електричні властивості геологічних середовищ, в тому числі і діелектрична проникність матеріалів.

Електричні властивості геологічних середовищ

Матеріал	Діелектрична проникність	Провідність (мСм/м)	Швидкість (м/нс)	Затухання (дБ/м)
Повітря	1	0	0,3	0
Дистильована вода	80	0,01	0,033	0,002
Прісна вода	80	0,5	0,033	0,1
Морська вода	80	30 000	0,01	1000
Сухий пісок	3-5	0,01	0,15	0,01
Насичений пісок	20-30	0,1-1,0	0,06	0,03-0,3
Вапняк	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Сланці	5-15	1-100	0,09	1-100
Мул	5-30	1-100	0,07	1-100
Глина	4-40	2-1000	0,06	1-300
Граніт	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Сіль (суха)	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Лід	3-4	0,01	0,16	0,01

б) Підвищення робочої частоти радара навіть у середовищах з низькими втратами іноді неможливе через нерівності поверхні та неоднорідності діелектричної проникності середовища.

7) *Проблеми інтерпретації одержуваних зображень.* Через невисоку просторову розрізненість зображення об'єктів в більшості випадків виявляється розмитим. Близькі один до одного шари або межі розділу можуть не відрізнятися, а сигнали більш контрастних об'єктів можуть маскувати наступні за часом слабкі відображення від менш контрастних об'єктів. З іншого боку, часом потрібно не тільки виявити, а й точно ідентифікувати об'єкт. Це висуває підвищені вимоги до обробки сигналів.

Основними фізичними явищами, що лежать в основі радіолокаційних та георадарних систем, є відбивання, розсіювання, заломлення та поглинання електромагнітної хвилі об'єктами в середовищі.

Радіолокаційне знімання - це процес отримання інформації про об'єкти та середовище на основі аналізу радіосигналів, які відбиваються від цих об'єктів. Фізична основа цього процесу полягає в дії радіохвиль на об'єкти та їх поверхні.

Фізична основа формування даних методами космічного радіолокаційного знімання базується на використанні радіохвиль для отримання інформації про об'єкти на земній поверхні. У цьому методі використовується радіосигнал, який надсилається супутником на Землю, а потім приймається та опрацьовується для отримання деталізованої інформації [109, 123].

Ключовим елементом є радіолокатор, який генерує радіохвилі та приймає їхні зворотні сигнали від об'єктів на поверхні Землі. Це вимагає врахування основних фізичних законів, що керують розповсюдженням радіохвиль та їхньою взаємодією з об'єктами. Нижче наведено загальний опис фізичної основи цього процесу з рисунками та формулами.

На рисунку 2.1 подано блок-схему типової системи радіолокатора.

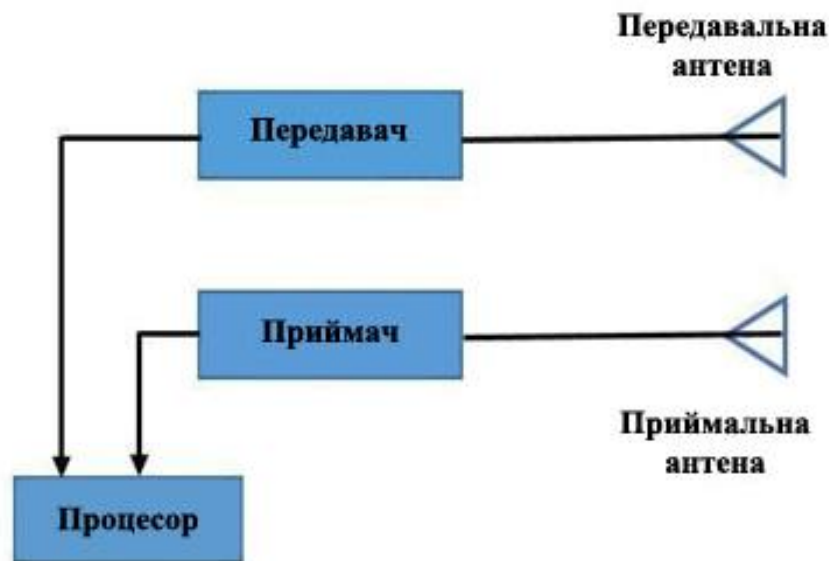


Рис.2.1. Блок-схема типової системи радіолокатора

Формула Доплера дозволяє визначити зміни частоти сигналу від відбиття, пов'язані з рухом об'єкта. Вона виглядає наступним чином (2.1):

$$f' = f \cdot \frac{c + v_{\text{об'єкта}}}{c + v_{\text{спостерігача}}}, \quad (2.1)$$

де f - змінена частота, f' - початкова частота, c - швидкість світла, $v_{\text{об'єкта}}$ - швидкість об'єкта, $v_{\text{спостерігача}}$ - швидкість спостерігача.

З використанням отриманих даних про частоту та час, можна визначити відстань d до об'єкта за допомогою формули (2.2):

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2}, \quad (2.2)$$

де c - швидкість світла, Δt - час затримки сигналу.

Ці елементи складають фізичну основу формування даних методами космічного радіолокаційного знімання, яка дозволяє отримувати деталізовану інформацію про об'єкти на земній поверхні для подальшого аналізу та використання. В таблиці 2.2 описані основні характеристики космічних радіолокаційних систем.

Таблиця 2.2

Основні характеристики космічних радіолокаційних систем

Назва космічного апарата	Просторове розрізнення, м	Ширина смуги знімання, км	Спектральний діапазон	Поляризація (параметри змінюються залежно від режиму знімання)
RadarSat-1	8-100	50-500	C	HH
RadarSat-2	1,6-160	1,6-160	L	Одна, дві або чотири
TerraSar-X	<1-40	4-270	X	Одна або дві
TanDem-X				
Alos-2	1-100	25-350	L	Одна, дві або чотири
Sentinel 1A, B	5-40	20-400	C	Одна або дві
Kompsat-5	1-20	5-100	C	Одна на вибір
COSMO-SkyMed-1-4	1-100	10-200	X	Одна або дві
ASNARO-2	<1-16	10-50	X	Одна на вибір

Георадарне знімання - це метод отримання інформації про підземні структури та об'єкти на основі аналізу відбитих від них радіосигналів. Фізична основа цього методу полягає в дії електромагнітних хвиль на ґрунт та підземні об'єкти.

У георадарі використовуються високочастотні електромагнітні хвилі, які випромінюються від антени та поширюються в ґрунті. Ці хвилі взаємодіють з різними матеріалами в ґрунті та на поверхні підземних структур, таких як стіни, кабелі, труби тощо. При цьому частина енергії цих хвиль відбивається від об'єкта та повертається до антени у вигляді ехо-сигналу [161, 75, 145].

Аналізуючи ехо-сигнали, можна отримати інформацію про розмір, форму та матеріал підземних об'єктів, а також про їх взаємне розташування та властивості ґрунту. Чим вища частота хвиль, тим більша деталізація отримуваної інформації, але при цьому зменшується глибина проникнення в ґрунт.

Таким чином, фізична основа формування даних методами георадарного знімання полягає у взаємодії високочастотних електромагнітних хвиль з підземними структурами та ґрунтом, що дозволяє отримати інформацію про їх властивості та розташування.

Типова георадарна система має три основні компоненти: передавач і приймач, які безпосередньо підключені до антени, і блок керування (хронометраж або таймінг) (рис.2.2). Передавальна антена випромінює короткий високочастотний ЕМ-імпульс у землю, де він заломлюється та відбивається головним чином, коли зустрічається зі змінами діелектричної проникності та електропровідності.

Поширення сигналу залежить головним чином від електричних властивостей підповерхневих матеріалів. Хвилі, які розсіюються, викликають сигнал у приймальній антені та записуються як оцифровані сигнали для відображення та подальшого аналізу.

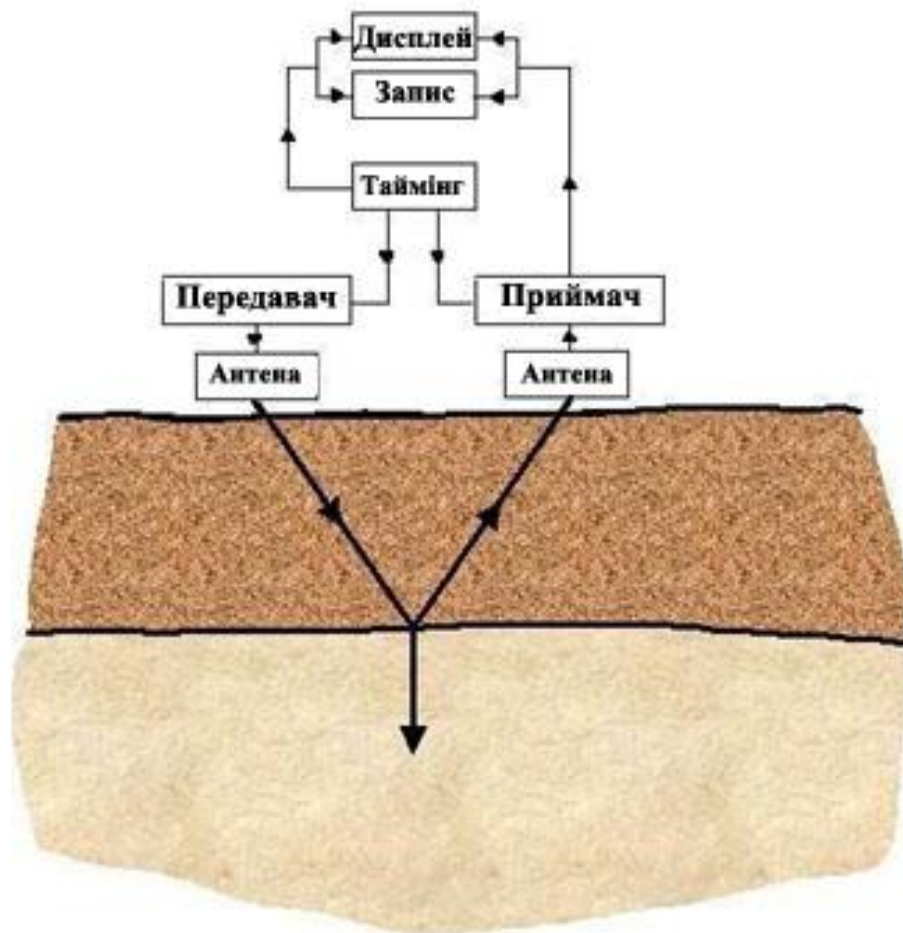


Рис.2.2. Блок-схема типової системи георадара

Найпоширенішим режимом роботи георадара є режим відображення, за допомогою якого сліди відбитих хвиль збираються безперервно або станціями вздовж лінії, створюючи таким чином часовий переріз або профільне зображення надр. СМР (загальна середня точка) або WARR (ширококутне відбиття заломлення) зондування та транслюмінація є іншими режимами роботи.

Використовується декілька типів радарів, таких як частотно-модульований синусоїдальний радар або голографічний радар, але для наземних досліджень найчастіше використовується імпульсний радар [130, 95].

Формула для розповсюдження електромагнітних хвиль в середовищі може бути визначена з рівняння (2.3):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (2.3)$$

де v - швидкість поширення хвиль, ε - діелектрична проникливість середовища, μ - магнітна проникливість середовища.

За допомогою формул для амплітуд та часових затримок отриманих сигналів можна аналізувати властивості шарів ґрунту або інших об'єктів. Амплітуда залежить від властивостей середовища та глибини (2.4).

$$A = \frac{G \cdot P \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R^4}, \quad (2.4)$$

де A - амплітуда сигналу, G - характеристика антени, P - потужність випромінювання, λ - довжина хвилі, σ - ефективна площа об'єкта, R - відстань між антеною та об'єктом.

Ці елементи становлять фізичну основу формування даних методами наземного георадарного знімання, що дозволяє отримувати інформацію про структуру та властивості ґрунту або інших об'єктів для подальшого аналізу та використання.

2.2. Методи інтерферометричного визначення вертикальних зміщень за даними радіолокаційного знімання та їх аналіз

Визначення вертикальних зміщень за даними радіолокаційного знімання зазвичай виконується шляхом порівняння прольотів над тією ж самою територією, проведених в різні періоди часу. Цей підхід називається методом диференційованого радіолокаційного знімання.

Основна ідея полягає в тому, що вертикальне зміщення може бути виявлено за допомогою порівняння радіолокаційних знімків, отриманих в різний час. Це досягається шляхом визначення різниці між відстанями, на які відбивається радіосигнал від об'єктів на знімках, отриманих в різні періоди часу. Різниця відстаней свідчить про вертикальне зміщення об'єктів між прольотами.

Аналіз даних радіолокаційного знімання може бути здійснений за допомогою спеціальних програмних засобів. Зазвичай вони включають в себе алгоритми обробки даних та візуалізації результатів. Знімки можуть бути порівняні попарно

або можуть бути порівняні з даними висотного профілю або цифрової моделі рельєфу, щоб отримати точнішу інформацію про вертикальні зміщення.

Методи інтерферометричного визначення вертикальних зміщень за даними радіолокаційного знімання знаходять застосування в моніторингу земель історико-культурного призначення для точного вивчення і збереження цінних об'єктів. Ці методи дозволяють отримувати високоякісні просторові дані та виявляти зміни в рельєфі та структурі земельного покриву, що важливо для ефективного управління та збереження культурної спадщини.

Для аналізу даних радіолокаційного знімання також використовуються методи геоінформаційного аналізу, які дозволяють об'єднати дані з різних джерел та візуалізувати результати у вигляді карти [124, 138, 160].

Розглянемо детальніше кожен з радіолокаційних методів визначення вертикальних зміщень земної поверхні.

Інтерферометрія SAR (InSAR)

Інтерферометрія SAR (InSAR) - це метод, який використовує дані від радіолокатора з синтезованою апертурою (SAR) для вимірювання вертикальних зміщень поверхні Землі. У цьому методі використовується інтерференція між двома радіолокаційними знімками, отриманими в різний час, для визначення змін у висоті об'єктів на земній поверхні.

Суть InSAR полягає у вимірюванні фазових змін між сигналами, одержаними від одного і того ж об'єкта на землі на різних часових інтервалах. Ці фазові зміни пов'язані зі змінами відстані між супутником та точкою на поверхні Землі, що може виникати через вертикальні зміщення.

На рис.2.3 подана схема побудови InSAR.

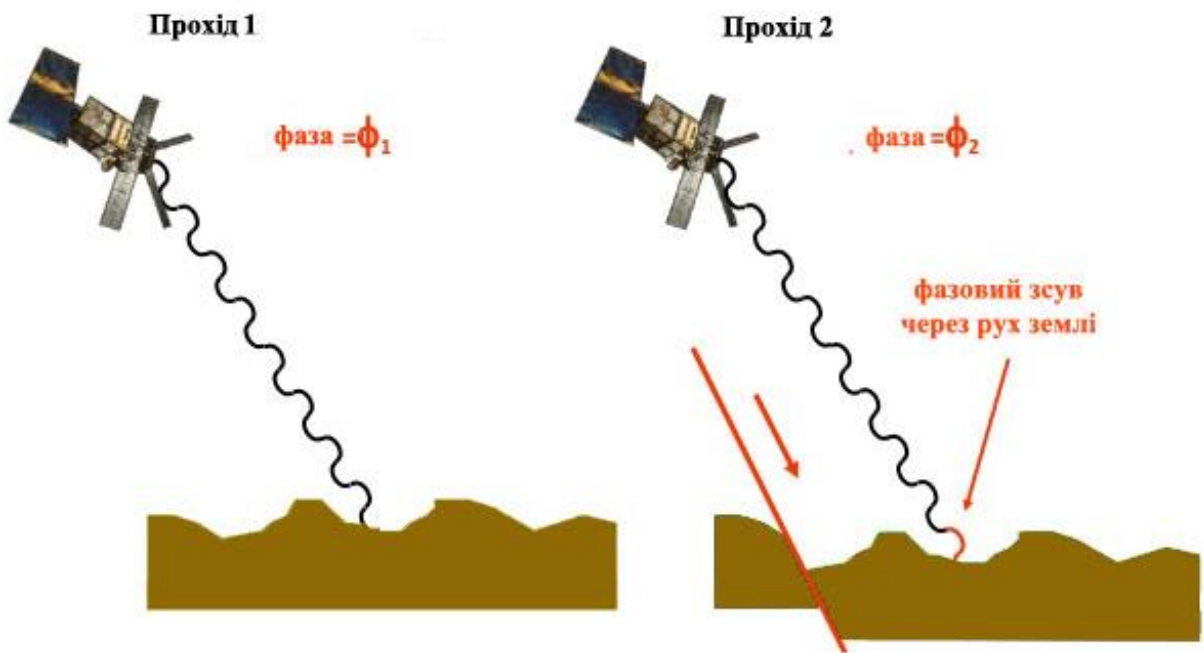


Рис.2.3. Схема побудови InSAR

Диференційний InSAR (DInSAR)

DInSAR не є інструментом для точного виміру переміщень, але він корисний для визначення площі прогресуючого руху.

Диференціальна інтерферометрія або DInSAR – це теж саме, що й інтерферометрія. Єдина відмінність полягає в тому, що топографічні ефекти компенсуються за допомогою цифрової моделі рельєфу (ЦМР) об'єкту, що спостерігається, створюючи так звану диференціальну інтерферограму.

Задача DInSAR полягає у вимірюванні змін фази інтерферограм, що виникають через деформації на поверхні Землі. Основні формули включають визначення фази інтерферограми та її відносних змін у часі.

Фаза інтерферограми обчислюється як різниця фаз між двома спостереженнями (2.6). Ця фаза пов'язана з розташуванням об'єктів на земній поверхні і залежить від довжини хвилі радіосигналу.

$$IFG = Phase1 - Phase2, \quad (2.6)$$

де $Phase1$ та $Phase2$ - фази сигналів для двох спостережень.

Диференційна обробка використовується для визначення прохідних змін фази відносно часу. Це вимагає визначення похідної фази з часом $\left(\frac{dPhase}{dt}\right)$, що дає інформацію про локальні деформації (2.7).

$$\frac{dIFG}{dt} = \frac{d \cdot (Phase1 - Phase2)}{dt} . \quad (2.7)$$

Ця похідна може бути використана для аналізу змін у геодинамічних явищах.

Деформації на поверхні можуть бути визначені змінами фази, враховуючи відомий вектор базового лайну (базовий вектор між двома спостереженнями) (2.8).

$$D = \frac{dIFG}{dt} \cdot B, \quad (2.8)$$

де B (*Baseline*) - вектор базового лайну.

Ці формули дають загальне уявлення про обчислення фаз та їх відносних змін у часі для вивчення деформацій методом DInSAR. У конкретних дослідженнях можуть використовуватися більш детальні та складні формули, залежно від конкретних умов та вимог [164, 184].

Перевагами цього методу є вимірювання деформацій та зсувів між двома часовими точками, а недоліком – вплив атмосферних умов на точність вимірювань.

Для аналізу не пар, а багатопрхідних ланцюжків інтерферометричних радіолокаційних знімків у багатьох програмних пакетах реалізовано модифікації радіолокаційної інтерферометрії: технології інтеферометрії постійних розсіювачів (*Persistent Scatterers*) та інтерферометрії малих базових ліній (*SBas*).

Метод інтерферометрії постійних розсіювачів радіолокаційного сигналу (PS).

Цей варіант радіолокаційної інтерферометрії характеризується максимально можливою точністю оцінки зміщення (2-4 мм за висотою). Вхідними даними для опрацювання повинні бути не менше 30 знімків однієї і тієї ж території за різні дати, отримані в однаковій геометрії зйомки супутникового радіолокатора.

Програмою автоматично вибирається основне зображення, на яке автоматично з точністю до 1/100 пікселя корегуються інші знімки

інтерферометричного ланцюжка. Далі програма будує інтерферограми (комплексно поелементно перемножені фазові шари радіолокаційних знімків) з кожної пари знімків. Потім оцінюються величини когерентності кожної пари (заходи кореляції фаз радіолокаційних знімків). Також, для кожної пари будуються карти величин стандартних відхилень амплітуд знімків. На рис.2.4. подано алгоритм роботи методу PS.

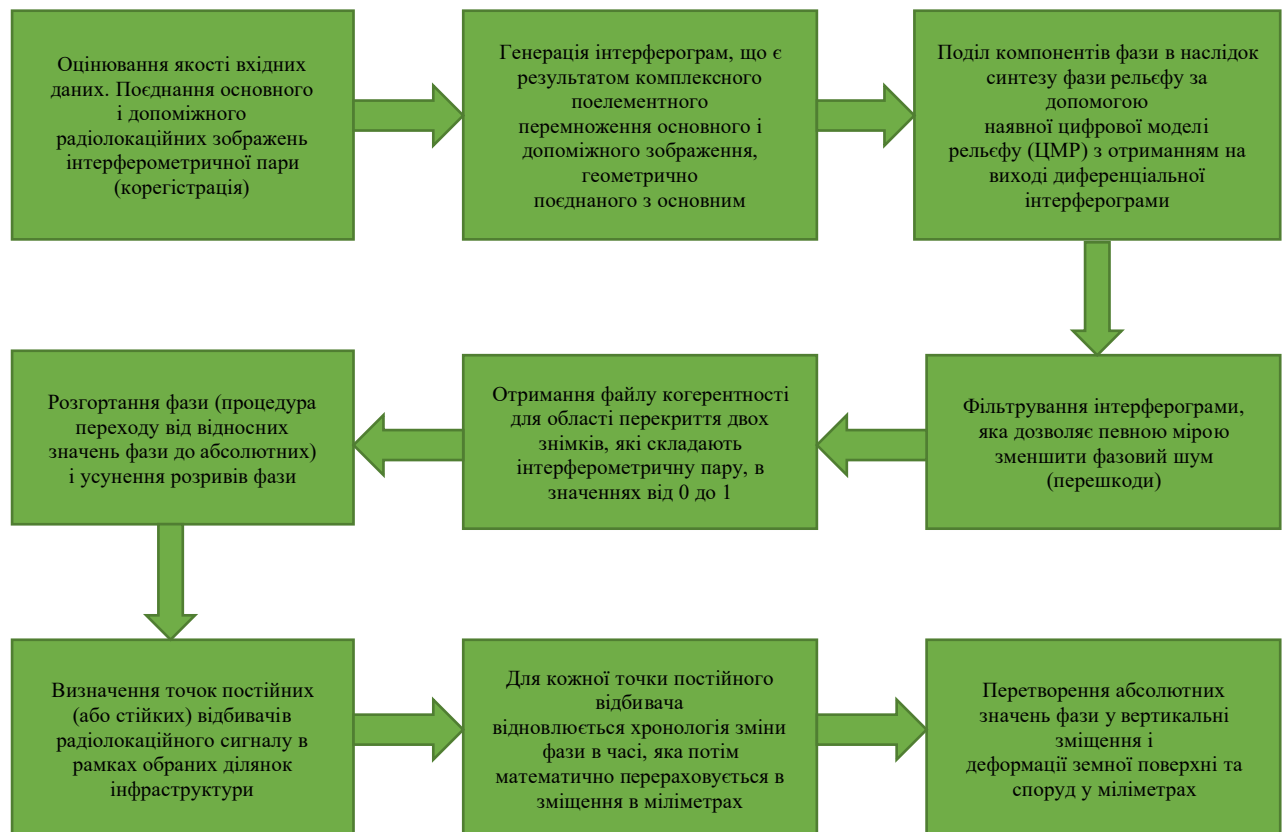


Рис. 2.4. Технологічна схема реалізації методу PS

Після цього визначаються точки – постійні (або стійкі) розсіювачі радіолокаційного сигналу. Для вибору точок використовується декілька порогів (поріг кореляції амплітуд, поріг когерентності, поріг просторового та тимчасового відхилень величин зміщень першої ітерації тощо). Після того як постійні розсіювачі визначені, для них виконується процедура оцінки фазових різниць розгортки фази для точкових цілей. Саме у різниці фаз кожного знімка міститься величина зміщень у період між зйомками [122, 165, 280].

Таким чином, для кожної з обраних точок відновлюється хронологія зміни фази в часі, яка потім математично перераховується у зміщення в міліметрах.

Додатково в процесі опрацювання застосовується спеціальний фільтр, що видаляє можливий вплив атмосфери на фазу інтерферометрії.

Результатом опрацювання є векторний файл точок, в атрибути яких записані:

- усунення на кожну дату зйомки;
- середньорічна швидкість зміщень;
- сумарна величина зміщень;
- когерентність;
- висота над еліпсоїдом WGS-84.

Основним недоліком даної технології є її застосування тільки для забудованих територій, а також для окремих будівель і споруд при зйомці у високій просторовій розрізненості.

Оскільки PS визначаються фазовою стабільністю, вибирають кандидати PS на основі їхніх фазових характеристик. Існуючі методи для вибору кандидатів PS покладаються на порогову зміну амплітуди пікселя з часом, що визначається як відношення стандартного відхилення амплітуди до її середнього. Для високого (>10) відношення сигнал/шум (SNR) амплітудна дисперсія є точним показником стандартного відхилення фази, отже, метод має високий рівень успіху при виборі яскравих PS, наприклад, певних штучних структур. Однак для розсіювачів із низьким SNR проста залежність між дисперсією амплітуди та фазовою стабільністю порушується, і метод більше не є ефективним.

Оскільки для алгоритму потрібні фази PS для обчислення середнього значення точки, він може ідентифікувати PS за умови, що розташування інших PS уже відомо. З причин обчислення виконується початковий вибір кандидатів PS на основі дисперсії амплітуди з високим пороговим значенням (0,4). На відміну від початкового відбору алгоритму, переважна більшість вибраних насправді не є PS. Для кожного кандидата PS віднімається середнє значення інших локальних кандидатів.

Оскільки ризик хибних спрацьовувань зростає зі збільшенням дисперсії амплітуди, уточнюється кількість вибраних PS шляхом розрахунку функції

дисперсії амплітуди. Для кожного кандидата PS використовується значення, що відповідає дисперсії амплітуди кандидата як порогове значення.

Концепція фільтрації, яка спочатку була введена в PSInSAR, заснована на тому факті, що атмосферні явища сильно корелюються у просторовій ділянці, але демонструють низьку тимчасову кореляцію. Після фільтрації атмосферних впливів кінцеві результати можуть бути перетворені на сигнал деформації поверхні шляхом множення коефіцієнта [163, 242].

Перевагами цього методу є відстеження постійних точок та вимірювання маленьких зсувів, а недоліком – висока вимогливість до різноманітних обмежень [110, 139].

Виправлення помилок ЦМР

Виправлення помилок в методі Persistent Scatterer Interferometry (PS-InSAR) включає кілька етапів, щоб покращити точність та достовірність отриманих результатів. Деякі з основних етапів виправлення помилок включають:

1. Фільтрацію даних:
 - видалення артефактів і випадкових помилок у даних PS-InSAR за допомогою фільтрів та статистичних методів. Це може включати в себе видалення "outliers" або неправильно визначених точок.
2. Додаткову опрацювання даних ЦМР:
 - врахування помилок в цифровій моделі рельєфу (ЦМР) та виправлення їх впливу на результати. Можливі методи включають корекції ЦМР або використання високороздільних ЦМР.
3. Корекцію атмосферних впливів:
 - врахування атмосферних впливів, які можуть впливати на розсіювання радіолокаційного сигналу. Корекції можуть бути виконані за допомогою атмосферних моделей або виправлень, отриманих з відомих атмосферних параметрів.
4. Виправлення геометричних витоків:

- врахування геометричних витоків або помилок у геометричних параметрах спостережень. Це може включати виправлення азимутальних та зенітних кутів, а також інших параметрів.
5. Компенсацію ефектів поверхні:
- врахування ефектів, які можуть впливати на розсіювання радіолокаційного сигналу від поверхні Землі, таких як кут огляду та властивості поверхні.
6. Моніторинг та корекцію руху супутників:
- моніторинг руху супутників та корекцію відповідних параметрів для забезпечення точності геометричних вимірювань.

Формула для корекції ЦМР у методі PS-InSAR має вигляд (2.9):

$$h_{cor} = h_{orig} + \Delta h, \quad (2.9)$$

де h_{cor} - виправлена висота ЦМР, h_{orig} - початкова висота ЦМР, Δh - корекція висоти, яка може бути отримана за допомогою високороздільної ЦМР.

Наприклад, якщо високороздільна ЦМР ($h_{high-res}$) є допоміжною, то корекція може бути визначена як різниця між значеннями висот (2.10):

$$\Delta h = h_{high-res} - h_{orig}. \quad (2.10)$$

Ця корекція може бути застосована до кожної точки на поверхні, щоб покращити її висоту в контексті аналізу PS-InSAR.

Метод інтерферометрії малих базисних ліній (SBAS).

Інтерферометрія малих базисних ліній, на відміну інтерферометрії постійних розсіювачів, є менш автоматизованим методом і потребує більшої кваліфікації виконавця. У цьому випадку посилюється внесок статистики у фінальний результат за рахунок перехресного опрацювання дуже великої кількості інтерферометричних пар при тій самій кількості знімків. Для опрацювання за цим методом не обов'язкова наявність 30 знімків, опрацювання можливе і за меншої кількості. Н рис.2.5 подано алгоритм роботи методу SBAS.



Рис. 2.5. Технологічна схема реалізації методу SBAS

Наприклад, у випадку 15-прохідного ланцюжка загальна можлива кількість пар знімків досягає 105. З них за величиною найменшої просторової бази вибираються, наприклад, 30-40 пар. Пари можуть бути перехресними (перший прохід з другим, другий з третім, перший з третім, другий з четвертим тощо). Опрацювання кожної пари ведеться в напівавтоматичному режимі з виконанням чотирьох кроків:

1. Автоматична корегістрація, розрахунок інтерферограми, синтез фази рельєфу, віднімання фази рельєфу з інтерферограми, фільтрація диференціальної інтерферограми, розрахунок когерентності, розгортання фази.

2. Набір точок з відомими координатами та висотами для корекції орбітальних параметрів.

3. Розрахунок скоригованих диференціальних інтерферограм та розгорнутих фаз.

4. Інверсія отриманих перехресних у часі розгорнутих фаз за методикою SBAS із відновленням послідовної у часі історії зсувів. При цьому також відновлюється хронологія зсувів від першого знімка ланцюжка до останнього.

Алгоритм SBAS, з іншого боку, передбачає використання кількох підмножин диференціальних інтерферограм з малою базовою лінією (SB), щоб подолати властиве PSlInSAR обмеження. Використання підмножин SB, які визначаються як групи пар даних SAR, що характеризуються невеликим просторовим поділом між орбітами (тобто короткою просторовою базовою лінією), пом'якшує ефекти просторової декореляції, які, можливо, викликані довгою просторовою базовою лінією інтерферометричних пар. Крім того, кількість даних SAR, що використовуються для формування інтерферограми, може бути збільшена за рахунок комбінації підмножин SB з використанням розкладання сингулярним значенням (SVD). Застосування алгоритму SBAS до стека диференціальних інтерферограм також дозволяє проводити часовий аналіз зміщень поверхні на кожен дату збору даних SAR.

Критичне значення перпендикулярної просторової бази для кожної пари знімків може бути обчислено за формулою (2.11):

$$B_{n,cr} = \frac{\lambda R \tan(\theta)}{2R_r}, \quad (2.11)$$

де: $B_{n,cr}$ — критична базова лінія; λ — довжина зондуючої хвилі радіолокатора; R_r — просторова розрізненість в напрямку похилої дальності.

За цією формулою, критична перпендикулярна базова лінія для використовуваних даних, наприклад ENVISAT / ASAR Image Mode становить близько 900-1500 м, а для даних ALOS / PALSAR - 6500 м в режимі FBS і 13 000 м в режимі FBD (6500 м при перехресній обробці режимів FBS і FBD). Оптимальна для розрахунку зсувів перпендикулярна база у випадку обох вищевказаних супутників коливається в діапазоні від 0 до 30% від критичної бази. Тимчасовою базою називають проміжок часу, який пройшов між зйомкою зображень, що складають інтерферометричну пару. Поняття тимчасової бази прямо пов'язане з такою важливою проблемою, як тимчасова декореляція, що виникає за рахунок змін рельєфу, рослинності, вологості та інших властивостей, що відбулися за період між зйомками. Проблема тимчасової декореляції може бути вирішена збільшенням довжини зондуючої хвилі (що підвищує

«просвічуючу» здатність радіохвиль) або скороченням тимчасової бази (тобто проміжку між зйомками). В ході моніторингу зсувів земної поверхні застосований вищезазначений підхід інтерферометричного опрацювання пар знімків, відібраних з усіх можливих пар за принципом найменших базових ліній. При цьому результат опрацювання представлений у вигляді карт зміщень за періоди між першою зйомкою і по черзі кожною з наступних зйомок. Тобто результат показує розвиток зміщень в часі, а також підсумкову карту зміщень за весь період спостережень [257].

Тривимірна інтерферометрія (3D InSAR).

Тривимірна інтерферометрія (3D InSAR) - це технологічний метод зондування Землі за допомогою супутникових зображень для отримання тривимірної інформації про її рельєф та деформації земної поверхні в часі. Цей метод базується на вимірюванні фазових змін в сигналах радіохвиль, які відбиваються від поверхні Землі. Використовуючи ці дані, 3D InSAR дозволяє аналізувати висоту, рухи та зміни форми об'єктів на поверхні Землі.

Основні принципи 3D InSAR включають в себе використання супутникових радіолокаційних систем, які видають електромагнітні хвилі та отримують їхні відбиття від поверхні Землі. Зміни фази цих хвиль вимірюються і використовуються для розрахунку висот, рухів і деформацій земної поверхні.

Техніка 3D InSAR здатна виявляти навіть невеликі зміни в рельєфі та земній поверхні, що можуть виникати внаслідок природних явищ, таких як зсуви, сейсмічна активність або витік газу. Цей метод широко використовується в геології, геофізиці, геодезії та інших галузях для моніторингу змін у природних та антропогенних процесах на поверхні Землі.

Формули для тривимірної інтерферометрії (3D InSAR) можуть бути дещо складними, оскільки вони включають в себе розрахунки фазових змін сигналів SAR для визначення тривимірних параметрів. Важливо зауважити, що конкретні формули можуть варіюватися в залежності від конкретного методу 3D InSAR та параметрів дослідження. Вигляд загальних формул для розрахунку цього методу продемонстровано нижче.

Фаза інтерференції (ϕ) визначається як різниця фаз між двома спостереженнями (2.12).

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (R_1 - R_2), \quad (2.12)$$

де λ - довжина хвилі сигналу, R_1 та R_2 - відстань від супутника до точок на поверхні для двох різних моментів часу.

Для визначення висоти (h) поверхні використовується формула (2.13)

$$h = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{\phi}{B}, \quad (2.13)$$

де B - ширина смуги сигналу.

Для визначення деформацій поверхні в часі використовується залежність від часу (2.14):

$$\Delta h(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\phi(t)}{B}, \quad (2.14)$$

де $\Delta h(t)$ - зміна висоти, а $\Delta\phi(t)$ - зміна фази в часі.

При використанні даних від двох супутників для формування тривимірної моделі, формули можуть включати інші параметри та матриці для врахування геометричних відношень.

Важливо пам'ятати, що ці формули є загальними та можуть змінюватися в залежності від конкретного методу опрацювання даних та обраного підходу в дослідженні тривимірної інтерферометрії.

2.3. Методи визначення аномалій георадарного знімання та їх аналіз

Георадарне знімання використовується для виявлення аномалій в ґрунті, ґрунтовому покриві та конструкціях. Аномалії можуть бути викликані різними причинами, такими як зміна густини матеріалів, наявність порожнин, тріщин, структурних змін, геометричних відхилень тощо.

Методи визначення аномалій георадарного знімання включають аналіз відбитих сигналів від підземних структур. Це може включати виявлення змін в електричній провідності або діелектричних властивостях ґрунту.

Основним методом визначення аномалій георадарним зніманням є аналіз різниці відбитих радіосигналів на поверхні об'єктів, що розташовані в ґрунті або на поверхні конструкцій. Цей метод називається методом диференційованого георадарного знімання [76, 85].

Диференційоване наземне георадарне знімання (Differential Ground Penetrating Radar Interferometry, DGPRi)

Диференційоване наземне георадарне знімання (Differential Ground Penetrating Radar Interferometry, DGPRi) використовує наземні антени, розташовані на поверхні Землі, для вивчення внутрішньої структури та змін у ґрунті чи будь-якому іншому середовищі.

Основні етапи методу визначення аномалій DGPRi:

1. Встановлення та калібрування радарних антен.

По-перше, радарні антени встановлюються на поверхні Землі в точках, які визначаються для отримання максимальної інформації. Антени калібруються для забезпечення точних вимірів.

2. Збір даних.

Здійснюється збір радарних даних, які включають в себе ехо-сигнали, що отримані відбиттям від об'єктів та поверхонь у наземному середовищі.

3. Диференційований аналіз.

Проводиться аналіз фазових та амплітудних змін між різними моментами часу або між різними точками в просторі. Цей диференційований аналіз дозволяє виявляти невеликі зміни у структурі ґрунту або інших аномаліях.

4. Визначення аномалій.

Зміни в фазі та амплітуді можуть свідчити про аномалії, такі як зміни властивостей ґрунту, наявність підземних структур або водних шарів, а також інші геологічні та геотехнічні параметри.

5. Інтерпретація та моделювання.

Отримані дані використовуються для інтерпретації аномалій та можуть бути використані в геологічних та інженерних моделях для кращого розуміння підземного середовища.

DGPRi є ефективним методом для виявлення аномалій у ґрунті, підземних структурах та інших об'єктах, що лежать під поверхнею землі.

Фаза інтерференції (ϕ) може бути визначена, аналізуючи різницю фаз між ехо-сигналами, отриманими в різні моменти часу чи від різних точок на поверхні. Однак, конкретні формули будуть залежати від характеристик системи георадару та процесу аналізу даних.

Фазові зміни можуть бути пов'язані з деформаціями або змінами властивостей ґрунту. Для визначення цих змін можна використовувати відомості про довжину хвилі (λ), частоту (f) та швидкість поширення хвиль (v), взяті з системи георадару (2.15).

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot l \quad (2.15)$$

де l – дистанція.

Зміни фази можуть бути перетворені в зміни висоти або інші властивості ґрунту.

Важливо відзначити, що конкретні формули можуть варіюватися в залежності від технічних характеристик конкретного георадарного обладнання та методів опрацювання даних, які використовуються в кожному конкретному випадку DGPRi. Реалізація та аналіз DGPRi зазвичай виконуються за допомогою спеціалізованих програм і методів опрацювання даних для конкретних завдань дослідження [105, 127].

Часовий аналіз сигналів.

Часовий аналіз сигналів в георадарному зніманні (Ground Penetrating Radar, GPR) грає ключову роль у визначенні властивостей та структури підземних об'єктів або шарів. Цей аналіз дозволяє отримати інформацію про глибину, розташування та різноманітні характеристики об'єктів, що знаходяться під поверхнею.

За допомогою перетворення Фур'є, сигнали, отримані з георадару, можуть бути розкладені на частотні компоненти. Це дозволяє визначити характеристики

підземних об'єктів та шарів, оскільки різні матеріали можуть мати характерні частоти відбиття.

Аналіз зміни амплітуди сигналів відносно часу може надати інформацію про різноманітні властивості, такі як вологість чи пористість ґрунту. Амплітудні зміни можуть також свідчити про наявність підземних об'єктів.

Сигнали можуть бути аналізовані на різних глибинах та в різний час. Це дозволяє створювати часові профілі, які показують структуру підземного простору на різних глибинах.

Імпульсно-ехокометричний аналіз включає в себе вивчення ехо, відбитих від різних шарів або об'єктів. Цей аналіз може бути використаний для визначення глибини та природи підземних об'єктів.

У часовому аналізі важливо враховувати шум, що може впливати на точність визначення властивостей підземних об'єктів. Використання фільтрів та методів зменшення шуму допомагає покращити якість сигналу.

Деякі додаткові аспекти, такі як аналіз динаміки змін властивостей земної поверхні з часом, можуть бути вивчені за допомогою 3D часового аналізу, який охоплює просторові та часові аспекти.

Часовий аналіз сигналів у георадарному зніманні є потужним інструментом для визначення структури і властивостей підземних об'єктів, а також для моніторингу змін в часі.

Формули часового аналізу в георадарному зніманні залежать від конкретних завдань та даних, які обробляються [150, 214, 278].

Перетворення Фур'є дозволяє перетворити сигнали з домену часу в частотний домен та навпаки. Це корисно для аналізу частотної структури сигналів. Формула для дискретного перетворення Фур'є (DFT) (2.16):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad (2.16)$$

де $X(k)$ - комплексні амплітуди у частотному домені, $x(n)$ - сигнал у часовому домені, N - кількість відліків.

Кореляція використовується для визначення ступеня схожості між двома сигналами. Формула для обчислення кореляції між сигналами $x(t)$ та $y(t)$ (2.17):

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot y(t + \tau) dt, \quad (2.17)$$

де τ - зсув у часі.

Спектральна густина потужності (Spectral Power Density) визначає розподіл потужності сигналу в частотному домені. Формула для спектральної густини потужності $S(f)$ (2.18):

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot |X(f)|^2, \quad (2.18)$$

де $X(f)$ - комплексна амплітуда у частотному домені.

Фільтрація використовується для виділення або приглушення певних частот у сигналі. Наприклад, для низькочастотної фільтрації може використовуватися фільтр Гауса (2.19):

$$H(f) = e^{-\frac{f^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.19)$$

де $H(f)$ - функція передачі фільтра, σ - параметр ширини.

Ці формули представляють загальні концепції часового аналізу, і конкретні методи та формули можуть змінюватися в залежності від конкретних завдань та обраного підходу в георадарному зніманні [130, 232].

Перевагою цього методу є проста реалізація та можливість визначення глибини аномалій і їхнє розташування. Недоліком може бути обмеження в складних геологічних умовах, де відбиті сигнали можуть мати декілька шляхів.

Частотний аналіз.

Частотний аналіз георадарних сигналів дозволяє визначати аномалії та властивості об'єктів, розташованих під землею або іншими матеріалами. Визначення аномалій може включати в себе виявлення змін у властивостях ґрунту, ідентифікацію підземних структур або об'єктів, аналіз різних шарів тощо.

Фільтрація може виявити аномалії, виділяючи певні частотні компоненти сигналу. Наприклад, для виділення високочастотних аномалій можна використовувати фільтр високих частот (2.20):

$$H(f) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } f > f_c, \\ 0, \text{ інакше} \end{cases}, \quad (2.20)$$

де f_c - частота відсічення.

Спектрограма є представленням еволюції частотних компонентів сигналу відносно часу. За допомогою спектрограми можна визначити, як змінюються частотні властивості сигналу в залежності від часу. Використання кореляції для виявлення аномалій відбувається через порівняння сигналів на різних частотах або в різний час. Великі відхилення в кореляції можуть вказувати на наявність аномалій. Визначення резонансів або пікових частот у спектрі може показати наявність аномальних об'єктів чи структур.

Амплітудний аналіз.

Амплітудний аналіз георадарних сигналів визначає аномалії за допомогою вивчення змін амплітуд сигналів. Визначення аномалій на основі амплітуд може включати в себе аналіз змін відбиття, розсіювання або поглинання електромагнітного сигналу георадару, що відбивається від підземних об'єктів або ґрунту. Амплітудний профіль представляє собою графік зміни амплітуд сигналу відносно глибини чи відстані. Зміни в амплітудах можуть свідчити про наявність аномалій, таких як підземні структури чи зміни властивостей ґрунту.

Визначення максимальної амплітуди сигналу може допомогти виявити найбільш виражені аномалії, які можуть бути пов'язані з об'єктами або структурами, які впливають на відбитий сигнал. Порівняння амплітуд сигналів на різних частотах може вказувати на аномалії, оскільки різні частоти можуть взаємодіяти з підземними об'єктами по-різному. Спектрограма амплітуд показує зміни в амплітуді сигналу в залежності від часу та/або частоти. Аномалії можуть бути виявлені у вигляді різниць у спектральних характеристиках. Аналіз кореляції амплітуд між різними частотами чи віддзеркаленнями може вказувати на наявність аномалій, які можуть впливати на розподіл амплітуд. Використання математичних моделей для опису змін в амплітуді сигналу внаслідок різних підземних умов або об'єктів [152, 179].

Амплітудний аналіз в георадарному зніманні може допомогти ідентифікувати аномалії та зрозуміти їх природу на основі змін в амплітуді відбитих сигналів.

Перевагою амплітудного аналізу можна вважати те, що він дозволяє визначати зміни властивостей матеріалів та ефективний для виявлення аномалій із відмінною електричною провідністю. Недоліком є те, що він може бути вразливий до впливу шумів та інтерференції.

Поляризаційний аналіз.

Поляризаційний аналіз в георадарному зніманні визначає аномалії шляхом вивчення взаємодії електромагнітного сигналу із субстратом (грунтом, підземними структурами) при різних типах поляризації. Поляризація визначає, як коливання електромагнітного поля орієнтовані в просторі. Георадарні системи можуть використовувати горизонтальну (H) та вертикальну (V) поляризацію сигналу. Горизонтальна поляризація може бути більш чутливою до підземних структур, тоді як вертикальна поляризація може краще віддзеркалюватися від поверхневих об'єктів. Деякі георадарні системи можуть використовувати кругову чи еліптичну поляризацію, яка взаємодіє з об'єктами у більш складний спосіб, ніж лінійна поляризація. Аналіз різниці у відбитому сигналі при різних типах поляризації може допомогти виявити аномалії. Наприклад, зміни в амплітуді, фазі чи інших параметрах сигналу при різних поляризаціях можуть вказувати на особливості підземних об'єктів чи структур. Поляризаційний аналіз може вказувати на різні реакції матеріалів на різні типи поляризації. Наприклад, деякі матеріали можуть бути краще виділятися або поглиблювати сигнал при певній поляризації. Створення поляризаційних карток або матриць, які показують відношення амплітуд та фаз для різних комбінацій поляризації, може полегшити виявлення аномалій. Використання інтерферометричних методів із застосуванням різних типів поляризації для отримання додаткової інформації про підземні структури та властивості.

Поляризаційний аналіз в георадарному зніманні дозволяє отримати додаткові відомості про підземні об'єкти, їхню структуру та властивості, що може поліпшити здатність визначення аномалій та розуміння природи підземних умов.

Поляризаційний аналіз в георадарному зніманні зазвичай використовується для вивчення взаємодії електромагнітного сигналу з підземними структурами чи об'єктами. Існує декілька основних параметрів та формул, які враховуються при поляризаційному аналізі.

Матриця розсіювання описує взаємодію електромагнітного хвильового поля з об'єктом. Для лінійних поляризацій H (горизонтальна) та V (вертикальна) можна визначити матрицю розсіювання S (2.21):

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

де S_{HH} , S_{HV} , S_{VH} , S_{VV} - компоненти матриці розсіювання.

Коефіцієнт розсіювання визначає міру взаємодії електромагнітного сигналу з підземними об'єктами. Коефіцієнти розсіювання можуть бути визначені з елементів матриці розсіювання (2.22):

$$\Gamma_H = \frac{S_{HH}}{S_{HV}}, \quad (2.22)$$
$$\Gamma_V = \frac{S_{VV}}{S_{VH}},$$

де Γ_H та Γ_V - коефіцієнти розсіювання для горизонтальної та вертикальної поляризації відповідно.

Добуток розсіювання є важливим параметром при аналізі аномалій. Його можна визначити як абсолютне значення детермінанту матриці розсіювання.

Добуток розсіювання вказує на об'ємні аномалії та їх вплив на відбитий сигнал.

Формули (2.21-2.22) є загальними і використовуються при поляризаційному аналізі в георадарному зніманні. Реальні моделі та формули можуть різнитися в залежності від конкретної георадарної системи та завдань дослідження.

Перевагами поляризаційного аналізу є те, що він надає інформацію про орієнтацію та характер аномалій і корисний для розрізнення структур з різною анізотропією. Недоліком є те, що він вимагає додаткового обладнання, може бути більш складним у реалізації.

Томографічні методи.

Томографічні методи в георадарному зніманні використовуються для визначення внутрішньої структури об'єктів під землею шляхом опрацювання та аналізу сигналів, що відбиваються від різних глибин та напрямків. Ці методи дозволяють створювати тривимірні образи внутрішньої структури об'єктів та виявляти аномалії. Основні томографічні методи в георадарному зніманні включають:

✓ *Томографію на основі часу польоту (Time-of-Flight Tomography).*

Цей метод визначає внутрішню структуру, використовуючи час, який потрібний для відбиття сигналу від різних глибин. Алгоритми реконструкції томографії визначають відмінності у часі проходження сигналу для різних напрямків та проєкцій, щоб створити тривимірне зображення.

✓ *Томографію на основі частоти (Frequency-Domain Tomography).*

Цей метод використовує інформацію про частотні компоненти сигналу для визначення внутрішньої структури. Визначаються частотні характеристики сигналів, які відбиваються від різних глибин, і використовуються для відтворення образів.

✓ *Томографію на основі поляризації (Polarimetric Tomography).*

Використання інформації про поляризацію сигналу для визначення внутрішньої структури об'єкта. Цей метод враховує зміни в поляризації сигналу, відбитого від об'єкта, які можуть вказувати на аномалії.

✓ *Томографію з використанням множинних антен (Multi-Antenna Tomography).*

Використання декількох антен для одночасного отримання сигналів з різних напрямків. Інформація з різних антен використовується для визначення тривимірної структури об'єкта.

✓ *Інтерферометричну томографію (Interferometric Tomography).*

Використання інтерферометричних методів для вимірювання різниць у фазах сигналів, відбитих від різних глибин. Ці фазові інформації використовуються для створення тривимірного образу об'єкта.

✓ *Тривимірну томографію на основі спектрального аналізу (Spectral Tomography):*

Аналіз спектральних характеристик сигналу для визначення внутрішньої структури. Використовуються різні частотні компоненти для реконструкції образу [215].

Ці томографічні методи дозволяють отримувати високороздільні та тривимірні образи внутрішньої структури об'єктів під землею та виявляти аномалії в цих структурах.

Формули для томографічних методів визначення аномалій в георадарному зніманні можуть бути складними та залежати від конкретного методу та використовуваного обладнання.

Визначення образів за допомогою перетворення Радона є ключовим елементом томографії. Це математичне перетворення використовується для визначення інтегральних проєкцій об'єкта з різних напрямків та формування тривимірного образу. Формула для інтегральної проєкції P може бути виражена як (2.23):

$$P(\theta, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) ds, \quad (2.23)$$

де $f(x, y)$ - щільність матеріалу, s - параметр поперечного зсуву, а θ - кут.

Після отримання проєкцій застосовується фільтрація та зворотне відображення для відтворення образу. Основна формула для фільтрованого зворотного відображення (2.24):

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} P(\theta, s) \cdot \omega(\theta, s, x, y) d\theta, \quad (2.24)$$

де $\omega(\theta, s, x, y)$ - ваговий коефіцієнт, який залежить від параметрів зображення та розташування сенсорів.

Використовуються методи реконструкції, які базуються на алгоритмах ітеративної апроксимації, такі як метод максимальної ентропії (MLE), метод альтернативних напрямків та інші.

Для аналізу та відтворення тривимірного образу можуть використовуватися методи на основі спектрального аналізу, такі як фільтр зворотного локалізованого Радона.

Ці формули представляють загальні концепції та методи, які можуть використовуватися в томографії на основі георадару для визначення внутрішніх структур та виявлення аномалій. Реальні формули можуть змінюватися в залежності від конкретного методу та обладнання.

Перевагами томографічних методів може бути надання тривимірного зображення підземних структур та можливість отримати детальнішу інформацію про них. Недоліком є складніше обчислювальне завдання, яке вимагає більше опрацювання даних та ресурсів.

2.4. Математичне поєднання результатів опрацювання радіолокаційних даних та георадарного знімання

Математичне узгодження результатів опрацювання радіолокаційних даних та георадарного знімання може бути досягнуто за допомогою методів фільтрації та опрацювання сигналів.

Один з підходів до узгодження результатів може полягати у використанні алгоритмів фільтрації, таких як фільтр Калмана. Цей метод базується на обчисленні оцінки стану системи на основі опрацьованої інформації зі всіх джерел та моделювання системи за допомогою стохастичних диференціальних рівнянь.

Інший підхід до узгодження даних може полягати у використанні алгоритмів опрацювання сигналів, таких як кореляційний аналіз. Цей метод заснований на порівнянні сигналів, що отримані з різних джерел та встановленні ступеня їх відповідності.

Крім того, можна використовувати й інші математичні методи, такі як аналіз головних компонентів, методи класифікації та розпізнавання образів, щоб узгоджувати результати опрацювання даних.

В будь-якому випадку, при узгодженні результатів опрацювання радіолокаційних даних та георадарного знімання необхідно враховувати особливості кожного методу та джерела даних, а також забезпечити якість та точність опрацювання даних.

Для поєднання результатів космічної радіолокаційної інтерферометрії з супутника Sentinel-1 та георадарного знімання у певній точці нами запропонована формула з використанням вагового підходу (2.25).

$$R = \alpha \cdot C_i + \beta \cdot C_g, \quad (2.25)$$

де:

R – результат об'єднання двох методів для окремої точки на поверхні;

α і β - ваги, які визначають важливість кожного джерела даних в об'єднаному результаті. Ці ваги можуть бути підібраними експертами або шляхом оптимізації в залежності від конкретного застосування;

C_i - результат вимірювань, отриманий від супутникової радіолокаційної інтерферометрії в певній точці;

C_g - результат георадарного знімання в цій самій точці.

Цей підхід дозволяє об'єднати інформацію з обох джерел для отримання більш повного та достовірного зображення певної точки.

Формула поєднання InSAR (інтерферометричного супутникового радіолокаційного зондування) і GPR (георадару) може бути складною і залежати від конкретного використання. Однак, загальною ідеєю може бути об'єднання інформації, отриманої з обох джерел, для покращення точності інтерпретації та аналізу геологічних структур чи властивостей ґрунту.

Можлива загальна формула (2.26):

$$R = f(D_{InSAR}, D_{GPR}), \quad (2.26)$$

де f - це функція, яка може включати в себе різні операції опрацювання даних, фільтрацію та інші методи аналізу, щоб досягти більш точного результату; D_{InSAR}, D_{GPR} – відповідні дані.

Враховуючи різноманітність застосувань InSAR та GPR, розглянемо декілька можливих запропонованих нами варіантів формул поєднання:

1. Комбінація даних:

$$R = D_{InSAR} + D_{GPR}.$$

Запропонована формула використана в практичній роботі при створенні програмного модуля у п.5. Всі решта формули запропоновані на теоретичному рівні.

2. Використання вагових коефіцієнтів:

$$R = w \times D_{InSAR} + k \times D_{GPR} + I.$$

3. Об'єднання через функцію активації:

$$R = \sigma(D_{InSAR} + D_{GPR}).$$

4. Мульти模альний аналіз:

$$R = g(INSAR_features, GPR_features),$$

де g - функція, яка може бути, наприклад, нейронною мережею або іншим методом машинного навчання.

5. Фільтрація та опрацювання даних:

$$R = f(D_{InSAR} + D_{GPR}).$$

Обрана формула буде залежати від конкретного завдання та характеристик наявних даних. Важливо враховувати особливості кожного методу і визначити, як їхнє об'єднання може покращити результати аналізу.

Один з можливих підходів до поєднання INSAR і GPR може виглядати так:

$$R = w \times D_{InSAR} + k \times D_{GPR} + I,$$

де w та k - вагові коефіцієнти, які визначають важливість кожного джерела даних, I - інші фактори, що можуть включати додаткові корекції або інформацію, яка допомагає у покращенні точності результатів.

Цей підхід дозволяє зберегти інформацію від обох джерел, привласнюючи їм ваговий внесок відповідно до їхньої важливості. Важливо налаштовувати вагові коефіцієнти відповідно до конкретного дослідження та умов, щоб досягти оптимального результату.

Ваговий коефіцієнт - це числовий параметр, який визначає важливість або вагомість певного елемента в сумі чи комбінації. У контексті поєднання InSAR і

GPR вагові коефіцієнти (w та k) вказують, наскільки кожне джерело даних здійснює свій внесок у загальний результат.

Наприклад, якщо InSAR вважається більш важливим для конкретного застосування, можна призначити більший ваговий коефіцієнт w і менший k , і навпаки.

Важливість вагових коефіцієнтів полягає в тому, що вони дозволяють користувачеві визначити, яке джерело даних або яка частина інформації вносить більший внесок у кінцевий результат. Це може бути важливим при поєднанні даних з різних джерел або при вирішенні завдань машинного навчання, де оптимізація вагових коефіцієнтів може поліпшити точність моделі.

Розрахунок D_{InSAR} включає в себе декілька етапів:

➤ *Отримання супутникових даних*

Отримуються супутникові дані InSAR, які включають інтерферометричні пари знімків. Ці пари дозволяють вимірювати зміни фази радіохвиль, викликані змінами висоти поверхні.

➤ *Процес інтерферометрії*

Застосовується інтерферометричний процес для обчислення фазової інформації. Це включає створення інтерферограми, яка відображає фазові зміни між двома супутниковими знімками.

➤ *Розпакування фази*

Розпаковується фазова інформація для отримання висот поверхні. Цей етап включає в себе врахування модуляційної фази та інших корекцій для отримання фактичних висот.

➤ *Фільтрація та корекції*

Застосовується фільтрація та корекція для зменшення шумів і систематичних похибок, які можуть виникнути внаслідок атмосферних умов, геометричних артефактів тощо.

➤ *Калібрування*

Проводиться процес калібрування для врахування специфікацій супутникового радіолокаційного обладнання та інших факторів.

➤ *Формування даних InSAR*

Отримані результати представляють D_{InSAR} , які включають висоти поверхні, асоційовані з конкретними точками на землі.

Точний розрахунок залежить від конкретного програмного забезпечення чи бібліотеки, яка використовується для обробки даних InSAR.

Розрахунок D_{GPR} (дані від георадару без додаткової обробки) включає в себе декілька основних етапів:

➤ *Збір даних від георадару*

Здійснюється збір сигналів від георадару, які відбиваються від об'єктів або структур, розташованих під поверхнею.

➤ *Перетворення радарного сигналу*

Аналізується та перетворюється радарний сигнал для виділення важливої інформації, яка вказує на наявність об'єктів чи структур під землею.

➤ *Фільтрація та видалення шуму*

Застосовуються фільтри та методи обробки сигналу для зменшення шуму та покращення якості сигналу. Це дозволяє зробити виявлення об'єктів більш точним.

➤ *Інтерпретація георадарних зображень*

Аналізуються георадарні зображення для інтерпретації структур та об'єктів, які відображаються під поверхнею.

➤ *Виділення важливих властивостей*

Виділяють важливі властивості матеріалів або об'єктів, такі як їх глибина, геометрія та діелектричні властивості.

➤ *Формування даних D_{GPR}*

Отримані результати представляють D_{GPR} , які можуть бути використані для аналізу та інтерпретації підземних структур чи матеріалів.

Важливо пам'ятати, що розрахунок D_{GPR} може варіюватися в залежності від обладнання, програмного забезпечення та конкретних цілей дослідження.

Висновки та рекомендації до розділу 2

Експлікація наукових досліджень з аналізу фізичних аспектів взаємодії радіохвиль із земною поверхнею, їх властивостей та можливостей використання в наукових та прикладних дослідженнях дозволила зробити такі висновки:

1. Радіолокаційне і георадарне знімання ґрунтуються на різних фізичних принципах, що унеможливорює їх математичне об'єднання, проте дозволяє інтегрувати результати їхнього опрацювання.

2. Результати аналізу теоретичних та практичних аспектів використання інтерферометричних методів у рамках радіолокаційного зондування свідчать про те, що для визначення вертикальних зміщень в ландшафтних дослідженнях доцільно застосовувати інтерферометричний метод SBAS, оскільки він потребує меншої кількості космічних знімків та менше часу на обробку даних.

3. Аналіз підходів до визначення аномалій у георадарних дослідженнях показав, що використання ефективних алгоритмів обробки сигналів та інтегративних підходів є необхідними для точного аналізу підземних елементів об'єктів історико-культурної спадщини. Виявлено переваги та недоліки кожного з методів виявлення аномалій, що дозволяє коригувати межі земель історико-культурного призначення.

4. На основі теоретичних досліджень вперше здійснено математичне поєднання результатів радіолокаційного та георадарного знімання, що дозволило забезпечити їх взаємодію в рамках програмного модуля для опрацювання даних. Це розширює можливості точного визначення вертикальних зміщень та характеристик підземних об'єктів, сприяючи більш ефективному моніторингу земель історико-культурного призначення.

РОЗДІЛ 3.

ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДЗЗ І ГЕОРАДАРУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗЕМЕЛЬ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Тема моніторингу земель історико-культурного призначення не втрачає своєї актуальності протягом багатьох років. В різний час даною тематикою займалися і займаються багато як українських вчених так і з-за кордону. Проте, серед дистанційних методів моніторингу, застосовуються в основному або аналіз даних аерознімання, отриманих з БПЛА, або космічні знімки різної просторової розрізненості в залежності від об'єктів. Комплексної концепції застосування двох та більше дистанційних методів в поєднанні з наземними неінвазивними дослідженнями для моніторингу земель історико-культурного призначення ні в Україні ні за кордоном досі запропоновано не було.

Якщо ж говорити про сучасні проблеми то однією з основних проблем моніторингу земель історико-культурного призначення є недостатнє фінансування та технічне забезпечення, особливо новітніми технологіями і обладнанням. Це ускладнює проведення регулярних інспекцій і обстежень, необхідних для своєчасного виявлення та усунення загроз. Крім того, брак фахівців у галузі охорони культурної спадщини обмежує можливості для проведення якісного моніторингу та належної оцінки стану об'єктів.

Ще однією важливою проблемою є урбанізація та забудова, яка часто призводить до порушення цілісності історико-культурних територій. Відсутність чітких правових механізмів і регуляторних норм, що забезпечують захист таких земель, робить їх вразливими до незаконних забудов та інших видів антропогенного впливу. Для ефективного вирішення цих проблем необхідно вдосконалити законодавчу базу та посилити контроль за дотриманням чинних норм.

Шляхи вирішення зазначених проблем включають впровадження сучасних технологій, таких як геоінформаційні системи, дистанційне зондування Землі та наземні неінвазивні методи, які дозволяють проводити моніторинг у режимі

реального часу. Ці технології забезпечують точний аналіз змін на територіях та допомагають оперативно реагувати на загрози. Крім того, важливою складовою успішного моніторингу є активна участь громадськості. Залучення місцевих громад до процесу спостереження та охорони культурної спадщини може сприяти своєчасному виявленню проблем та забезпечити додатковий рівень захисту.

Нижче наведемо деякі характеристики точності досліджень, яких необхідно дотримуватись вивчаючи різні об'єкти історико-культурної спадщини [34].

Вимоги до точності дослідження архітектурних об'єктів історико-культурної спадщини є високими, оскільки точність відіграє ключову роль у збереженні, вивченні та реконструкції цих об'єктів. Ось деякі основні вимоги до точності досліджень:

- геопросторова точність: зазвичай точність локації об'єктів на рівні не менше 1-2 метрів;
- геометрична точність: для розмірів і форм архітектурних об'єктів вимагається точність не менше +/- 5 сантиметрів;
- деталізація: вимоги до точності деталізації можуть варіюватися, але зазвичай вона повинна бути не менше +/- 10 сантиметрів для виявлення найдрібніших деталей;
- точність реконструкції: відтворення оригінальних форм та деталей може вимагати точності не менше +/- 10 сантиметрів;
- історична достовірність: важливо зберігати точність відтворення об'єктів такими, як вони виглядали у відповідну історичну епоху.

Вимоги до точності дослідження археологічних об'єктів історико-культурної спадщини є наступними:

- геопросторова точність: точність локації об'єктів на рівні не менше +/- 0.5 метра;
- геометрична точність: для розмірів та форм археологічних об'єктів вимагається точність не менше +/- 0.1 метра;

- деталізація: вимоги до точності деталізації можуть варіюватися залежно від розміру та складності об'єктів, але зазвичай вона повинна бути не менше ± 0.05 метра для виявлення найдрібніших деталей.

Вимоги до точності дослідження ландшафтних об'єктів історико-культурної спадщини:

- геопросторова точність: точність локації об'єктів на рівні не менше ± 3 метра (точність може варіюватись в залежності від території і характеру об'єкта);
- геометрична точність: для розмірів та форм ландшафтних об'єктів вимагається точність не менше ± 0.5 метра;
- деталізація: вимоги до точності деталізації можуть варіюватися залежно від розміру та складності об'єктів, але зазвичай вона повинна бути не менше ± 0.1 метра для виявлення найдрібніших деталей;

Вимоги до точності дослідження братських поховань включають наступне:

- геопросторова точність: вимагається точність локації поховань на рівні не менше ± 0.5 метра;
- геометрична точність: для розмірів та форм поховань вимагається точність не менше ± 0.1 метра;
- деталізація: вимоги до точності деталізації варіюються залежно від ступеня збереженості поховання, але зазвичай вона повинна бути не менше ± 0.05 метра для виявлення найдрібніших деталей.

В таблиці 3.1 подано відповідність точності дослідження різних об'єктів історико-культурної спадщини дистанційними і неінвазивними методами [20].

Відповідність точності дослідження різних об'єктів історико-культурних спадщини дистанційними і неінвазивними методами

Тип об'єкту	Методи дистанційних та неінвазивних досліджень (серед тих, що розглядаються), що забезпечують точність
<i>Архітектурні об'єкти історико-культурної спадщини</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Космічне знімання надвисокої просторової розрізненості ✓ Аерознімання (з пілотованих апаратів і з БПЛА). ✓ Авіаційне лідарне знімання. ✓ Наземне лазерне сканування.
<i>Археологічні об'єкти історико-культурної спадщини</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Космічне знімання надвисокої просторової розрізненості ✓ Космічне радіолокаційне знімання надвисокої просторової розрізненості. ✓ Аерознімання (з пілотованих апаратів і з БПЛА). ✓ Авіаційне лідарне знімання. ✓ Георадарне знімання
<i>Ландшафтні об'єкти історико-культурної спадщини</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Космічне знімання надвисокої просторової розрізненості ✓ Космічне радіолокаційне знімання. ✓ Аерознімання (з пілотованих апаратів і з БПЛА). ✓ Авіаційне лідарне знімання. ✓ Наземне лазерне сканування. ✓ Георадарне знімання
<i>Братські поховання</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Космічне знімання надвисокої просторової розрізненості. ✓ Космічне радіолокаційне знімання надвисокої просторової розрізненості. ✓ Аерознімання (з пілотованих апаратів і з БПЛА). ✓ Авіаційне лідарне знімання.

Власне синергія двох і більше методів і дозволяє підвищити точність дослідження різних об'єктів або перейти від методу, який не задовольняє

точнісним характеристикам, до методу, що задовільнить. Наприклад, при дослідженні підземних об'єктів можна перейти від радіолокаційних досліджень з супутника Sentinel-1, що дає геопросторову точність 10-15 метрів і не задовольняє подібним дослідженням до використання аерознімання, а згодом до георадарного дослідження, що зможе точно вказати всі характеристики об'єкта.

Для дослідного полігону апробації теоретичних і практичних положень обрано два різних об'єкти:

1. Ансамбль оборонних споруд Цитадель, де за часів Другої світової війни розташовувався нацистський концентраційний табір військовополонених Stalag-328 (інфраструктура об'єкта збереглась майже повністю, окрім цього із попередніх досліджень відомо про місця масових розстрілів і поховань на території). Для даного об'єкта дослідження обрано період від 1941-1945 роки, оскільки історія Цитаделі є досить велика і містить різні артефакти за різні часи, що достатньо важко досягнути в межах даних досліджень.

2. Звенигородське городище, з залишками Звенигородського замку на території. Об'єкт фактично зруйновано історичними подіями і часом. Археологічні дослідження на території городища проводились з 50-х років минулого століття, віднайдені місця історичної кладки та інші артефакти, про які достеменно відомо, що полегшує наші дослідження.

3.1. Кадастровий моніторинг змін земельних ресурсів за допомогою даних ДЗЗ і георадару

Використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для виявлення антропогенних і природних змін на територіях історико-культурного призначення стало важливим напрямом у сфері охорони культурної спадщини. Завдяки сучасним технологіям дистанційного зондування дослідники отримують змогу моніторити зміни, що відбуваються на поверхні землі, включно з територіями, де розташовані важливі історико-культурні об'єкти. У процесі дослідження такі технології дозволяють не лише виявляти та відстежувати зміни,

але й попереджати про можливі загрози з боку як природних процесів, так і антропогенних факторів.

Антропогенні зміни на таких територіях можуть включати процеси урбанізації, будівництва, господарської діяльності, впливу інфраструктури, а також незаконної діяльності, зокрема розграбування або незаконного будівництва. Наприклад, будівельні проекти в міських та сільських районах можуть порушувати культурні ландшафти, а зміна землекористування може призводити до руйнування археологічних пам'яток. У цьому контексті дані ДЗЗ надають детальну інформацію про масштаби таких втручань та їхні наслідки для культурної спадщини. За допомогою мультиспектральної зйомки або радіолокаційної зйомки з синтезованою апертурою можна аналізувати зміни в структурі поверхні, виявляти нові будівлі, зміну ландшафту, порушення зелених зон тощо.

Природні зміни на територіях історико-культурного призначення здебільшого пов'язані з природними катаклізмами, геологічними процесами, змінами клімату або змінами в рослинності. Дані ДЗЗ можуть допомогти відстежувати процеси ерозії, осипання схилів, повені або лісові пожежі, які можуть призводити до знищення або пошкодження історичних та культурних об'єктів. За допомогою радіолокаційних даних можна контролювати зміщення ґрунту та інші динамічні процеси, що відбуваються внаслідок природних катастроф. Це дозволяє фахівцям своєчасно реагувати та вживати заходів для мінімізації шкоди.

Антропогенні фактори, які впливають на території історико-культурного призначення, також можуть включати сільськогосподарську діяльність, транспортну інфраструктуру та незаконні розкопки. За допомогою ДЗЗ дослідники можуть виявляти зони підвищеного ризику, де є загроза пошкодження об'єктів культурної спадщини через інтенсивне землекористування або неконтрольовану забудову. Наприклад, супутникові знімки можуть фіксувати розширення сільськогосподарських угідь або появу нових доріг поблизу важливих археологічних пам'яток. Завдяки цьому можна

вживати відповідних заходів для охорони та збереження культурних об'єктів [293].

Крім того, варто згадати про важливість мультиспектральних знімків для моніторингу змін в екосистемах, що оточують історико-культурні об'єкти. Наприклад, за допомогою індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) можна оцінювати стан рослинності, виявляти деградацію земель або зміни у рослинному покриві, що можуть впливати на стан культурних ландшафтів. Враховуючи, що багато історико-культурних об'єктів розташовані в природоохоронних зонах або на територіях з унікальними природними умовами, моніторинг таких змін є критично важливим для забезпечення їхньої цілісності та збереження.

Сучасні методи аналізу ДЗЗ, зокрема використання штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання, дозволяють автоматизувати процеси виявлення змін на поверхні Землі. Завдяки цьому дослідники можуть швидко ідентифікувати зони підвищеного ризику, де можливі природні або антропогенні зміни, що можуть негативно вплинути на історико-культурну спадщину. Наприклад, алгоритми класифікації зображень можуть автоматично виявляти нові будівлі, дороги, розширення сільськогосподарських площ або інші антропогенні зміни. Це суттєво підвищує ефективність процесу моніторингу та дозволяє швидше реагувати на загрози.

Незважаючи на значні переваги, використання ДЗЗ має і певні обмеження. Наприклад, супутникові знімки можуть бути недостатньо детальними для виявлення маломасштабних змін, які можуть бути критично важливими для збереження історико-культурних об'єктів. Крім того, хмарність або інші погодні умови можуть заважати отриманню якісних даних, особливо у випадку оптичних супутникових знімків. Для подолання цих обмежень часто використовуються радарні знімки, які можуть фіксувати зміни на земній поверхні незалежно від погодних умов або часу доби.

Інший виклик – це необхідність у фахівцях, які володіють необхідними навичками для аналізу даних ДЗЗ. Аналіз супутникових знімків вимагає не лише

технічних знань, але й глибокого розуміння особливостей територій історико-культурного призначення, їхнього значення та можливих загроз. Це створює необхідність у міждисциплінарному підході, коли фахівці з дистанційного зондування працюють у тісній співпраці з археологами, істориками, екологами та іншими фахівцями.

На територіях історико-культурного призначення, таких як археологічні пам'ятки, давні поселення, історичні парки або кладовища, будь-які порушення цілісності ґрунту можуть мати катастрофічні наслідки. Незаконні земляні роботи, включаючи будівельні роботи, встановлення інфраструктури або навіть пошук археологічних артефактів без дозволу, можуть завдати непоправної шкоди цим територіям. У таких випадках георадарне дослідження стає потужним інструментом для виявлення ознак таких порушень і відновлення історичних даних про об'єкти, що підлягають охороні.

Незаконна діяльність на таких територіях може мати різноманітні форми. Наприклад, це можуть бути будівельні роботи, які ведуться без належних дозволів або всупереч законам про охорону культурної спадщини. Будівництво нових споруд або доріг на таких територіях, які мають особливу культурну цінність, може призводити до руйнування не лише видимих об'єктів, а й тих, що знаходяться під землею. Зокрема, у багатьох випадках під землею можуть бути приховані артефакти або залишки стародавніх споруд, які мають велику історичну цінність. Георадар допомагає виявити такі об'єкти та фіксувати незаконну діяльність до того, як вона завдасть серйозної шкоди.

Окрім незаконного будівництва, георадар також ефективно виявляє сліди інших незаконних земляних робіт, таких як археологічне мародерство. Це явище, на жаль, часто зустрічається на територіях з багатою історико-культурною спадщиною, де шукачі артефактів намагаються знайти коштовні предмети, порушуючи землю без будь-якого дозволу. Мародери можуть залишати по собі сліди у вигляді виритих ям, порушених шарів ґрунту або навіть пошкоджених артефактів. Використання георадару дозволяє виявити такі сліди і вчасно

зафіксувати факт незаконної діяльності, що може допомогти у розслідуванні злочинів та збереженні культурних об'єктів.

Георадарне дослідження також ефективно використовується для виявлення порушень цілісності ґрунту, що виникають унаслідок природних процесів або діяльності людини, яка не є безпосередньо пов'язаною з незаконною діяльністю, але може негативно впливати на збереження культурної спадщини. Наприклад, природні процеси, такі як ерозія ґрунтів, рух підземних вод або зсуви, можуть поступово руйнувати археологічні пам'ятки або інші об'єкти культурної спадщини. Георадар дозволяє моніторити ці процеси та виявляти потенційні ризики для збереження об'єктів.

Георадар також дає змогу виявляти порушення цілісності ґрунту, які виникають внаслідок діяльності людини, зокрема інтенсивної сільськогосподарської діяльності, яка може призвести до деградації земель. Наприклад, використання важкої техніки на полях поблизу історичних об'єктів може викликати пошкодження ґрунту та підземних археологічних шарів. Георадарне дослідження дозволяє виявити ці пошкодження та оцінити їхній вплив на збереження культурної спадщини.

Одним із важливих аспектів використання георадару на територіях історико-культурного призначення є можливість створення тривимірних моделей підземних структур. За допомогою спеціалізованих програм можна створювати візуалізації підземних об'єктів, що дозволяє дослідникам отримати детальне уявлення про структури, які неможливо побачити на поверхні. Це особливо корисно в контексті виявлення незаконних земляних робіт, коли необхідно точно встановити місцезнаходження і характер порушень, щоб вчасно втрутитися і зупинити незаконну діяльність.

Використання георадару також допомагає мінімізувати втручання в культурні об'єкти, оскільки це метод неруйнівного дослідження. На відміну від традиційних методів археологічних розкопок, які часто вимагають фізичного втручання у ґрунт, георадар дозволяє досліджувати підземні об'єкти без будь-яких змін поверхневого шару. Це особливо важливо на територіях, де будь-яке

фізичне втручання може призвести до втрати цінної інформації або руйнування культурної спадщини.

Проте, як і будь-який метод дослідження, георадар має свої обмеження. Наприклад, якість отриманих даних може залежати від складу ґрунту, рівня вологості або наявності інших матеріалів, які можуть впливати на проходження радіохвиль. У деяких випадках георадар може не дати точних результатів у місцевостях із дуже щільними або вологими ґрунтами, де радіохвилі поглинаються і не можуть відбиватися належним чином. Тим не менш, у більшості випадків цей метод виявляється надзвичайно ефективним, особливо коли використовується в поєднанні з іншими методами дослідження.

Сучасні досягнення в обробці даних георадару також дозволяють покращити точність і надійність цього методу. Наприклад, використання штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання допомагає автоматично ідентифікувати аномалії в отриманих даних та класифікувати їх залежно від ймовірності того, що вони можуть бути наслідком незаконної діяльності. Це дозволяє значно підвищити ефективність роботи фахівців і знизити кількість помилкових спрацювань.

Георадарне дослідження для виявлення незаконних земляних робіт і порушень цілісності земель історико-культурного призначення є важливим інструментом у боротьбі за збереження культурної спадщини. Це метод, який дозволяє виявляти порушення без необхідності фізичного втручання у ґрунт, що є особливо цінним на територіях з історичними або культурними об'єктами. Завдяки цьому дослідники можуть швидко і ефективно ідентифікувати загрози та вживати заходів для збереження культурної спадщини для майбутніх поколінь.

Виявлення змін у землекористуванні та їхнє відображення в кадастрових реєстрах є складним і багатогранним процесом, який відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного управління земельними ресурсами. Землекористування зазнає постійних змін під впливом як природних процесів, так і діяльності людини, що робить необхідним постійний моніторинг та

оновлення кадастрових реєстрів для підтримання їхньої актуальності та точності. Правильне відображення таких змін є важливим не лише з погляду прав власності та економічних відносин, але й для планування сталого розвитку, збереження екологічної рівноваги та врахування культурно-історичних аспектів землекористування.

Протягом століть процес землекористування був керований традиційними способами обробки землі, але з часом зміни в технологіях, економічних умовах і соціальних потребах призвели до значного переформатування землекористування. Сучасні технології, включаючи дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційні системи (ГІС), а також супутникові знімки, дозволяють забезпечити високий рівень точності та швидкості виявлення змін у землекористуванні.

Один із головних факторів, що впливають на зміни в землекористуванні, – це урбанізація. Розширення міст, збільшення населення та потреба в житлових і промислових площах змушують перетворювати сільськогосподарські або природні території на міські зони. Зміни в землекористуванні через урбанізацію часто потребують офіційного затвердження в кадастрових реєстрах, що є правовим підтвердженням перетворення землі для нових цілей. Кадастрові реєстри зберігають інформацію про типи землекористування, їхні межі, площу та права власності, що є важливою основою для управління земельними ресурсами [293].

Кадастровий реєстр – це база даних, яка містить точну та актуальну інформацію про земельні ділянки, їхнє місцезнаходження, розміри, форму, правовий статус і власників. Це правовий інструмент, який використовується урядами для регулювання прав власності та управління земельними ресурсами. Будь-які зміни у землекористуванні повинні бути відображені в кадастрових реєстрах, щоб гарантувати юридичну силу таких змін і їхнє визнання на державному рівні. Це може включати, наприклад, зміну призначення земельної ділянки, її поділ або об'єднання, передачу права власності або оренди, а також зміни у площі чи кордонах ділянок.

Зміни у землекористуванні можуть також бути спричинені екологічними факторами, такими як ерозія ґрунту, повені, пожежі або інші природні катастрофи. Ці фактори можуть не лише змінювати фізичну структуру землі, але й впливати на її придатність для різних видів землекористування. Наприклад, після природної катастрофи земельна ділянка, яка раніше використовувалася для сільського господарства, може стати непридатною для цієї мети та вимагатиме змін у способі її використання. У таких випадках кадастровий реєстр має бути оновлений, щоб відобразити нові умови використання та забезпечити юридичну та економічну коректність подальших дій.

Технології дистанційного зондування Землі відіграють важливу роль у виявленні таких змін. Супутникові знімки та аерозйомка дозволяють досліджувати великі території в режимі реального часу, що дає змогу своєчасно виявляти зміни в землекористуванні. Такі технології можуть виявляти як масштабні зміни, такі як будівництво нових доріг або промислових зон, так і менші зміни, такі як незаконне розширення сільськогосподарських угідь або поява нових будівель на землях, що мають інше призначення. Оскільки ці зміни можуть мати правові та фінансові наслідки, їхнє вчасне відображення в кадастрових реєстрах стає критично важливим для забезпечення правомірного використання земельних ресурсів.

Геоінформаційні системи також сприяють інтеграції даних про землекористування, що отримані з різних джерел, включно з супутниковими знімками, георадарними дослідженнями та іншими технологіями. ГІС дозволяють створювати інтерактивні карти, на яких можна відстежувати зміни в землекористуванні, аналізувати історичні дані про територію та візуалізувати динаміку змін. Це значно полегшує процес управління земельними ресурсами, оскільки на основі таких даних можна робити прогнозування майбутніх змін та ухвалювати рішення щодо оптимального використання землі.

Виявлення змін у землекористуванні є важливим не тільки для державних органів і власників земель, але й для приватних інвесторів, будівельних компаній, екологічних організацій та громадянського суспільства. Для

приватних інвесторів своєчасна і точна інформація про зміни в землекористуванні може бути вирішальним чинником при ухваленні інвестиційних рішень. Будівельні компанії використовують ці дані для планування своїх проектів, оскільки зміни у статусі землі можуть впливати на можливості забудови. Екологічні організації можуть використовувати інформацію про зміни у землекористуванні для моніторингу впливу людської діяльності на природні екосистеми і пропонувати відповідні заходи для їхнього захисту.

На додаток до державних інструментів моніторингу змін у землекористуванні, важливу роль відіграють громадські організації та місцеві ініціативи, які мають можливість залучати сучасні технології для самостійного відстеження змін на локальному рівні. У багатьох країнах розробляються ініціативи, що спрямовані на підвищення прозорості у сфері землекористування, створення відкритих кадастрових реєстрів та використання даних ДЗЗ для громадського моніторингу.

Такі зміни у землекористуванні, як розширення сільськогосподарських земель, впровадження нових технологій у веденні господарства або навіть зміна форм власності, часто впливають на соціально-економічні аспекти життя населення. Наприклад, зміни у землекористуванні можуть впливати на місцеву економіку, призводити до зменшення або збільшення робочих місць, зміни рівня доходів населення та навіть впливати на демографічні процеси. Тому кадастрові реєстри повинні бути не лише правовим інструментом для регулювання прав власності, а й важливим джерелом інформації для соціально-економічного аналізу [292].

Зміни у землекористуванні, які відображаються в кадастрових реєстрах, також мають значний вплив на податкову політику держави. Земельний податок і збори з користування земельними ресурсами залежать від типу землекористування та площі земельної ділянки. Якщо зміни в землекористуванні не будуть вчасно відображені в кадастрі, це може призвести до неточностей у розрахунку податків, що, у свою чергу, вплине на надходження до державного

бюджету. Уряди намагаються забезпечити максимально точний облік земельних ресурсів і використовувати сучасні технології для оновлення даних, щоб уникнути таких проблем.

Також важливо відзначити, що кадастрові реєстри є основою для вирішення земельних спорів. Зміни у землекористуванні можуть стати причиною конфліктів між сусідами, державою і приватними власниками або між різними громадами. Точні дані про права власності та межі земельних ділянок, відображені в кадастрових реєстрах, є вирішальними для правомірного вирішення таких суперечок. У випадку зміни призначення земельної ділянки або її правового статусу, інформація про це має бути офіційно зафіксована, щоб уникнути подальших конфліктів і зберегти правовий порядок.

3.2. Визначення вертикальних зміщень ділянок поверхні методом супутникової радіолокаційної інтерферометрії (побудова карти вертикальних зміщень)

Точність вертикальних зміщень, виміряних за допомогою InSAR (інтерферометрія зі синтезованою апертурою радіолокації), залежить від кількох чинників. Чим менша довжина хвилі, тим вища точність вимірювання. Для InSAR використовуються радіовипромінювання у міліметровому або сантиметровому діапазоні, що дозволяє отримувати високу точність вимірювань вертикальних зміщень. Чим більша базова лінія між супутниками, тим більша точність вимірювань. Базова лінія - це відстань між положеннями супутників в різні моменти часу, коли вони реєструють радіосигнали. Помилки в моделях топографії можуть впливати на точність вимірювань. Точне врахування рельєфу поверхні Землі допомагає уникнути цих помилок. Шум, спричинений змінами у рельєфі, атмосферних умовах та інших чинниках, може впливати на точність вимірювань. Його потрібно враховувати і коригувати для досягнення максимальної точності. Чим більше пікселів зображення, які можуть бути

скорельовані для отримання високоякісних інтерферограм, тим вища точність вимірювань [86].

Для визначення вертикальних зміщень з міліметровою точністю важливо виконати точне калібрування обладнання, а також застосовувати складні алгоритми опрацювання даних, які враховують усі чинники, що впливають на точність вимірювань. Такі алгоритми можуть використовувати інформацію з різних джерел, включаючи високоточні моделі топографії, метеодані, дані про атмосферні умови тощо [158].

В таблиці 3.2 подані основні характеристики найрозповсюдженіших космічних радіолокаційних систем, окремо виділена система Sentinel-1, безкоштовні дані якої застосовано в наших дослідженнях.

Таблиця 3.2.

**Основні характеристики найрозповсюджених космічних
радіолокаційних систем**

Назва космічного апарата	Просторове розрізнення, м	Ширина смуги знімання, км	Спектральний діапазон	Поляризація (параметри змінюються залежно від режиму знімання)
RadarSat-1	8-100	50-500	C	HH
RadarSat-2	1,6-160	1,6-160	L	Одна, дві або чотири
TerraSar-X	<1-40	4-270	X	Одна або дві
TanDem-X				
Alos-2	1-100	25-350	L	Одна, дві або чотири
Sentinel 1A, B	5-40	20-400	C	Одна або дві
Kompsat-5	1-20	5-100	C	Одна на вибір
COSMO-SkyMed-1-4	1-100	10-200	X	Одна або дві
ASNARO-2	<1-16	10-50	X	Одна на вибір

Як видно із таблиці 3.2, Sentinel-1 є системою середньої просторової розрізненості, наша мета була опрацювати синергію методик власне із застосуванням безкоштовних радіолокаційних даних, розрізнення яких за своїми характеристиками не задовольняють виконання даних досліджень, якби вони

виконувались лише цим методом, підкреслюючи важливість поєднання різних методів, переходячи від одних точніших характеристик до інших.

Дослідження ансамблю оборонних споруд Цитадель методом радіолокаційної інтерферометрії

Основою інтерферометричного опрацювання є різниця фаз відбитих сигналів, результатом якої є отримання перевищення одного відбитого елемента поверхні щодо іншого. Методика визначення осідань (підняття) земної поверхні та споруд ґрунтується на визначенні інтерферограм із 36 серій знімків методом SBAS.

Враховуючи, що територія досліджуваного об'єкта є забудованою та вкрита рослинністю, опрацювання даного методу було проведено в програмному забезпеченні ENVI SARscape.

Вхідними даними виступали 36 архівів радіолокаційних знімків, отриманих з безкоштовного геопорталу даних Sentinel – Copernicus. Знімки були отримані з періодичністю в один місяць (переважно 20-х чисел) з січня 2020 року по грудень 2022 року включно (додаток В) з просторовим розрізненням 5x20м.

Першим кроком досліджень є побудова інтерферограм за 36 знімками та визначення екстремумів вертикальних зміщень на території Львівської цитаделі за трирічний період.

Наступним етапом необхідно проаналізувати отримані дані в поєднанні з сучасною містобудівною ситуацією та іншими результатами досліджень.

Останнім кроком є аналіз відібраних точок найбільших вертикальних зміщень та формулювання висновків і рекомендацій.

За допомогою даної методики була можливість дослідити територію історичного місця – Ансамблю оборонних споруд Львівська цитадель на предмет осідання земної поверхні, для визначення можливих підземних ходів та інших історичних ділянок, про наявність яких достеменно відомо. Враховуючи історичні події, що відбувались на даній території, можливі й інші причини просідання землі.

Ансамбль оборонних споруд Цитадель – місце концентраційного табору «Шталаг-328» було внесено до переліку об'єктів культурної спадщини Львівської області, що заносяться до Державного реєстру нерухомих пам'яток України за категорією національного значення, під видом об'єкта – пам'ятка історії, архітектури та містобудування, наказом Міністерства культури України №957/0/16-10 від 25.10.2010 року. При чому, межі об'єкта історико-культурної спадщини визначено такими, якими вони були описані на післявоєнному плані НКВС, коли радянська влада визначала масштаби злочинів нацистів на території створеного ними концентраційного табору військовополонених. Але з історичних літературних джерел, письмових свідчень очевидців і часткового натурного обстеження території, достеменно відомо, що під територією оборонних споруд Цитадель ще за австрійських часів прокладені підземні ходи, що сполучали чотири максиміліанські вежі інфраструктурних об'єктів з будівлею казарми, і можливо сполучалися з сіткою інших підземних ходів, що існують під Львовом. Місце відоме як Цитадель, знаходиться майже в центрі Львова. Ці оборонні укріплення, споруджені в середині XIX століття, складаються з чотирьох великих веж-бастіонів та земляних кріпосних валів, і були збудовані на природному пагорбі, що височить над містом. До цього часу збереглося багато оригінальних споруд цього укріплення, але є також і новобудови, які використовуються як офіси, складські приміщення, причому один з більших бастіонів перебудований під готель. Між 1941 та 1944 р. нацисти перетворили цю фортецю на табір військовополонених (Шталаг-328), в якому знаходилися, головним чином, радянські військовополонені. Зі свідчень відомо, що величезна кількість їх (близько 140.000 тисяч) загинула в полоні від хвороб, голоду та розстрілів [35]. На рис.3.1 подано німецький аерознімок території об'єкта 1944 року.



Рис.3.1. Територія концентраційного табору Stalag-328 на німецькому аерознімку 1944 року

З появою нових прогресивних методів досліджень, можуть змінитися уявлення про межі площинних нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини, а відтак і земель історико-культурного призначення.

Із обстеження території точно відомо, що один підземний хід закінчується посередині північного схилу об'єкту, де є замуrowаний вихід (рис.3.2). Також відомо, про частину підземного ходу біля південної правої максиміліанської вежі, що довго існував у вигляді провалля, доки не був засипаний міською владою, щоб уникнути нещасних випадків завалів або задухи дітей, що можуть залізти в підземний хід із цікавості.



Рис.3.2. Один з виходів з підземного ходу під Цитаделлю, що знаходиться на північному схилі

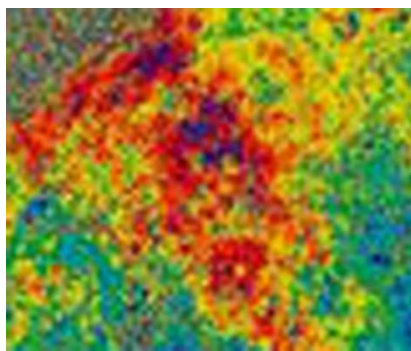
На даний час, окрім зруйнованої південної правої максиміліанської вежі, до решти веж немає вільного доступу для натурних досліджень та і наврядче входи в підземелля ще залишились до наших часів, скоріш за все вони були замуровані за радянських часів. Ліва верхня максиміліанська вежа огорожена і використовується на даний час як сховище львівської наукової бібліотеки Стефаника, права верхня вежа, що за часів концентраційного табору названа «вежа смерті», через туртури, що в ній проводились і випробування бактеріальної зброї, на даний час слугує територією п'ятизіркового готелю CitadelIn, ліва південна вежа за часів незалежної України була відреставрована і використовується як складське приміщення. Всі три вежі, окрім зруйнованої, на даний час є в оренді і під охороною, без доступу до підвальних приміщень.

Супутникові радіолокаційні зображення опрацьовані і за допомогою програмного забезпечення ENVI SARscape. Ці зображення були отримані в С-діапазоні з поляризацією VV+VH та в інтерферометричному режимі широкого діапазону (IW). У цьому випадку смуга кожного зображення становить 250 км.

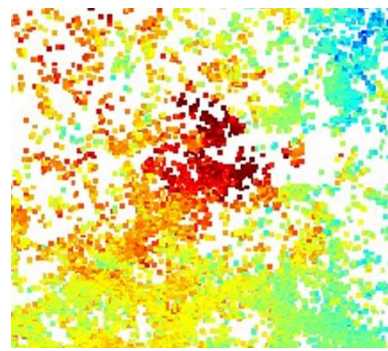
Зображення Sentinel-1A доступні в трьох рівнях опрацювання: Рівень-0, Рівень-1, Рівень-2. Наші вхідні дані знаходяться на першому рівні опрацювання. Дані рівня 1 є загальнодоступними продуктами, розробленими для більшості користувачів даних. Продукти рівня 1 виробляються як Single Look Complex (SLC) і Ground Range Detected (GRD). Зображення отримано з геопросторового порталу Copernicus.

Для методу SBAS цикл інтерферометричного опрацювання в ENVI SARscape виконується для кожної пари зображень в інтерферометричному ряду. Пари зображень автоматично вибираються із завантаженої серії зображень. Першим етапом інтерферометричного опрацювання є точне просторове вирівнювання (корекція) ведучого та підлеглого радіолокаційних зображень в інтерферометричному ряду, яке виконується в модулі SARscape в автоматичному режимі. На цьому етапі досягається точність співреєстрації до одного або кількох пікселів, на другому етапі - субпіксельна точність співреєстрації, а на третьому етапі - точність до 1/100 пікселя. На наступному

етапі розраховуються комплексні інтерферограми, які є результатом складного поелементного множення фази пар радіолокаційних зображень в інтерферометричному ряду. Комплексна інтерферограма містить кілька компонентів: топографічна фаза, фаза деформації, атмосферна фаза, електромагнітний шум. Для кожної пари зображень інтерферометричного ряду необхідне комплексне поелементне множення фаз. Основним вихідним файлом цієї процедури є диференціальна інтерферограма, яка є результатом віднімання синтезованої фази рельєфу з комплексної інтерферограми. Диференціальна інтерферограма містить компонент деформації поверхні, яка виникла між знімками, компонент фазового шуму та компонент впливу атмосферних умов під час кожного отримання зображення у вибраній серії [285]. Для зменшення шуму використовували адаптивну фільтрацію диференціальної інтерферограми за допомогою фільтра Гольдштейна для кожної пари зображень (рис. 3.3а). Після чого була розріджена хмара точок вертикальних зміщень, для виокремлення тільки тих даних, що нас можуть цікавити (рис.3.3б)



а) Відфільтрована диференціальна інтерферограма території Цитаделі за допомогою фільтра Гольдштейна



б) Відфільтрований діапазон хмари точок вертикальних зміщень території Цитаделі від 8 до 36 см

Рис.3.3. Опрацювання радіолокаційних знімків

Після фільтрації фазового шуму (алгоритм Гольштейн) можна спостерігати зменшення розміру шумових областей і збільшення радіуса кореляції шуму. Щоб отримати безперервну фазу, тобто усунути стрибки фази на 2π , необхідно виконати процедуру розгортання фази для кожної пари зображень. Існує близько

дюжини алгоритмів для виконання операції розгортання фази, кожен зі своїми перевагами та недоліками. У дисертаційній роботі розгортання фази було виконано за допомогою методу мінімальних витрат із триангуляцією Делоне. У цьому методі градієнт незагорнутої фази відновлюється шляхом зміни цілого числа фазових періодів окремих пікселів. Для відокремлення значущих значень фази від незначущих в якості допоміжного параметра використовувалася когерентність фази (фазова кореляція). Вона вимірюється в безрозмірних величинах від 0 до 1 і обчислюється за допомогою фільтрованої диференціальної інтерферограми. Далі виконувалася так звана інверсія, яка відновлює часову динаміку зміщень із крос-часових пар зображень. Після цього результати були геокодовані та конвертовані у векторний формат.

Після отримання інтерферограм нами було визначено екстремуми вертикальних зміщень, тобто точки в яких просідання земного покриву є найбільшим і найменшим. Оскільки нас цікавило лише дослідження просідання поверхні в результаті виявлення порожнин, точки з мінімальними вертикальними зміщеннями ми відбракували відразу. Точок максимальних зміщень земного покриву виявилось 24. Діапазон вертикальних зміщень землі на цих точках коливається від 17 до 36 сантиметрів. Так як, візуальна складова для даної території на знімках із супутника Sentinel-1 є нечитабельною через низьку просторову розрізненість даних даної системи, ми вирішили для подальшого аналізу експортувати ці точки в ГІС MapInfo. Для цього нами було прив'язано в програмному забезпеченні сучасний космічний знімок, отриманий у 2021 році із супутника GeoEye-1 та сучасний топографічний план території в масштабі 1:2000 (рис.3.4), на якому нанесені межі занесені до реєстру пам'яток межі Львівської цитаделі. При нанесенні точок екстремумів вертикальних зміщень на космічний знімок, отримано їх точне місцезонашування для подальшого аналізу (рис.3.5).

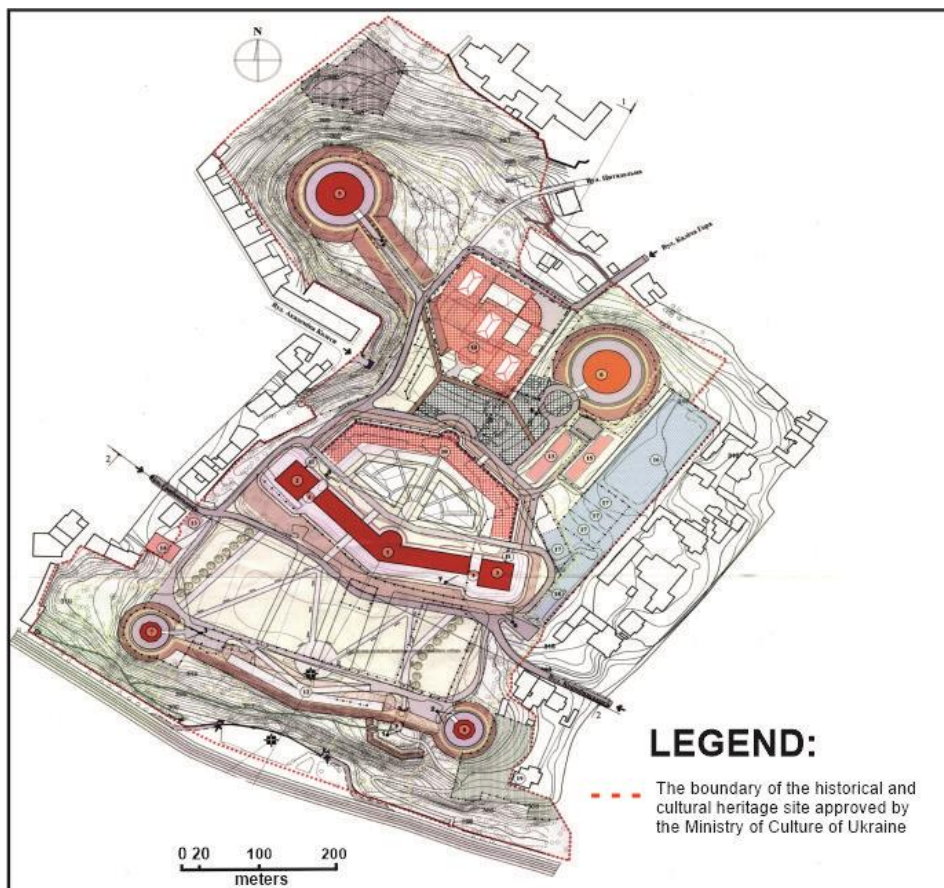


Рис.3.4. План території Львівської цитаделі з позначеною межею об'єкта історико-культурної спадщини (потовщена чорна лінія)



Рис.3.5. Космічний знімок, отриманий з супутника GeoEye-1 у 2021 році з нанесеними точками найбільших вертикальних зміщень

Як зазначалося раніше, опрацювання радіолокаційних знімків космічного корабля Sentinel-1 проводилася за допомогою програмного забезпечення SARscape методом SBAS. Оцінюючи характеристики території об'єкта дослідження та його відносно невелику площу в масштабі космічних знімків, для найбільш точної фільтрації шуму та малозначущих об'єктів було обрано поріг когерентності -22 дБ. Діапазон порогів когерентності для методу SBAS також може змінюватися від кількох децибел до значних значень, залежно від конкретного дослідження та характеру даних [282]. Як правило, типовий діапазон порогів когерентності для SBAS може бути від -20 до -30 децибел або навіть менше. Коригування порогу когерентності було виконано методом підбору для забезпечення найкращих результатів.

Для методу SBAS важливим етапом є вибір базових пар. Для вимірювання деформацій уздовж двох напрямків, північ-південь і захід-схід, були обрані перпендикулярні базові лінії. Це дозволило вимірювати деформації в обох горизонтальних напрямках. Пари часових базових ліній вибрано між парами радіолокаційних зображень станом на січень 2020 року та грудень 2020 року та січень 2021 року та грудень 2021 року, щоб охопити бажаний період часу. Це дозволило розглянути динаміку деформацій земної поверхні протягом обраного інтервалу часу, яка становила від $-0,7$ до -10 см/рік за обраний період часу.

Наголосимо, що дослідження проводилися протягом трирічного періоду, де були зафіксовані сантиметрові осідання, але не гарантовано, що їхні середні показники були такими ж у попередні роки, швидше за все, не були, оскільки візуально територія об'єкту в основному залишилася незмінною протягом останнього десятиліття.

У методі SBAS для опрацювання радіолокаційних зображень супутника Sentinel-1 можуть використовуватися як низхідна, так і висхідна геометрії. У разі спадаючої геометрії для отримання обох зображень, які використовуються в парах для інтерферометричного аналізу, використовується один і той же радарний супутник. Перевагою такої геометрії є те, що зображення, отримані з одного радіолокаційного супутника, мають мінімальні відмінності в геометрії,

що може покращити якість інтерферограм і скоротити час опрацювання, а недоліком є обмежена доступність даних, оскільки вона залежить від проходження супутника і хмарність. У нашому випадку була використана ця геометрія, тому що всі зображення були зроблені з супутника Sentinel-1 з інтервалом у місяць [209, 177].

Якщо говорити про висхідну геометрію, то в цьому випадку для створення пар зображень використовуються зображення, отримані різними радіолокаційними супутниками (наприклад, двома супутниками Sentinel-1). До його переваг можна віднести збільшення обсягу доступних даних, оскільки можна використовувати зображення, отримані різними супутниками та в різний час, а до недоліків — можливість появи відмінностей у геометрії зображення, що може вплинути на якість інтерферограм і вимагати додаткових обчислень для корекції.

Для отримання вертикальних зміщень зазвичай використовуються оцінки прямої видимості (LOS), отримані з радіолокаційних зображень. Перетворення оцінок LOS у вертикальні зміщення зазвичай вимагає додаткових даних про топографію та моделі просторового розподілу варіацій швидкості [193]. Ці дані використовуються для виправлення геометричних артефактів і врахування ефектів горизонтального та вертикального руху землі. Точність оцінки вертикальних зміщень склала 0,6 см, оскільки рельєф об'єкта горбистий і точно визначити вертикальні зміщення складніше.

Під час існування на території Львівської цитаделі концентраційного табору військовополонених Stalag-328, за часів Другої світової війни, проводились масові розстріли і спалення тіл полонених нацистами. Про ці факти достеменно відомо з історичних джерел і архівів.

Зважаючи на ці факти, значне просідання земної поверхні могло бути і в тих місцях, де власне відбувались ці воєнні злочини. Для аналізу подібних випадків використано попередні роботи дисертанта [114, 63], де на основі інтерпретації даних архівного аерознімка 1944 року було визначено можливі місця братських поховань на території Цитаделі. Топографічний план з нанесеними місцями

можливих поховань так само прив'язано до решти матеріалів. На цей план нанесено точки максимальних зміщень для їх аналізу (рис.3.6).

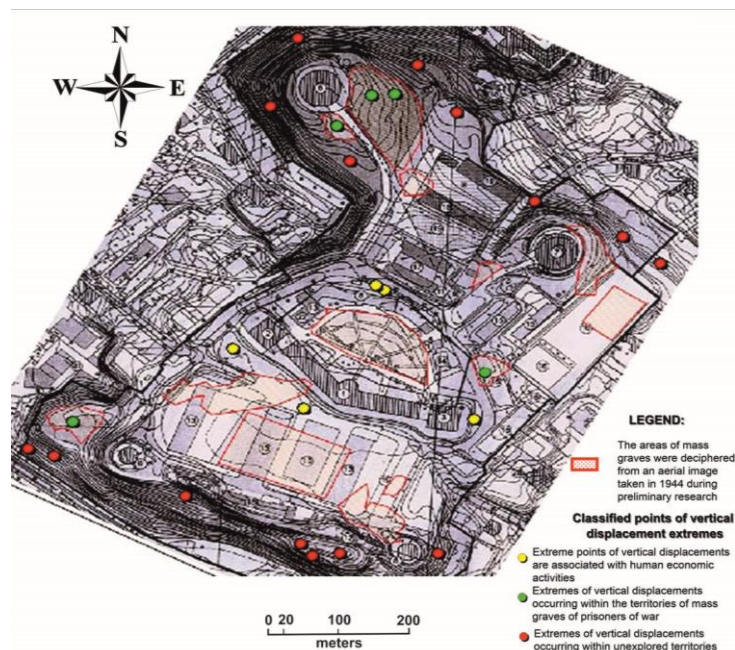


Рис.3.6. Топографічний план з позначеними полігональними об'єктами можливих братських поховань (рожеве тло оконтурено червоними лініями) з нанесеними точками найбільших вертикальних зміщень

Як видно з рис.3.6, чотири точки потрапляють власне в місця можливих братських могил, тому можна припустити, що значні показники вертикальних зміщень землі викликані досі просідаючими ґрунтами. До речі на даних ділянках показники просідання коливались в межах 17-19 сантиметрів, що є найменшими значеннями з усіх точок. Ці точки позначені на рисунку зеленим кольором.

Також частина точок, просідання в яких становило 18-22 сантиметрів потрапляє на забудовану територію в середині об'єкта. На цій території покладено асфальт і плитку та побудовані офісні приміщення. Часто ведуться роботи з облаштування даної території або певні ремонтні роботи, тому ці точки ми теж відбракували, бо скоріш за все такі їх показники пов'язані саме з цим. Ці точки позначені на рисунку жовтим кольором. Їх кількість становила 5 точок.

Залишились 15 точок навколо максиміліанських веж на незабудованій території, де фактично залишився ґрунт з часі Другої світової війни без

додаткового людського втручання. В цих точках зміщення були найбільші від 20 до 36 сантиметрів.

Ці точки на рис.3.6 позначені червоним кольором і можна припустити, аналізуючи їх розміщення, що саме ці точки можуть належати поверхні підземних ходів, що з часом просідають.

З'єднавши всі ці точки між собою, отримано можливу мережу підземних ходів, що з'єднує між собою максиміліанські вежі та виходить за межі ансамблю оборонних споруд. З'єднані між собою точки максимальних вертикальних зміщень подані на рис.3.7 червоними лініями. Ці точки можна з'єднати і навхрест, щоб вони проходили через будівлю казарми, з якою, на наш погляд, максиміліанські вежі мали б з'єднуватись, але оскільки в районі забудованої території важко судити про характер вертикальних зміщень дані дослідження нами не здійснювались.

Як видно з рисунка 3.7, червоні лінії, які можливо повторюють приблизні профілі підземних сполучень між об'єктами інфраструктури ансамблю оборонних споруд, в чотирьох місцях виходять за встановлені межі об'єкта історико-культурної спадщини. Згідно із отриманих результатів ці межі мають бути уточнені, відповідно до чого зміниться і буфер охоронної зони об'єкту, а відтак і територія, яка потрапляє під визначення земель історико-культурного призначення.

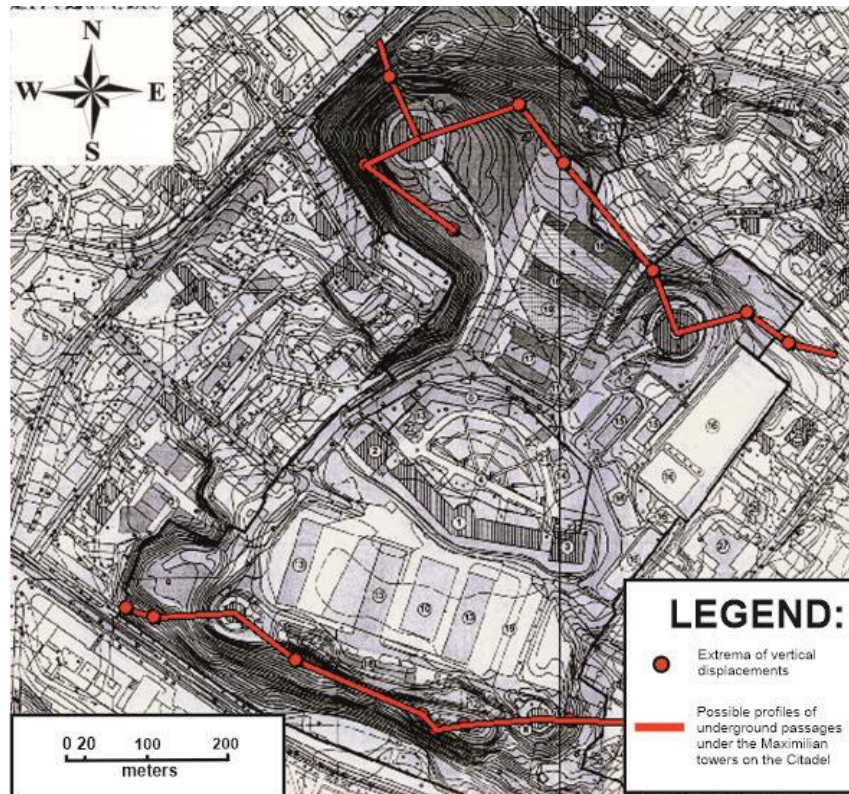


Рис.3.7. Топографічний план з нанесеними можливими профілями підземних ходів між максиміліанськими вежами на Цитаделі, що виходять за встановлені межі об'єкта історико-культурної спадщини

На рис.3.8 подано графік розподілу точок максимальних вертикальних зміщень.



Рис.3.8. Графік розподілу точок максимальних вертикальних зміщень

Аналіз вертикальних зміщень може виявити потенційні загрози для історичних споруд, такі як опади, ерозія, ґрунтові ополонки або геодинамічні процеси. Це дозволяє вжити відповідних заходів для запобігання можливим пошкодженням або руйнуванням. Інформація про вертикальні зміщення може бути використана для планування реставраційних робіт та збереження історичних споруд. Це дозволяє здійснювати ефективні заходи з реставрації, які враховують потенційні впливи геодинамічних процесів [219]. Карти вертикальних зміщень служать як документація стану історичних об'єктів на певний часовий період. Це важливо для архівування та моніторингу змін у часі, а також для подальшого наукового дослідження. На рис.3.9 подано карту максимальних вертикальних зміщень земного покриву на території Цитаделі за 2020-2022 роки.

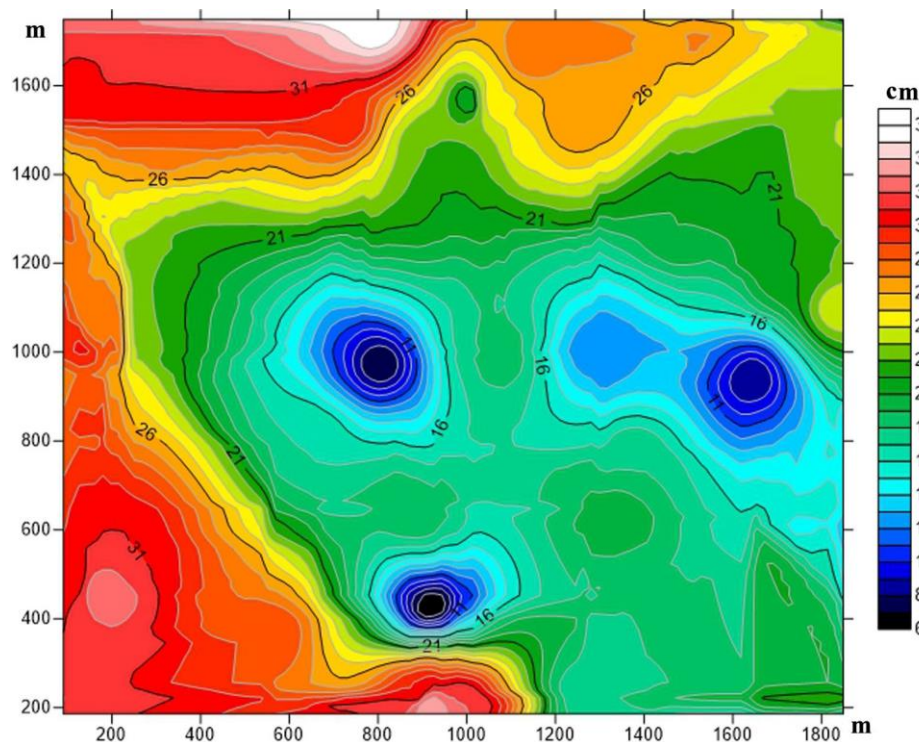


Рис.3.9. Карта вертикальних зміщень, см

Як видно з рисунка, найбільші вертикальні зміщення спостерігаються на незабудованій залісненій території схилів.

В таблиці 3.3 подано величини зміщення внаслідок виконання радіолокаційної інтерферометрії методом SBAS за космічними знімками з супутника Sentinel-1 для 24 отриманих точок.

Таблиця 3.3.

Таблиця величин вертикальних зміщень на точках екстремумів

№ точки	Широта	Довгота	Зміщення в LOS (см)	Середнє річне зміщення (см/рік)	Коефіцієнт кореляції	Кількість інтерферограм
1	49.833365°	24.024715°	-17.0	-4.8	0.73	35
2	49.835879°	24.022959°	-23.0	-4.7	0.81	35
3	49.835130°	24.022945°	-22.0	-2.2	0.81	35
4	49.835377°	24.024195°	-24.0	-5.4	0.82	35
5	49.834674°	24.024187°	-23.0	-5.8	0.83	35
6	49.834036°	24.027758°	-18.0	-0,7	0.62	35
7	49.832482°	24.026120°	-18.0	-3.8	0.79	35
8	49.835252°	24.024650°	-30.0	-9.9	0.78	35
9	49.835007°	24.023689°	-21.0	-6.8	0.67	35
10	49.835600°	24.025120°	-26.0	-5.3	0.76	35
11	49.833854°	24.028184°	-19.0	-4.2	0.69	35
12	49.830830°	24.023836°	-33.0	-4.4	0.74	35
13	49.835153°	24.025436°	-20.0	-4.7	0.85	35
14	49.831226°	24.021925°	-28.0	-6.6	0.66	35
15	49.834255°	24.026540°	-18.0	-2.9	0.71	35
16	49.830962°	24.023540°	-27.0	-7.8	0.70	35
17	49.832674°	24.022561°	-21.0	-2.3	0.75	35
18	49.831781°	24.020659°	-36.0	-4.9	0.68	35
19	49.830706°	24.025198°	-22.0	-10.0	0.77	35
20	49.831470°	24.020383°	-35.0	-7.4	0.72	35
21	49.831288°	24.020705°	-31.0	-5.9	0.64	35
22	49.832064°	24.023746°	-22.0	-8.2	0.64	35
23	49.833428°	24.024418°	-19.0	-5.8	0.63	35
24	49.831956°	24.025920°	-25.0	-5.3	0.80	35

В таблиці 3.3 подано географічні широта і довгота точок в долях градуса, зміщення в LOS (мм) - величина зміщення в напрямку лінії знімання (Line-Of-Sight) супутника, в міліметрах, середнє річне зміщення (мм/рік) - середня швидкість зміщення за рік, в міліметрах, накопичене зміщення (мм) - загальна величина зміщення з початку спостережень до поточного моменту, в міліметрах, коефіцієнт кореляції - показник якості даних, що відображає кореляцію між знімками, кількість інтерферограм - кількість інтерферограм, що були використані для розрахунків.

Ця таблиця надає детальну інформацію про вертикальні зміщення для кожної точки спостереження, що дозволяє аналізувати динаміку змін та оцінювати точність і надійність отриманих даних.

Для оцінки точності і надійності даних одним з найважливіших елементів є коефіцієнт кореляції. Коефіцієнт кореляції між радіолокаційними знімками — це міра, яка використовується для оцінки ступеня подібності між двома радіолокаційними зображеннями (інтерферограмами). Він є важливим показником якості даних, оскільки висока кореляція свідчить про те, що зображення добре узгоджуються одне з одним, що, в свою чергу, забезпечує точніші результати аналізу зміщень.

Коефіцієнт кореляції варіюється від 0 до 1, де 1 вказує на ідеальну кореляцію, а 0 означає повну відсутність кореляції. Значення ближчі до 1 свідчать про високу якість даних і більшу точність вимірювань зміщення. В радіолокаційній інтерферометрії, високий коефіцієнт кореляції між інтерферограмами вказує на те, що відбиття сигналів від поверхні є стабільним, і відмінності між знімками переважно пов'язані зі зміщеннями, а не шумом або іншими чинниками. Також, коефіцієнт кореляції використовується для відсіву інтерферограм з низькою якістю перед подальшим опрацюванням даних. Чим менший інтервал між знімками, тим вища ймовірність високої кореляції, оскільки зміни на поверхні менш значні. Різні кути огляду і зміни орбіти супутника можуть впливати на кореляцію. Зміни в рослинному покриві, зволоженні ґрунту, наявність снігу або води на поверхні також можуть вплинути на кореляцію.

З літературних джерел відомо, що для двох зображень A і B коефіцієнт кореляції ρ може бути розрахований за допомогою формули:

$$\rho = \frac{\sum(A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum(A_i - \bar{A})^2 \sum(B_i - \bar{B})^2}}, \quad (3.1)$$

де:

A_i і B_i – значення пікселів в зображеннях A і B ,

\bar{A} і \bar{B} – середні значення пікселів зображень A і B .

Дослідження Звенигородського городища методом радіолокаційної інтерферометрії

Звенигородське городище є одним з найвідоміших історичних об'єктів на території України, розташоване біля міста Львова. Це поселення має давню історію, яка починається ще у ранньому середньовіччі. Перші згадки про Звенигородське городище знаходяться в історичних документах XI століття. Його вважають одним із давніх укріплених поселень, яке виникло на цій території. Городище оточене валами та ровами, що свідчить про його оборонну функцію. У середньовіччі Звенигородське городище було важливим центром на заході України. Воно входило до складу князівства Галича-Волині та було важливим пунктом на торгових шляхах, що сполучали Центральну та Східну Європу. У XIII-XIV століттях городище перебувало під владою Галицько-Волинського князівства, а згодом — Литовського великого князівства. Протягом історії Звенигородське городище декілька разів зазнавало атак і руйнувань, але завдяки своєму стратегічному положенню на межі різних князівств і держав, воно продовжувало відігравати важливу роль у регіоні. У XV столітті, після приєднання Галичини до Королівства Польського, городище втратило свою важливість і поступово занепало [38]. Проте воно залишилося об'єктом історичного і культурного значення. Сьогодні Звенигородське городище є пам'яткою археології та туризму. Воно привертає велику увагу вчених, археологів, істориків і туристів, які цікавляться давньою історією України та археологічними розкопками. Вивчення городища дає можливість краще

зрозуміти життя і обрядовість давніх мешканців цього регіону. На рис. 3.10 подано карту Звенигородського городища 1766 року.

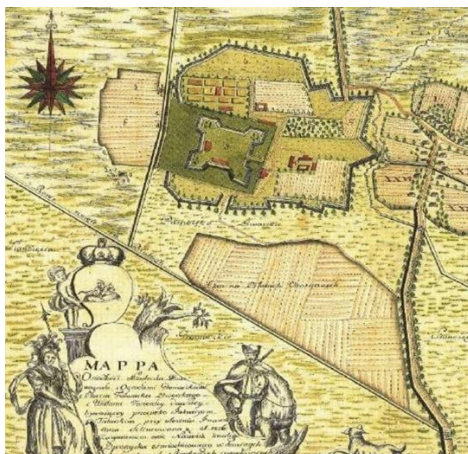


Рис.3.10. Карта Звенигородського городища 1766 року

Замок у Звенигороді добре подано на карті фон Міга кінця 18 століття – у цитаделі позначено три прямокутних споруди, на сході була брама, багато споруд були на території Нижнього замку (рис.3.11).



Рис.3.11. Фрагмент карти фон Міга 18 ст.

На рис.3.12 представлено сучасний вигляд залишків Звенигородського замку.



Рис.3.12. Сучасний вигляд залишків Звенигородського замку

Дослідження Звенигородського городища розпочалися у другій половині XIX ст, але найбільш масштабні роботи проводили у 1953 по 1994 рік. Тоді розкопки були заплановані в усіх структурних частинах міста. Завдяки цьому дослідники достеменно знають якою була основна забудова цієї ділянки [37]. На рис.3.13 подано реконструйовану Львівською обласною державною адміністрацією (ЛОДА) 3D-модель запланованого історико-культурного парку «Древній Звенигород»



Рис.3.13. Ескізи майбутнього історико-культурного парку «Древній Звенигород»

Найбільші археологічні відкриття відбулися у 1981 році, коли на північній околиці пригорода знайшли релікти дерев'яної забудови. Вона є цікава тим, що там відкрили рештки дуже щільної забудови у вигляді дороги, мощеної деревом, це була центральна магістральна лінія столиці. Обабіч дороги були оточені парканами двори. В межах дворів - зрубні будинки, які збереглися на висоту до 2-3 зрубів. Це були житлові будинки, часто двоповерхові з підсінням, були й господарські споруди. Також, у межах кожної із садиб було багато ремісничих будівель. На рис.3.14 подано фрагмент топографічного плану масштабу 1:1000, на який нанесені результати археологічних розкопок за різні роки.

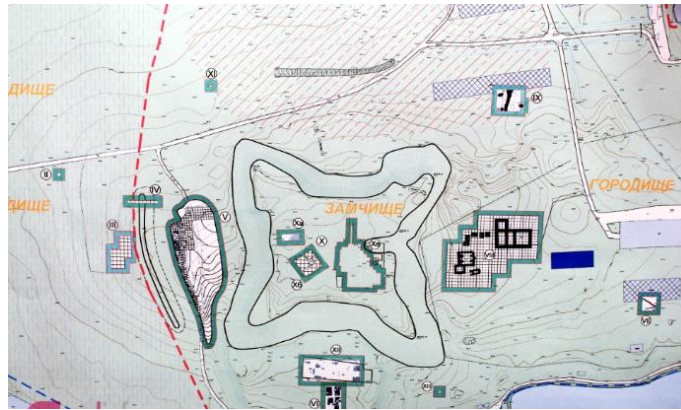


Рис.3.14. Фрагмент плану визначення меж території Національного історико-культурного заповідника «Древній Звенигород». Масштаб 1:1000 (зменшений)

В результаті накладання векторних шарів з об'єктами інфраструктури Звенигородського городища станом на 18 століття з різних карт, можна побачити неспівпадіння в інфраструктурі, а саме в кількості і розташуванні будівель, хоча ці карти створено приблизно в один і той самий період. Деякі будівлі потрапляють в одне і те ж місце та відрізняються за розміром. Це може бути пов'язано з різним ступенем генералізації картографічних продуктів, або, можливо, в одній з карт були певні неточності щодо розташування будівель. Але в будь-якому разі не можна відкидати жодної інформації при подальших дослідженнях, тому всі векторизовані об'єкти залишено без змін. Карта з нанесеними векторними шарами інфраструктури Звенигородського городища 18 століття подана на рис.3.15.

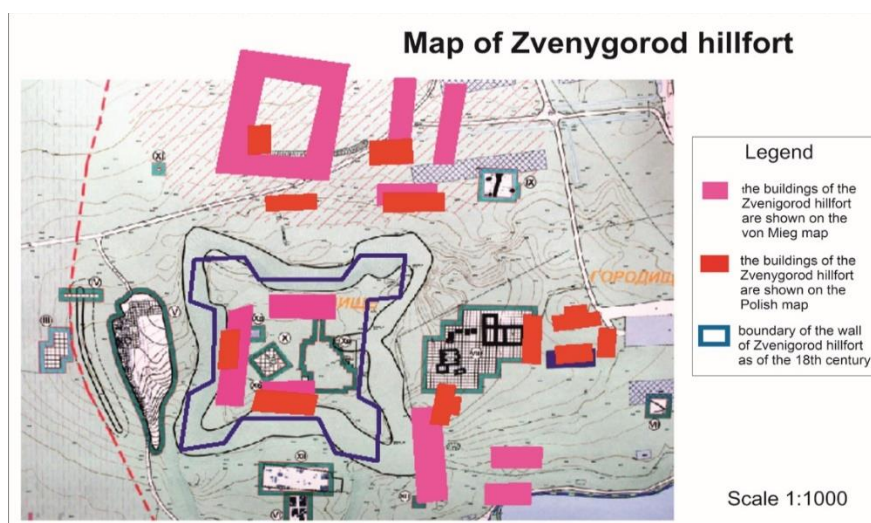


Рис.3.15. Карта території Звенигородського городища з нанесеними об'єктами інфраструктури 18 століття (зменшене зображення)

Аналізуючи накладання векторних шарів, попередньо можна виділити 6 об'єктів найвищого пріоритету для майбутніх досліджень вертикальних зміщень (тобто ті які або повністю, або частково накладаються за даними двох архівних карт 18 століття). Дві будівлі розташовані на території самого Звенигородського замку фундамент оборонних мурів якого зберігся, а решта 4 будівлі за його межами.

Для кращого аналізу пріоритетних місць подальших досліджень за даними горизонталей з топографічного плану масштабу 1:1000 побудовано ЦМР.

Побудова ЦМР за сучасним топографічним планом відбувалась за допомогою векторизації горизонталей у програмному пакеті Surfer. Враховуючи, що рельєф локальної ділянки городища є досить крутий, особливо в районі залишків Звенигородського замку, вирішено обрати метод Кригінга як найбільш оптимальний для побудови такого виду рельєфу.

Кригінг - це покращений геостатистичний метод, який дозволяє будувати передбачувану поверхню з набору точок з значеннями висот. На відміну від інших методів інтерполяції інструмент Kriging передбачає інтерактивне дослідження просторової поведінки явища, представленого значеннями висот, до вибору оптимального методу оцінки для побудови результуючої поверхні.

Основна формула інтерполяції методом Кригінга формується як зважена сума даних:

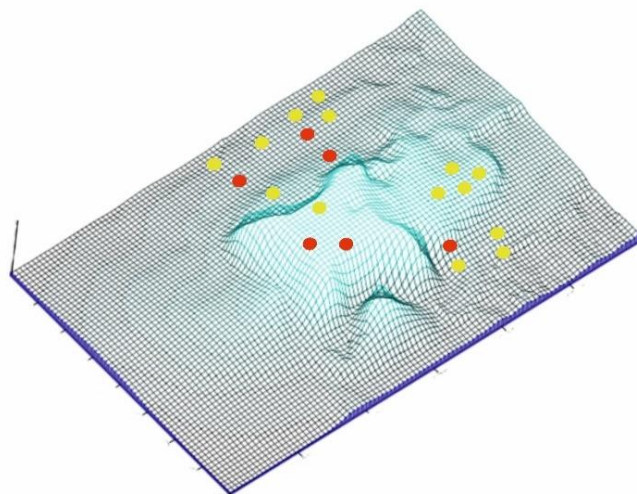
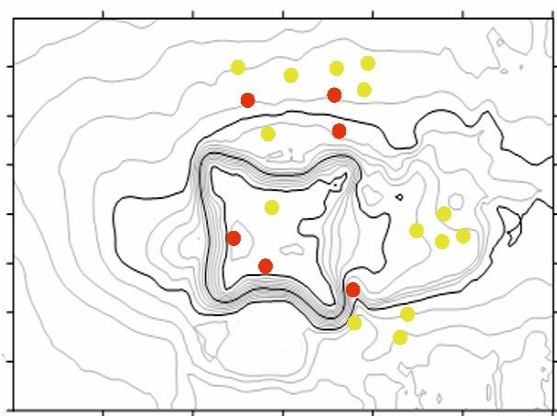
$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

де: $Z(s_i)$ - значення, що вимірюється в місцеположенні i ; λ_i - невідома вага для вимірюваного значення у місцеположенні i ; s_0 - розташування прогнозу; N - кількість вимірюваних значень.

Тут вага λ_i залежить тільки від відстані до розташування прогнозу. Однак при використанні методу Кригінгу, ваги застосовуються не тільки на відстані між точками, що вимірюються, і місцезнаходженнями прогнозів, але також на загальному просторовому розташуванні вимірюваних точок. Щоб використовувати просторове розташування у вагах, потрібно визначити

кількість просторової автокореляції. Таким чином, у звичайному Кригінгу вага, λ_i , залежить від встановленої моделі для вимірюваних точок, від відстані до розташування прогнозу і від просторових відношень між значеннями, що вимірюються навколо розташування прогнозу.

За векторизованими в програмному пакеті Surfer горизонталями з сучасного топографічного плану, побудовано 2D та 3D цифрові моделі рельєфу Звенигородського городища. Цифрова модель рельєфу у 2D має вигляд карти горизонталей з підписами висот, на які нанесено градієнт пріоритетності подальших досліджень інфраструктурних об'єктів від жовтого до червоного кольору. Цифрова модель рельєфу у 2D подано на рис.3.16. Проаналізовано розташування цих точок з врахуванням сучасного рельєфу місцевості. Об'єкти, що знаходяться в межах Звенигородського замку, розташовані на порівняно рівнинній території, а не на схилах, що може бути ознакою яка підтверджує їх пріоритетність. За територією замку куди потрапляють будівлі, весь рельєф є рівнинний.



- - об'єкти високого пріоритету подальших досліджень вертикальних зміщень
- - об'єкти низького пріоритету подальших досліджень вертикальних зміщень

Рис.3.16. ЦМР території Звенигородського городища з позначеними об'єктами різного ступеня пріоритетності для подальших досліджень вертикальних зміщень

Після того як визначені території, на які необхідно звернути увагу в першу чергу при дослідженні вертикальних зміщень, створено інтерферограми території досліджень за даними радіолокаційного знімання, отриманого з супутника Sentinel-1A за п'ятирічний період з 2018 по 2022 роки з періодичністю знімання в три місяці (додаток Г).

З урахуванням часових і перпендикулярних базових ліній, розподіл положення базової лінії для 20 зображень SAR представлено відповідно до їхніх відповідних ролей, де одне зображення виступає головним, а інше – підлеглим. Інтерферограми були створені з використанням перпендикулярної базової лінії довжиною 200 м і тимчасової базової лінії тривалістю 90 днів. Це відповідає порогу перпендикулярної базової лінії, який застосовується для топографічного картографування і варіюється від 100 м до 500 м залежно від рельєфу місцевості [193].

Перпендикулярна базова лінія відноситься до проекції, яка є перпендикулярною до похилої відстані між супутниками, що перебувають на двох різних орбітах. Параметр базової лінії вказує на ступінь чутливості до змін у топографічній висоті, ступінь декореляції у градієнті фази та ефективність процедури розгортання фази. Тимчасова базова лінія визначає тривалість між наборами даних зображень, а когерентність між зображеннями залежить від інтервалу часу, який їх розділяє.

Когерентність показує, наскільки схожий кожен піксель між головним і підлеглим зображеннями, зі значенням від 0 до 1. Відсутність або порожні дані в деяких пікселях (нульова когерентність) викликані тимчасовою декореляцією, що призводить до зменшення значення когерентності. На рисунку 3.17 наведено приклад значення когерентності для пари зображень від 20.03.2018 і 21.10.2021.

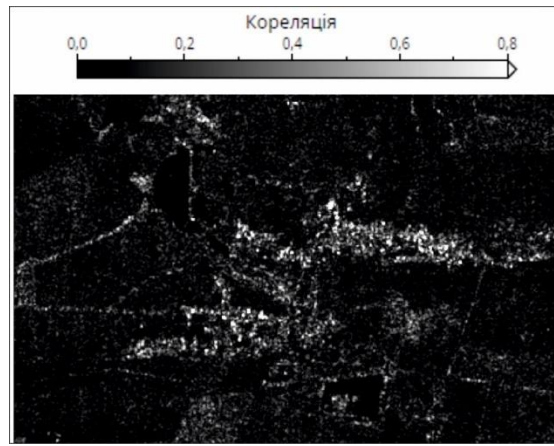


Рис.3.17. Узгодження знімків в області досліджень

Область з густою рослинністю має низьку когерентність (темніший колір). Вища когерентність відображається білим або світло-сірим кольором і зазвичай спостерігається над забудованими районами. Таким чином, деякі частини досліджуваних областей не мають піксельної інформації через низькі значення когерентності [135]. Інтерферограма показує різницю фаз між двома зображеннями у вигляді смуг. Смуги представляють коливання сигналу електромагнітної хвилі з певною довжиною хвилі, що повторюються від $-\pi$ до π . Одна смуга, зокрема для Sentinel-1, відповідає зміщенню на 5,6 см від датчика радара. На рис.3.18 показано фазову інтерферограму, яка все ще містить різні значення фази через шум, деформацію, затримки сигналу в атмосфері, помилки орбіти та топографічні ефекти.

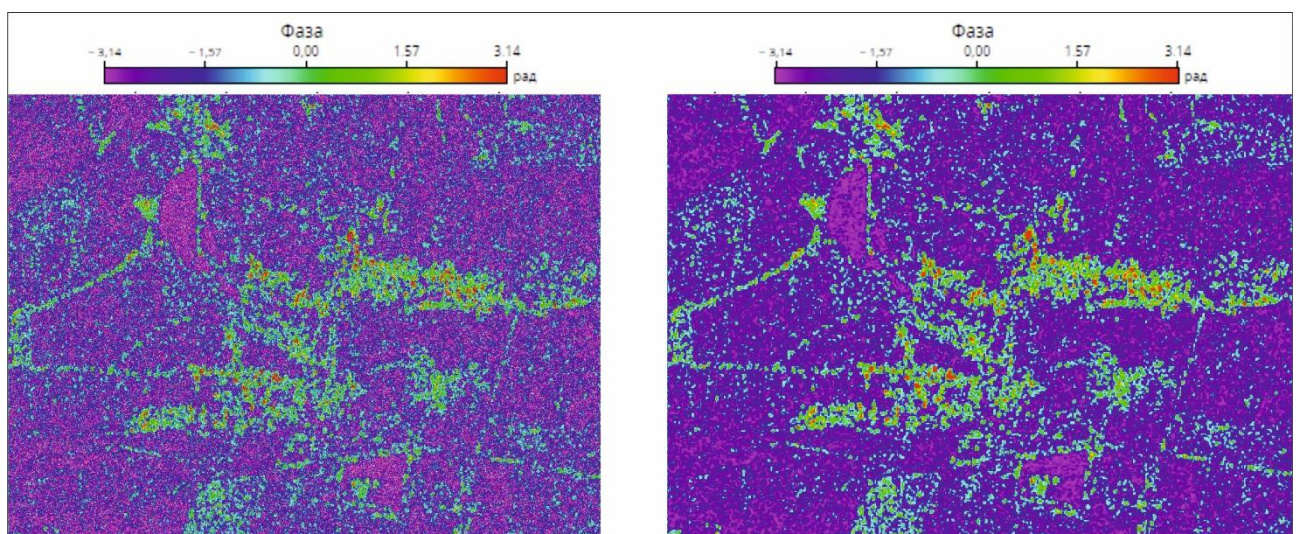


Рис.3.18. Фаза інтерферограми 20.03.2018 і 21.10.2021, до (ліворуч) і після (праворуч) фільтрації

Розгортання фази вирішує цю неоднозначність шляхом інтеграції різниці фаз між сусідніми пікселями. Результатом розгортання фази є абсолютне фазове значення деформації (переміщення). Розгорнута фаза представляє собою розрахунок деформації за супутниковими спостереженнями. Від'ємне значення (-) вказує на підйом, що означає, що сигнал наближається до радара або відстань зменшується. Навпаки, позитивне значення (+) вказує на осідання, тобто сигнал віддаляється від радара або відстань збільшується. Після процесу розгортання фази отримують значення переміщення вздовж лінії видимості (LoS). Це значення вказує на величину одновимірної вертикальної деформації вздовж LoS (рис.3.19).

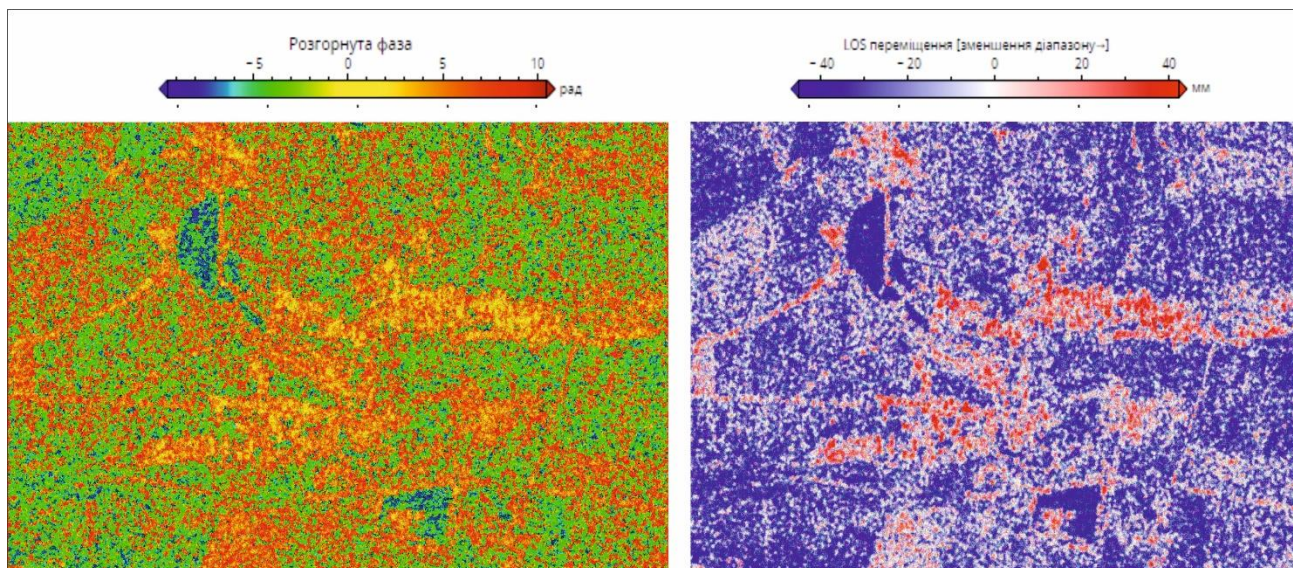


Рис.3.19. Розгорнута фаза (ліворуч) і зсув LoS (праворуч)

Її можна назвати одновимірною, оскільки кількість енергії, випромінюваної певним об'єктом, повертатиметься за допомогою лише одного розсіювача в одному пікселі. Це безпосередньо пов'язано з такими об'єктами, як оголені гірські породи, або штучними об'єктами, такими як будівлі, вежі та інші споруди в міській місцевості.

Значення зсуву на еталоні встановлено як нуль і використовується для визначення зміщень LoS у наступні місяці. Основні результати SBAS-InSAR представлені як середня швидкість LoS, що зображено на рис.3.20.

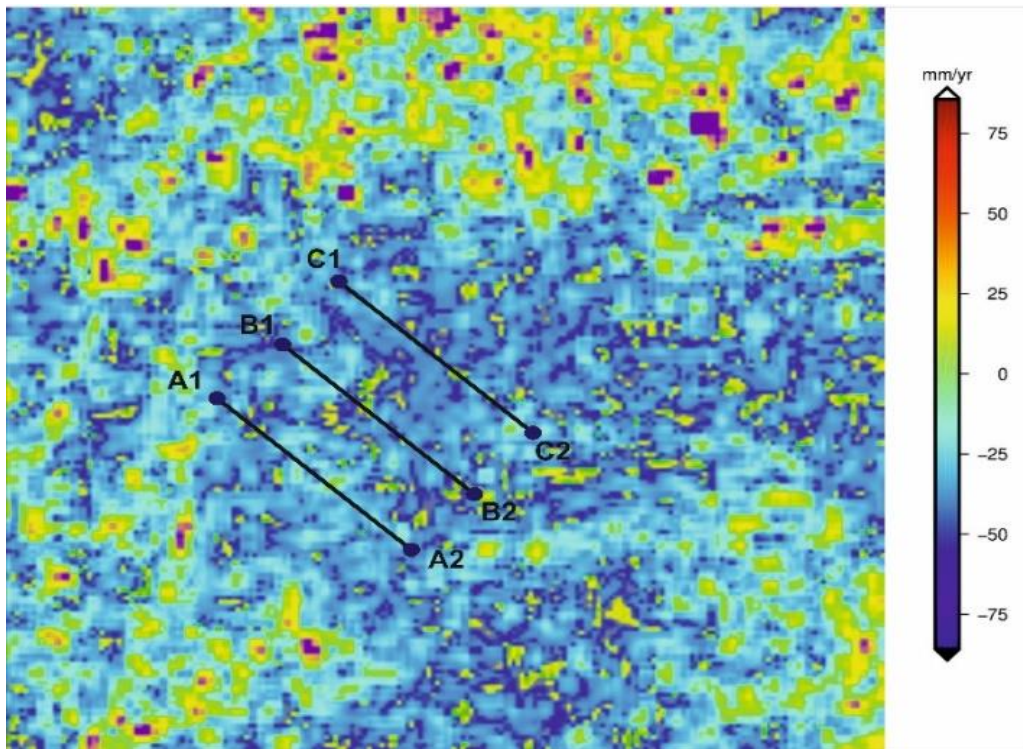


Рис.3.20. Середня швидкість LoS з кінця березня 2018 року по жовтень 2022 року, розподіл точок вибірки та профільних ліній

Щоб зрозуміти наявність деформації на території Звенигородського городища, було створено поперечні профілі для шести точок вибірки, розташованих у північній (A1, B1 і C1) та південній частинах (A2, B2 і C2) городища. Визначено, що вздовж профілю A1-A2 коливання вертикальних зміщень становило від -51 мм до 11 мм. Вздовж профілю B1-B2 коливання вертикальних зміщень становило від -67 мм до 19 мм. Вздовж профілю C1-C2 коливання вертикальних зміщень становило від -59 мм до 14 мм.

Якщо ж виокремити тільки екстремуми вертикальних зміщень з полігону території Звенигородського городища і порівняти з пріоритетними точками досліджень, що були визначені на початковому етапі, то бачимо, що тільки дві точки потрапляють на пріоритетні і просідання земної поверхні в цих точках становить 69 мм і 63 мм відповідно (рис.3.21.)

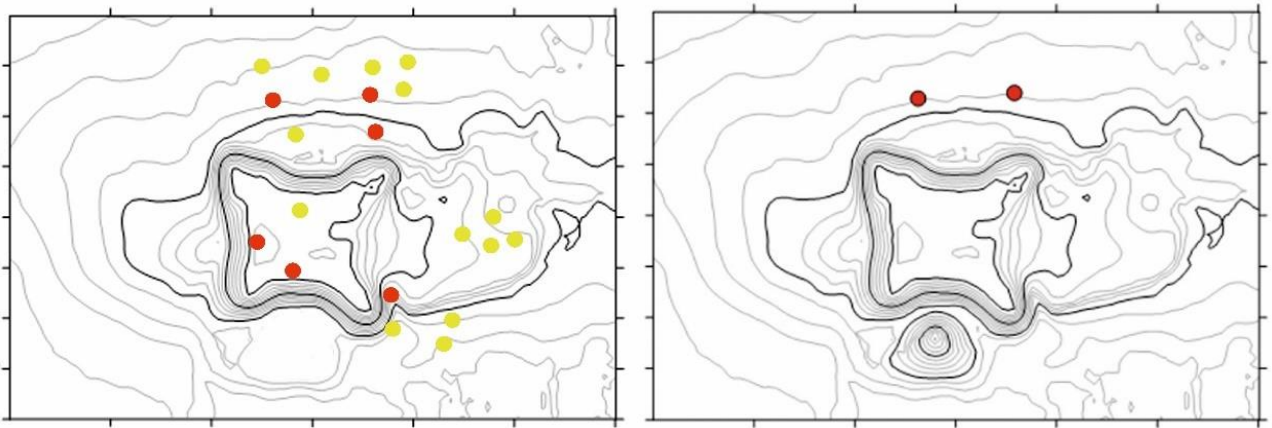


Рис.3.21. Пріоритетні точки для досліджень різного пріоритету, визначені за архівними картографічними матеріалами (зліва) та екстремуми вертикальних зміщень, що співпали з пріоритетними точками, позначені для подальших георадарних досліджень (права)

Отже, більшість пріоритетних точок, визначених на початковому етапі за архівними матеріалами не показали значних вертикальних зміщень, що може бути пов'язано з тим, що деякі з них містили артефакти, які були вивезені з території заповідника після археологічних досліджень за часів радянського союзу, а частина з них можливо була без фундаменту, або мала дерев'яну основу, залишки яких не збереглися під шаром ґрунту [227]. Саме на цих двох точках ми зосередимо увагу під час георадарних досліджень.

3.3. Дослідження ділянок екстремумів вертикальних зміщень георадаром на предмет аномалій

Після того як ми визначили можливі точки інтересу у вигляді екстремумів максимальних зміщень земної поверхні на території двох об'єктів за допомогою космічної радіолокаційної інтерферометрії, переходимо до наземних неінвазивних методів, а саме георадарного дослідження цих ділянок. Це яскраво демонструє необхідність синергії двох методів для точного дослідження порівняно невеликих за розмірами елементів об'єктів. Оскільки, просторова розрізненість радіолокаційних знімків з супутника Sentinel-1 є середньою і

використовуючи лише цей метод і цю знімальну систему, як безкоштовну, ми не можемо отримати точні дані про підземні структури, подібне поєднання методів є особливо необхідним.

Георадарні дослідження проводились за допомогою георадарної системи UTSI GV3_1 (рис.3.22).



Рис. 3.22. Використаний георадар - UTSI GV3_1

В таблиці 3.4 подано його основні характеристики.

Таблиця 3.4.

Основні технічні характеристики UTSI GV3_1 GPR (Ground Penetrating Radar)

Назва характеристики	Параметр
Частота антени	400 Гц
Інтервал читання даних	0,15
Поперечний крок	0,15 м.

Попередня оцінка точності георадарних досліджень (GPR) залежить від кількох чинників, включаючи частоту антени, властивості ґрунту або матеріалу, глибину досліджуваного об'єкту та інтерпретаційні методи. Ось кілька основних аспектів, які впливають на точність GPR [59, 72, 168]:

- ✓ Частота антени: високочастотні антени забезпечують вищу розрізненість, але меншу глибину проникнення. Наприклад, антена з частотою 1 ГГц може виявляти дрібні об'єкти на глибині до кількох метрів, тоді як антена з частотою 100 МГц може проникати на десятки метрів, але з меншою розрізненістю.
- ✓ Властивості матеріалу: електромагнітні хвилі взаємодіють з різними матеріалами по-різному. Вологий або глиняний ґрунт має вищу провідність і може знижувати проникнення сигналу, тоді як сухий піщаний або скельний ґрунт дозволяє глибше проникнення сигналу.
- ✓ Глибина об'єкта: точність виявлення зменшується з глибиною. Більш глибокі об'єкти важче розпізнати через втрату сигналу та зменшення розрізняювальної здатності.
- ✓ Інтерпретаційні методи: використання передових методів опрацювання даних та програмного забезпечення для інтерпретації може значно підвищити точність визначення об'єктів та їхніх характеристик.

Для наших досліджень GPR може виявити структури, такі як фундаменти, стіни, могили з точністю до 10-20 см на глибині до 2 метрів. При обстеженні мостів або доріг точність може бути в межах кількох сантиметрів для верхніх шарів асфальту чи бетону. Для визначення шарів порід або підземних вод точність може варіюватися від десятків сантиметрів до кількох метрів залежно від глибини та характеристик порід.

Для дослідження братських могил рекомендовано використовувати GPR з частотою антен від 100 до 500 МГц. Пристрої мають мати потужність, достатню для забезпечення проникнення на глибину до 3-5 метрів, залежно від ґрунту. Клас пристроїв повинен бути професійним або висококласним, щоб забезпечити надійні результати та високу роздільну здатність.

Зазвичай, попередня оцінка точності базується на аналогічних проєктах та емпіричних даних, отриманих із власного досвіду. Це дозволяє визначити, наскільки надійно можна очікувати виявлення та ідентифікацію об'єктів за допомогою GPR в конкретних умовах.

Дослідження ансамблю оборонних споруд Цитадель георадарним методом

Під час інтерпретації архівного німецького аерознімка на території ансамблю оборонних споруд «Цитадель» виявлено 16 збурених ділянок, які попередньо можуть містити братські могили військовополонених концентраційного табору. Чисельні масові поховання розташовані практично в межах усїєї площі колишнього концтабору. Окремі ямні поховання чергуються з похованнями "траншейного" типу. У післявоєнний період (1970-ті роки) є свідчення людей про знаходження в проваллях підземель під східною малою вежею людських кісток, частково покритих шаром біло-червоної суміші, золотих коронок із зубів тощо.

За твердженням сучасників, під час будівельних робіт щодо впорядкування колишнього "Електрон-Банку", проведення кабельних та інших мереж в 1990-х-2000-х та готелю-ресторану "CitadellInn" у 2007-2009 рр. в обох місцях, а саме в котлованах біля східної квадратної башти (частини головної споруди казарм (у випадку банку)), на частині протяжності земляного валу траншеї, викопаної на території Цитаделі, а також навкруги великої східної башти ("Башти смерті") було знайдено людські рештки у великих кількостях. З них частину (біля східної квадратної башти) залито бетоном.

Після інтерпретації всіх збурених ділянок, вони були перенесені на картографічні матеріали. Враховуючи СКП геометричної корекції графічних даних, межі попередньо визначених братських могил, представлених на сучасному топографічному плані масштабу 1:5000, могли відобразитись з максимальною похибкою до 4,5 м, а на архівному схематичному плані до 4,9 м (обумовлено якістю німецького знімка 1944 року та картографічних матеріалів).

Георадарні дослідження визначених збурених ділянок з архівного аерознімка 1944 року [63] виконувались при підтримці «Американського представництва в Україні комітетів для євреїв бувшого Радянського Союзу» при підтримці науковців-геофізиків з Великобританії Tim Fletcher і Charlie Enright.

Дослідження виконувались на двох точках максимальних вертикальних зміщень за попередніми радіолокаційними дослідженнями. Тенісний корт і ділянка за східною максиміліанською вежею природно створюють умови для визначення двох сіток для дослідження, майже визначених межами огорожі. Корт з північної сторони та його сітка дослідження позначені як площадка AOI 1, а ділянка із східної сторони – як площадка AOI 2. AOI 1: площадка 15 м x 30 м обстежена георадаром. AOI 2: площадка 15 м x 27 м обстежена георадаром.

Ці ділянки наскрізно нанесені на всі графічні матеріали, що використовувались в якості вхідних даних і були прив'язані всі до єдиної системи координат і проекції WGS-84.

В результаті георадарних досліджень на ділянці AOI 1 – це північний тенісний корт, найближчий до двох менших бараків, на глибині близько 0,3 м ($t=11.88ns$) виявлено підземний об'єкт 20м x 3м, що йде по діагоналі через тенісний корт і спочатку відстежується на сканограмах георадару на глибині 0,3 м. Цей об'єкт чітко співпадає з площадкою збуреного ґрунту, інтерпретованою на аерознімку 1944 року та точкою екстремуму вертикальних зміщень з радіолокаційних досліджень, а результати співпадають з чітко визначеними історичними розкопками. Краї об'єкту особливо чітко визначені найближче до південно-західного кута тенісного корту і йдуть за межі досліджуваної ділянки в північно-західний кут ділянки AOI 1. Центральний переріз об'єкту має менш визначені краї на всій глибині, що може бути результатом порушення ґрунту під час спорудження тенісних кортів. На глибині близько 0,7 м ($t = 14.38ns$) чіткість боків зменшується, а додаткові особливості виявляються в середині основного об'єкту. Це є, можливо, відбиття від об'єктів, що знаходяться в межах розкопу, але вони не спостерігаються по всій довжині об'єкту і чітко відсутні там, де раніше могли бути розкопки. Відбиття від північного краю об'єкту починають втрачати

чіткість на глибині близько 0,8 м ($t=15.63ns$) на відміну від південної сторони, де воно залишається чітким на глибині близько 0,93 м ($t=18.44ns$), об'єкт зовсім не видно на глибинах понад 1,1 м ($t=22.1ns$) (рис.3.23).

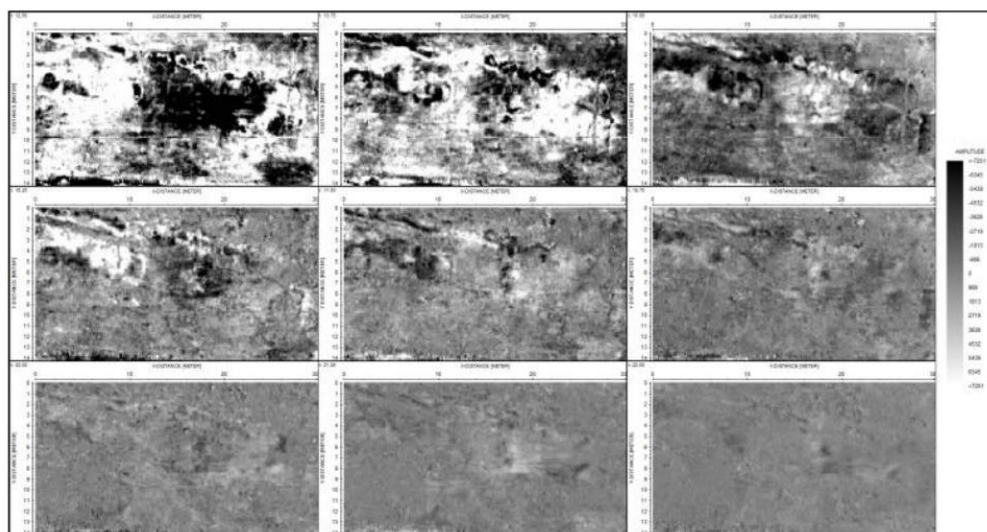


Рис.3.23. Ділянка дослідження АОІ 1 – часові інтервали, показані георадаром

Часові інтервали, показані на рис.3.26 показують розміри об'єкту. Рис.3.24 показує інтервал об'єкту на глибині близько 0,68 м ($t=13,75ns$). Особливу увагу необхідно приділити темнішим відбиттям (вищої амплітуди) зліва по центру об'єкту, що демонструє місце можливого збурення, яке могло утворитися під час спорудження тенісних кортів [172].

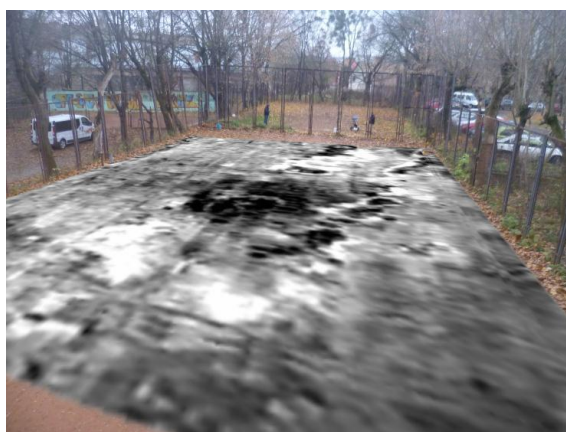


Рис.3.24. Ділянка дослідження АОІ 1 - накладення інтервалів за георадаром

Ділянка АОІ 2 – це ділянка за східною максиміліанською вежею і знаходиться над місцем ґрунту, що показує збурення інтерпретованому на аерознімку 1944 р та підтверджено точкою максимальних вертикальних зміщень за даними

радіолокаційної інтерферометрії. На південному кінці досліджуваної території дуже добре визначений об'єкт йде під кутом до сітки зйомки. Грунт на південній стороні цього об'єкту показує помітно відмінні властивості. Це може бути лінією огорожі, розташованої безпосередньо над цим об'єктом. На північному краю ділянки можна побачити закінчення великого об'єкту. Від центрального західного краю ділянки можна побачити прямокутний об'єкт шириною близько 2,5 м, причому його довжину важко визначити, імовірно, що він простягається приблизно на 7 м до центру ділянки, але існує можливість, що він проходить далі і навіть за східний край досліджуваної ділянки і аерознімок підтверджує цю теорію.

За розмірами цей об'єкт подібний до того, що показаний на ділянці AOI 1, але визначений не так чітко. Перші відбиття цього об'єкту показуються на глибині близько 0,5 м ($t=10\text{ns}$), причому відбиття не реєструються глибше, ніж на глибині близько 1 м ($t=20\text{ns}$).

Ділянка AOI 2 обстежувалася ходами в одному напрямку, і вони виявилися перпендикулярними до краю об'єкту.

Рис.3.25 показує інтервал об'єкту на глибині близько 0,78 м ($t=15,63\text{ns}$). Прямокутний об'єкт можна побачити нижче по центру зображення. Грунт за межами огорожі 1944 року знаходиться з правої сторони.

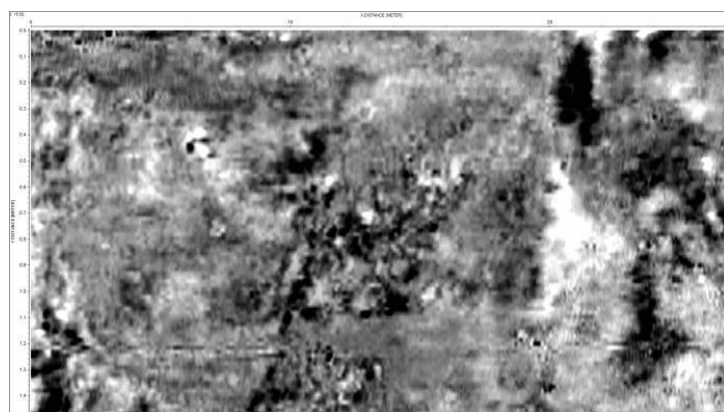


Рис.3.25. Ділянка дослідження AOI 2 – сканограма георадару при $t=15,63\text{ns}$

На відміну від горизонтальних часових інтервалів вертикальні траси сканування «В» показують інтерпольовані відображення вибраних профілів. Чотири профілі сканування «В», як показано на рис.3.26, показують розрив у

природній стратиграфії в місці розкопок. Наступні чотири зображення показують три вибраних перерізи, два з ділянки АОІ 1 та два з ділянки АОІ 2.

Оскільки переріз з ділянки АОІ 1 перетинає об'єкт під кутом, він дає вигляд ширшого зображення цього об'єкту, який сам по собі в реальності має ширину близько 2,5-3 метри. Слід звернути увагу також на те, як досліджувана ділянка з правої сторони перерізу А-А просувається поперек до лівої сторони перерізу В-В, що звичайно відповідає діагональній орієнтації цього об'єкту відносно сітки зйомки [4].

Профіль С-С проходить через середню частину прямокутного об'єкту ділянки АОІ 2. Він очевидно закінчується за кілька метрів від східного краю досліджуваної території. Профіль D-D є цікавий для порівняння з профілем С-С, оскільки чітко показує значно глибший щільний ґрунт із непорушеною стратиграфією.

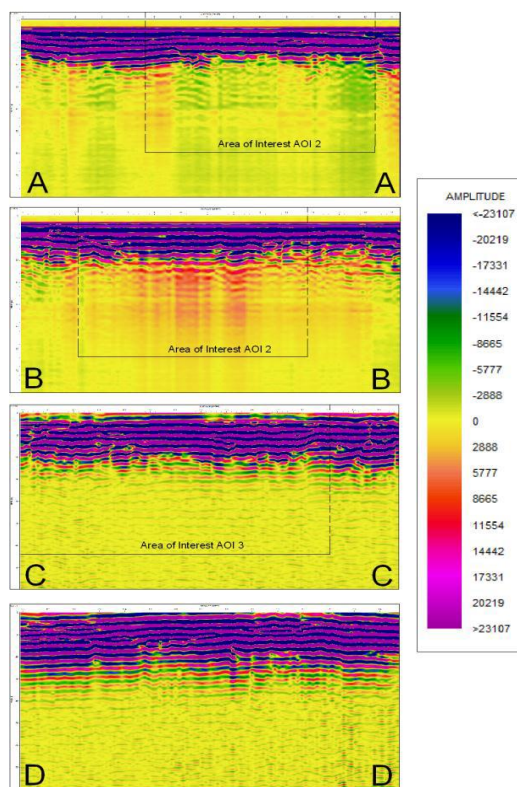


Рис. 3.26. Ділянки досліджень АОІ 1 і 2 – профілі сканування георадаром

Окрім поєднання методики опрацювання архівних аерознімків та космічного радіолокаційного знімання з георадарними дослідженнями можна також використовувати і інші дистанційні методи, такі як опрацювання даних

космічного оптико-електронного знімання різної просторової розрізненості (в залежності від об'єктів досліджень), аерознімання з БПЛА та інші. Всі ці методи аерокосмічних досліджень в поєднанні з наземним георадарним методом дають змогу комплексного дослідження об'єктів історико-культурної спадщини, особливо коли неможливо застосувати археологію в силу різних обставин (наприклад релігійних законів, загрози епідемії і т.д). Одним із мінусів цих комплексних досліджень є власне отримання результатів опрацювання георадарних даних, оскільки на даний час технологічно не існує певного набору еталонних даних матеріалів, що можуть зустрічатися при георадарному обстеженні. Тож, за виконання цих досліджень слід повністю покладатися на досвід оператора. Здатність ґрунту пропускати радіохвилі залежить від декількох чинників, включаючи електропровідність ґрунту, щільність ґрунту, пористість, температуру, фізичну структуру ґрунту, використану частоту та кількість солей, що містяться в ґрунті. Найважливішим чинником є електропровідність ґрунту, яка визначає швидкість проходу хвилі та глибину проникнення. Ґрунти з високою електропровідністю дають втрату сигналу. Це все можна віднести до недоліків георадарного методу. В цілому земля та ґрунти у Львівській області придатні для зйомок з використанням георадарау.

В таблиці 3.5 подано інформацію про точність вимірювань, похибки георадарного знімання Львівської цитаделі.

Таблиця 3.5.

Похибки вимірювань георадарного знімання Львівської цитаделі

№ вимірювання	Глибина (м)	Похибка глибини (см)	Амплітуда сигналу (dB)	Похибка амплітуди (dB)
1	0,8	3	-40	3
2	0,9	6	-45	5

Все це об'єктивно вносить певні корективи в достовірність отриманих результатів георадарного знімання. Тому, на нашу думку і необхідне комплексне поєднання дистанційних методів досліджень.

Дослідження Звенигородського городища георадарним методом

Збір даних георадару проводився за допомогою геофізичного приладу UTSI GV3_1 з частотою антени 400 МГц.

Георадарні дослідження проводились на двох ділянках Звенигородського городища, які показали найбільше вертикальне зміщення за даними радіолокаційної інтерферометрії.

Траєкторія на рисунку 3.27 має довжину 40 метрів і відображає рефлектор іншого контрасту. Якщо об'єднати малюнки 3.27 і 3.28, обидві траєкторії демонструють різне положення гіперболічного відбиття. Траєкторія 1 має гіперболічний рисунок на глибинах 0,36 і 0,41 метра. Ця гіперболічна модель відбиття показує антиклінальну структуру, яка є аномальною реакцією. На траєкторії 2 (рис. 3.28) гіперболічний малюнок видно на глибинах приблизно 0,16 та 0,33 метра.

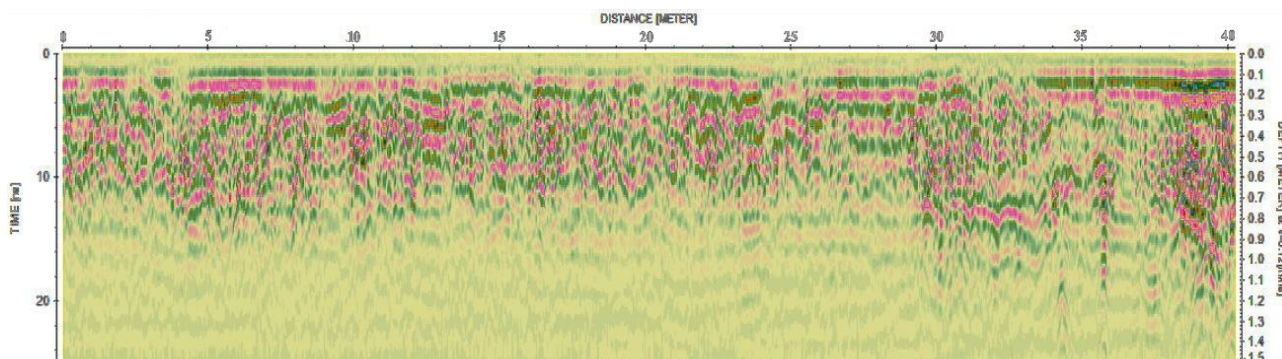


Рис.3.27. Траєкторія 1

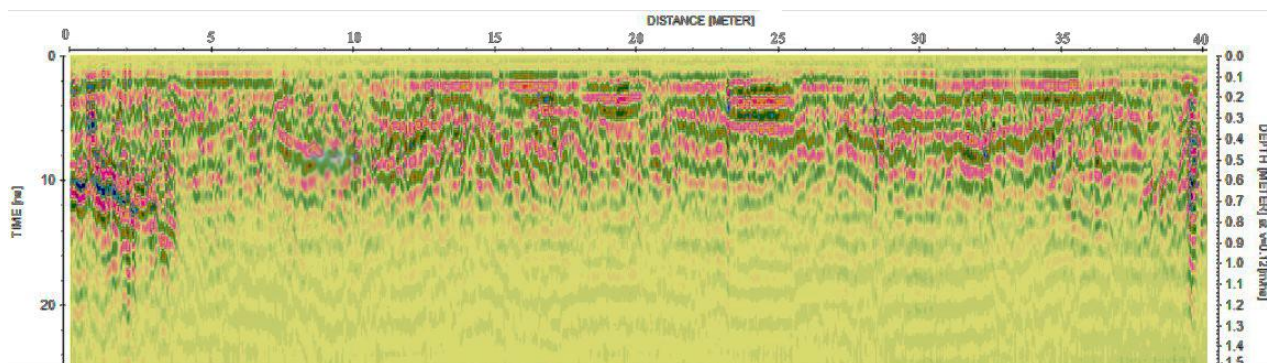


Рис.3.28. Траєкторія 2

Гіперболічні відбиття на обох траєкторіях зафіксовані на різних глибинах. Рисунок гіперболи не має яскравого кольору відбивача, що може бути спричинено низьким діелектричним коефіцієнтом [159, 126]. Аналіз показує, що

майже всі траси мають гіперболічні відбиття, що свідчить про реакцію матеріалу під поверхнею на електромагнітні хвилі. Порівняння з положенням об'єкта аномалії показує, що траєкторія не завжди збігається за глибиною. Згідно з припущенням, що дані аномалії можуть бути рештками фундаменту, які зараз знаходяться під землею, моделі сильного відбивача можуть вказувати на частини руїн будівлі, поховані під ґрунтом.

Однак для більш достовірної інформації потрібні додаткові дані та документальні записи з часів розквіту городища для підтвердження цього припущення. Яскравий колір відбивача вказує на матеріал з низькою електропровідністю. Відповідно до теорії електромагнітних хвиль, енергія хвиль знижується в матеріалах з високою провідністю або високими діелектричними характеристиками.

В таблиці 3.6 подано інформацію про точність вимірювань, похибки георадарного знімання Звенигородського городища.

Таблиця 3.6.

**Похибки вимірювань георадарного знімання Звенигородського
городища**

№ вимірювання	Глибина (м)	Похибка глибини (см)	Амплітуда сигналу (dB)	Похибка амплітуди (dB)
1	1.0	4	-45	2
2	1.6	9	-50	4

Використовуючи методи георадару, можна ідентифікувати археологічні об'єкти, поховані під поверхнею, через гіперболічне відбиття [142]. Метод георадару здатний створювати 2D-зображення підземних структур. Як результат обробки даних, сильний рисунок рефлектора та гіперболічне відбиття від підповерхневих аномальних об'єктів можуть вказувати на частини фундаменту будівлі, що мають низьку електропровідність. Гіперболічний рефлектор з неясковим кольором є аномальним об'єктом з високою провідністю. Аномальні об'єкти розташовані на глибині від 0,16 до 1,2 метра і позначені гіперболічним

відбивачем на різних траєкторіях. Розподіл аномальних об'єктів є розрізненим і не безперервним по всій траєкторії.

Висновки та рекомендації до розділу 3

Експлікація наукових досліджень з використанням методу радіолокаційної інтерферометрії та георадарного знімання для дистанційного моніторингу Львівської цитаделі і Звенигородського городища дозволила зробити такі висновки:

1. За період з початку 2020 до кінця 2022 року на території Львівської цитаделі було визначено 24 точки вертикальних зміщень, які варіювались від 17 до 36 см, з точністю до 0,6 см. Виділено дві ділянки для подальшого георадарного дослідження, що свідчить про ефективність методу на початковому етапі комплексного моніторингу земель історико-культурного призначення.

2. Результати досліджень Звенигородського городища методом радіолокаційної інтерферометрії показали наявність двох точок екстремумів вертикальних зміщень, що відповідають попереднім дослідженням. Їх зміщення становить 6,9 і 6,3 см за період з 2018 до 2022 року, що підтверджує точність даних та їхню релевантність у моніторингу зон інтересу.

3. Аналіз результатів георадарного дослідження двох ділянок на території Львівської цитаделі дозволив виявити об'єкти з аномальними характеристиками. На ділянці АОІ1 виявлено об'єкт розміром 20 м на 3 м на глибині 0,3 м, який заглиблюється до 0,8-0,9 м. На ділянці АОІ2 було виявлено ще один об'єкт шириною 2,5 м і довжиною близько 7 м. Отримані дані також дозволили визначити лінію огорожі 1944 року та коригувати межі земель історико-культурного призначення.

4. Георадарне дослідження на території Звенигородського городища виявило аномалії, що можуть бути залишками фундаменту будівлі. Аномальні об'єкти розташовані на глибині від 0,16 до 1,2 м, їх розташування не є безперервним, що може свідчити про наявність артефактів під шаром ґрунту, що вимагає подальших досліджень.

РОЗДІЛ 4.

ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ОТРИМАНИХ З БПЛА ДЛЯ ПОБУДОВИ І АНАЛІЗУ ЦМП ОБ'ЄКТІВ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

Використання даних, отриманих від безпілотних літальних апаратів (БПЛА), для побудови та аналізу об'єктів історико-культурної спадщини може мати кілька важливих застосувань. БПЛА можуть створювати детальні аерознімки, які дозволяють створити точні карти об'єктів історичної спадщини та їх оточення. Це допомагає ідентифікувати нові об'єкти, відновлювати втрачені артефакти та розробляти стратегії їх збереження. Ортофотоплани, отримані за даними БПЛА, можуть слугувати основою для моніторингу стану історичних об'єктів та виявлення будь-яких змін чи пошкоджень. Це дозволяє швидко визначати потенційні проблеми та приймати заходи з їх вирішення. Аналіз зображень, отриманих з БПЛА, може допомогти у дослідженні історичного контексту об'єктів спадщини, включаючи їх розташування, співвідношення з іншими об'єктами та зміни, які вони пройшли протягом часу. Дані можуть бути використані для відновлення зруйнованих або пошкоджених історичних об'єктів шляхом створення точних 3D-моделей або віртуальних турів. Аналіз даних, отриманих з БПЛА, може допомогти в управлінні та плануванні процедури збереження історичних об'єктів, враховуючи їх стан, потенційні загрози та потреби у ремонті та обслуговуванні.

Впровадження цифрових моделей поверхні об'єктів історико-культурної спадщини, створених за даними аерознімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і повітряного лідарного сканування, є необхідним кроком для розвитку системи кадастру і моніторингу земель історико-культурного призначення. Використання цих передових технологій забезпечує високоточну фіксацію топографії та архітектурних особливостей об'єктів, що є надзвичайно важливим для збереження автентичності культурної спадщини. Цифрові моделі поверхні дозволяють створити детальну і реалістичну базу даних, яка значно полегшує процес інвентаризації та управління земельними ділянками. Вони забезпечують можливість виявлення навіть найменших змін у стані об'єктів, що дозволяє

оперативно реагувати на потенційні загрози та здійснювати необхідні заходи з консервації та реставрації. Крім того, використання БПЛА і лідарного сканування значно скорочує час і витрати на проведення обстежень порівняно з традиційними методами, що робить процес моніторингу більш ефективним та доступним. Такі моделі сприяють покращенню якості та точності кадастрових даних, що є важливим для правового регулювання та планування використання територій. Впровадження цифрових технологій також сприяє підвищенню прозорості і доступності інформації для громадськості, що стимулює залучення місцевих громад до процесів збереження культурної спадщини. Таким чином, інтеграція цифрових моделей поверхні в систему кадастру і моніторингу є необхідною умовою для ефективного управління і збереження історико-культурних земель в умовах сучасного розвитку.

У дисертаційній роботі виконано аерознімальні роботи і лідарне знімання території історико-культурного заповідника «Древній Звенигород».

Для виконання знімальних робіт використано два квадрокоптери фірми DJI, а саме Matrice 300 RTK і Matrice 350 RTK (рис.4.1).



Рис.4.1. Зовнішній вигляд застосованих квадрокоптерів фірми DJI

В якості базової станції використовувався приймач Leica GS16, що був встановлений за 2 метри від місця взльоту і посадки БПЛА.

Для зв'язку використано РПК (Post-Processed Kinematic) технології, які забезпечують точність геопозиціонування на рівні $\pm 2-5$ см.

4.1. Виконання аерознімання з БПЛА для точного визначення планового положення об'єктів історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» (створення ортофотоплану і карти висот)

Аерознімання з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є дієвим методом для отримання точних даних про планове положення об'єктів на землі. Цей процес може включати створення ортофотопланів і карт висот, що дозволяє отримати детальну інформацію про територію.

Для виконання аерознімання з використанням БПЛА потрібне відповідне обладнання, яке включає знімальні камери високої просторової розрізненості, GPS-системи для точного місцезнаходження БПЛА, а також програмне забезпечення для опрацювання та аналізу отриманих даних [155].

Цей процес дозволяє отримати важливу інформацію для різних галузей, таких як картографія, геологія, сільське господарство, міське планування та багато інших.

Аерознімальні роботи виконувались за допомогою знімальної камери DJI Zenmuse P1 (рис.4.2).



Рис.4.2. Зовнішній вигляд цифрової знімальної камери DJI Zenmuse P1 на підвісі БПЛА

DJI Zenmuse P1 розроблена для високоточних фотограмметричних робіт і широко використовується для створення 3D-моделей, картографування, сільськогосподарського моніторингу, інспекції інфраструктури та інших застосувань, де потрібна висока точність і якість зображень [188]. Аерознімання виконувалось з метою створення ортофотоплану і побудови ЦМР території

об'єкту. Ортофотоплан запроєктовано створити у картографічному масштабі 1:2000 в погодженні з адміністрацією заповідника.

Для створення ортофотоплану в картографічному масштабі 1:2000 за допомогою БПЛА, потрібно провести розрахунок апріорної оцінки точності, враховуючи вимоги до точності даного масштабу. Масштаб 1:2000 означає, що 1 см на карті відповідає 20 м на місцевості. Для масштабу 1:2000 планова точність зазвичай повинна бути в межах ± 0.2 м (20 см). Це означає, що на місцевості допустиме відхилення координат не повинно перевищувати 20 см. Для масштабу 1:2000 висотна точність зазвичай повинна бути в межах ± 0.5 м.

Для забезпечення відповідності вимогам до точності визначаємо оптимальну висоту польоту. Згідно таблиці 4.3 для застосованої камери розмір пікселя сенсора: 4.4 мкм, фокусна відстань: 35 мм. Нам необхідно досягти просторову розрізненість геометричної площини GSD (Ground Sample Distance), яка забезпечить необхідну точність. Для створення ортофотоплану в масштабі 1:2000 рекомендується використовувати GSD на рівні 2-3 см на піксель.

Формула для розрахунку GSD (4.1):

$$GSD = \frac{H \times P}{F}, \quad (4.1)$$

де H – висота польоту (в мм), F – фокусна відстань (в мм), P – розмір пікселя сенсора (в мм).

Висота польоту під час експерименту була 145 м. Розрахована за формулою 4.1 GSD дорівнює 1,82 см/пікс.

$$GSD = \frac{145000 \times 4,4}{35} = 18,2 \text{ мм} = 1,82 \text{ см}$$

Тобто одному пікселю на знімку відповідає 1,82 см на місцевості, що відповідає масштабу 1:2000.

Проведений розрахунок показує, що для створення ортофотоплану в масштабі 1:2000 необхідно забезпечити GSD на рівні 2 см/піксель, а також використовувати високоточні системи геопозиціювання. Виконання цих умов дозволить досягти необхідної планової та висотної точності, що відповідає вимогам картографічних стандартів [286].

Для проектування аерознімальних робіт необхідно обчислити поздовжнє і поперечне перекриття та інші кількісні і якісні характеристики зображення.

Тому далі обчислюємо необхідне поздовжнє і поперечне перекриття, залежно від перевищення на ділянці, що реалізується за формулами 4.2:

$$P_x\% = p + \frac{h}{H-h} (100 - p); \quad (4.2)$$

$$P_y\% = q + \frac{h}{H-h} (100 - q);$$

де $h = \frac{A_{max} - A_{min}}{2}$ - максимальне перевищення над середньою площиною;

p - задане поздовжнє перекриття аерознімків; q - задане поперечне перекриття аерознімків.

При виконанні аерознімання було встановлено поздовжнє перекриття 60%, а поперечне 40%. При цьому над територією історико-культурного заповідника площею 26,8 Га створено 458 знімків. Ортофотоплан створювався в 6-и градусній проекції Гауса-Крюгера, система координат – УСК 2000, 5 зона.

Створення ортофотоплану відбувалось в програмі DJI Terra, яка пропонує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та потужні інструменти для створення високоякісних ортофотопланів. При цьому після завантаження опорних точок і знімків та їх вирівнювання було створено хмару точок перед генерацією карти висот [118, 270].

У таблиці 4.1 наведено похибки трьох опорних точок, що були додатково замарковані по периметру об'єкта.

Таблиця 4.1.

Визначені похибки на опорних точках

Ідентифікатор	Кількість знімків з маркерами	Похибки перепроєктування RMS (пікс.)	Похибка прямого пересічення (м)	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)	dx (м)	dy (м)	dz (м)
T1	10	1.194	0.021	0.024	0.012	0.027	0.02	-	-
								0.014	0.012
T2	13	1.257	0.022	0.025	0.132	0.134	0.025	0.006	0.132
T3	9	2.532	0.046	0.056	0.046	0.072	0.052	0.02	0.046

Точка 1 має найменшу кількість знімків з маркерами (10), але демонструє найменшу похибку перепроєктування (1.194 пікс). Похибка прямого пересічення складає 0.021 м, що є найменшим значенням серед трьох точок. Загалом похибки координат T1 (m_x , m_y , m_z) та відхилення координат (dx , dy , dz) є найменшими, що вказує на високу точність цієї опорної точки. Точка 2 має найбільшу кількість знімків з маркерами (13), з дещо більшою похибкою перепроєктування (1.257 пікс) порівняно з T1. Похибка прямого пересічення складає 0.022 м, що також є малим значенням. Однак, похибка m_y (0.132 м) та m_z (0.134 м) є значно більшими порівняно з іншими точками, що вказує на можливі проблеми в орієнтації або висоті цієї точки. Точка 3 має найменшу кількість знімків з маркерами (9) та найбільшу похибку перепроєктування (2.532 пікс). Похибка прямого пересічення складає 0.046 м, що є найбільшим значенням серед трьох опорних точок. Загалом похибки координат T3 (m_x , m_y , m_z) та відхилення координат (d_x , d_y , d_z) є значно більшими порівняно з T1 та T2, що вказує на найменшу точність цієї опорної точки.

На проміжних етапах при створенні ортофотоплану, було створено карту перекриття сцен, тобто загальну зону перекриття (повздовжнє і поперечне) всіх знімків (рис.4.3), а також цифрову модель поверхні, звідки згодом відфільтровано ЦМР об'єкту (рис.4.4).

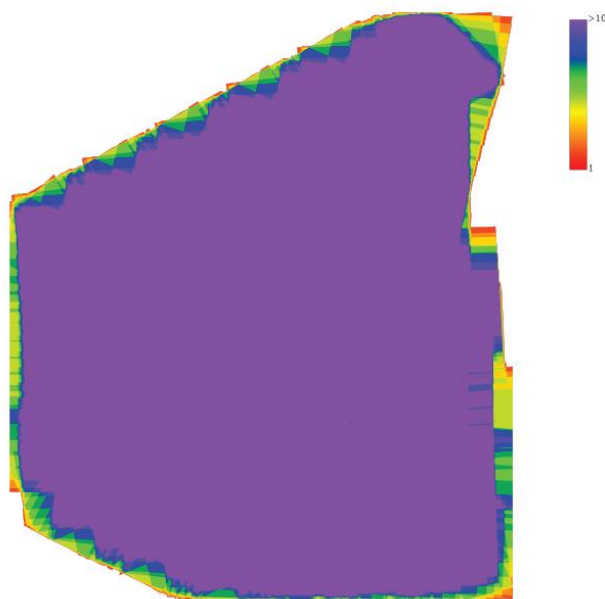


Рис.4.3. Карта перекриття сцен

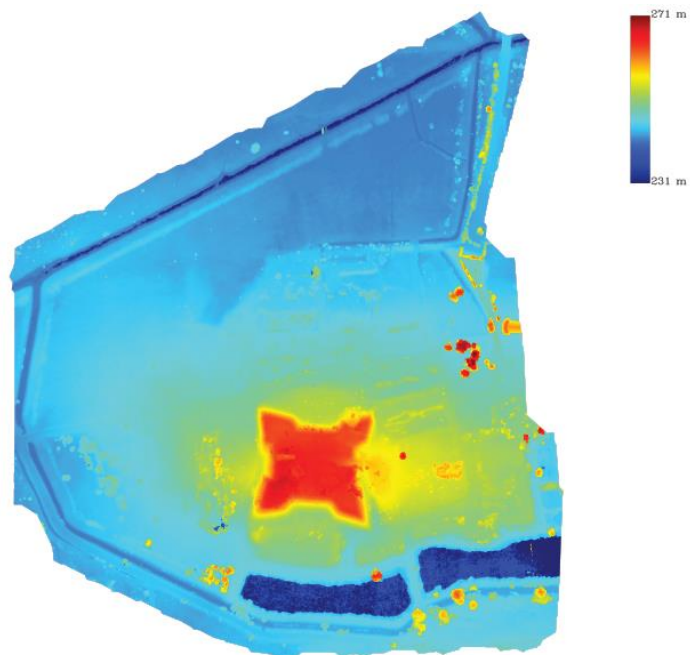


Рис.4.4. Створена цифрова модель поверхні історико-культурного заповідника «Древній Звенигород»

Останнім етапом на основі створеної щільної хмари точок отримано ортофотоплан заповідника (рис.4.5).

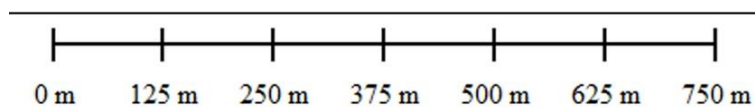


Рис.4.5. Ортофотоплан історико-культурного заповідника «Древній Звенигород»

На ортофотоплані були виміряні координати 10 контрольних точок та проведена оцінка точності просторових координат. Результати представлені у табл.4.2.

Таблиця 4.2.

Оцінка точності побудованого ортофотоплану за контрольними точками

<i>N</i>	$\Delta X (м)$	$\Delta Y(м)$	$\Delta Z(м)$
1	0,037	0,067	-0,048
2	-0,012	0,052	0,046
3	-0,084	0,075	-0,030
4	0,022	-0,007	0,019
5	0,011	-0,085	0,026
6	0,091	0,028	0,035
7	-0,019	-0,011	0,045
8	0,009	-0,058	0,031
9	-0,087	0,006	-0,038
10	-0,099	0,017	-0,078

Для розрахунку СКП представлених 10 контрольних точок спочатку розраховуємо середні значення, після чого розраховуємо власне самі середні квадратичні похибки [8]

Відповідно, СКП склали: $m_x = 0,056$ см, $m_y = 0,050$ см, $m_z = 0,115$ см.

Як видно з таблиці, СКП не перевищують допустимих значень, що відповідає вимогам топографічного плану 1:2000 [250].

Отже, представлені матеріали свідчать про можливість застосування цього БПЛА для створення великомасштабних планів та ортофотопланів місцевості.

4.2. Виконання лідарного знімання з БПЛА території історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» та опрацювання результатів

Лідарне знімання з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є важливою технологією для отримання детальної інформації про поверхню землі та об'єкти на ній. Цей метод використовує лазерні промені для точного вимірювання відстаней до об'єктів, створюючи високоякісні тривимірні моделі оточуючого середовища.

Однією з ключових переваг лідарного знімання є його висока точність та роздільна здатність, що дозволяє отримати детальну інформацію про рельєф, висоти об'єктів та їх контур. Безпілотні літальні апарати дозволяють здійснювати такі знімання в різних масштабах та над різними територіями, що робить їх ефективним інструментом для різних галузей, включаючи картографію, міське планування, екологію [174, 137].

Опрацювання отриманих даних лідарного знімання включає їхню обробку, аналіз та використання для різних цілей. Спеціалізовані програми дозволяють створювати тривимірні моделі територій, генерувати картографічні дані і карту висот, що надають цінну інформацію для різноманітних застосувань, починаючи від планування міст до вивчення природних ресурсів.

Використання лідарного знімання з БПЛА і опрацювання його результатів є потужним інструментом для отримання даних, які є важливими для багатьох галузей та досліджень, сприяючи точному аналізу та розумінню нашого навколишнього середовища.

Лідарне знімання історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» виконувалось двома сканерами різних фірм з різними характеристиками, для порівняння отриманих результатів між собою і з ЦМП побудованою за даними аерознімання. Були використані сканери DJI Zenmuse L2 (рис.4.6) і CHCNAV Alpha Air 450 (рис.4.7).



Рис.4.6. Зовнішній вигляд повітряного лазерного сканера DJI Zenmuse L2



Рис.4.7. Зовнішній вигляд повітряного лазерного сканера CHCNAV Alpha Air 450

Процес лідарного сканування розбивався на два блоки кожним сканером, з можливістю заміни батарей живлення. Висота сканування кожною лідарною системою складала 60 метрів над поверхнею землі, з середньою швидкістю польоту 4,45 м/с, частотою імпульсу 240 кГц та швидкістю сканування 720 кГц.

Сканування запланованої території кожним сканером складалося з 14 маршрутів (рис.4.6).

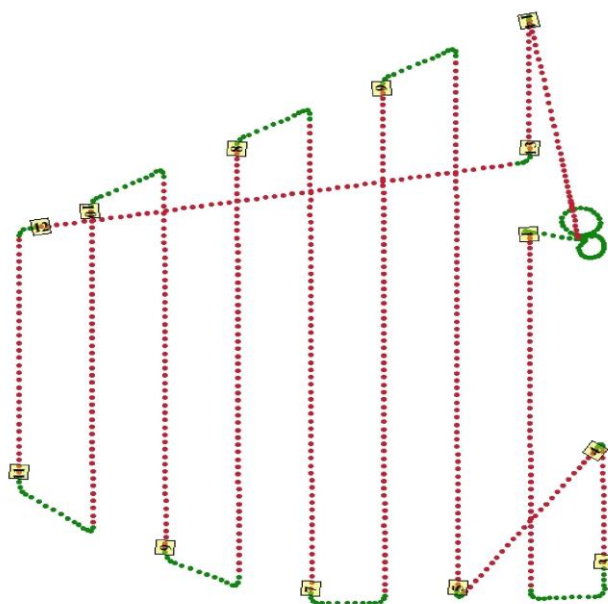


Рис.4.8. Схема маршрутів повітряного лазерного сканування території заповідника «Древній Звенигород»

Ключові параметри, що необхідні для планування знімальних робіт, включають розмір і площу зони знімання, щільність точок на поверхні, а також точність визначення координат точок. Виходячи з цих характеристик, обираємо відповідний лазерний сканер, систему позиціонування та орієнтування, а також носій для знімальної апаратури — літак, гелікоптер або БПЛА. Гелікоптер зазвичай використовують для детальних досліджень на невеликих ділянках, та за потреби високої щільності точок на поверхні [131]. Для знімання протяжних територій доцільніше використовувати літак. Параметри лазерного сканера і системи позиціонування визначають щільність точок поперек лінії знімання та точність визначення висоти точок.

Щільність точок вздовж траєкторії польоту Δx визначається на основі швидкості руху носія та частоти сканування F за формулою (4.3):

$$\Delta x = V / F. \quad (4.3)$$

Щільність точок поперек лінії польоту Δy визначається за формулою 4.4.

$$\Delta y = FOW / N, \quad (4.4)$$

де FOW – поле зору лазерного сканера; N – кількість точок в одній лінії сканування (для плоскої поверхні беруть відстань між точками однаковою).

N визначають за формулою 4.5.

$$N = PRF / F, \quad (4.5)$$

де PRF – частота повторення імпульсів.

Зважаючи на те, що відстань між сусідніми імпульсами на краях смуги сканування збільшується, Δy обчислюється для максимального кута сканування θ . Отже, формула виглядає наступним чином:

$$\Delta y = \frac{\theta}{N} \cdot \frac{H}{\cos^2 \theta}, \quad (4.6)$$

де H – висота польоту носія над поверхнею Землі.

Параметри Δx і Δy використовують для визначення мінімальної щільності точок, яка виражається як кількість точок на квадратний метр.

$$d \frac{1}{\Delta x \cdot \Delta y_{min}}. \quad (4.7)$$

Обчислені параметри залежать не лише від характеристик лазерного сканера, але й від висоти польоту H . Висота польоту визначається з урахуванням максимальної нахиленої відстані R_{max} , яка впливає на точність вимірювання відстані.

$$R \frac{H}{\cos \theta_{max}}. \quad (4.8)$$

Оскільки точність визначення перевищень є попередньо заданою, висота польоту H має обмеження. До того ж, щільність точок поперек траєкторії сканування і ширина смуги сканування залежать від висоти польоту [131].

Додатково необхідно встановити величину перекриття для сусідніх смуг сканування δ , яку обчислюють за формулою:

$$\delta = 1 - \frac{e}{SW}, \quad (4.9)$$

де e – відстань між центральними лініями сусідніх смуг сканування; SW – ширина смуги сканування.

Ця величина залежить від точності керування польотом. Щоб уникнути випадкових прогалин між сусідніми смугами сканування, наприклад, через

сильний вітер, встановлюють перекриття на рівні 20%. Для деяких завдань, де потрібна висока щільність точок і досягти її неможливо через параметри сканування, перекриття може бути збільшене до 50%, як в нашому випадку.

Для визначення тривалості польоту необхідно враховувати кількість і довжину ліній сканування. Довші лінії сканування дозволяють зменшити кількість переривань, але надто довгі можуть призвести до похибок інерційної навігаційної системи [96]. Відстань від будь-якої точки сканування до базової станції GNSS не повинна перевищувати 20 км і кількість базових станцій залежить від площі знімання. У нашому випадку, оскільки територія сканування порівняно невелика за площею, працювала одна базова станція, а максимальна віддаль від крайньої точки сканування до станції не перевищувала 1 км в режимі РРК.

Точність лазерного сканування визначається багатьма чинниками, які можна розділити на дві групи:

1. Геометричні, що безпосередньо пов'язані з точністю визначення координат точок.
2. Фізичні, які впливають на послаблення лазерного сигналу, тим самим впливаючи на точність координат.

Висота польоту є основним параметром, від якого залежать як геометричні, так і фізичні чинники. Вона також визначає відстань до об'єкта, оскільки зі збільшенням відстані потрібно збільшувати потужність лазера для вимірів. Крім того, зі збільшенням відстані зменшується частота повторення імпульсів лазерним сканером. Важливо зазначити, що зі збільшенням відстані до об'єкта збільшується розмір плями на поверхні землі і втрати сигналу через атмосферу, що призводить до зниження точності та інформативності даних лазерного сканування [121, 132].

Опрацювання даних лідарного сканування з БПЛА лідаром DJI P2 в програмі Terra Scan є комплексним процесом. В програмі Terra Scan використано функції для опрацювання даних лідару, такі як фільтрація шуму, сегментація, класифікація точок тощо. Використовуючи опрацьовані дані лідару, генеруються

ЦМР і ЦМП для аналізу та використання в подальших додатках. Як і в аерозніманні, при лідарному скануванні використана 6-и градусна проекція Гауса-Крюгера, система координат – УСК 2000, 5 зона. Для підвищення точності використано прив'язку все тих же 3 опорних точок по краях дослідного полігону, що були відзняті ГНСС зніманням (рис.4.9). Це було виконано для даних, отриманих з обох сканерів.

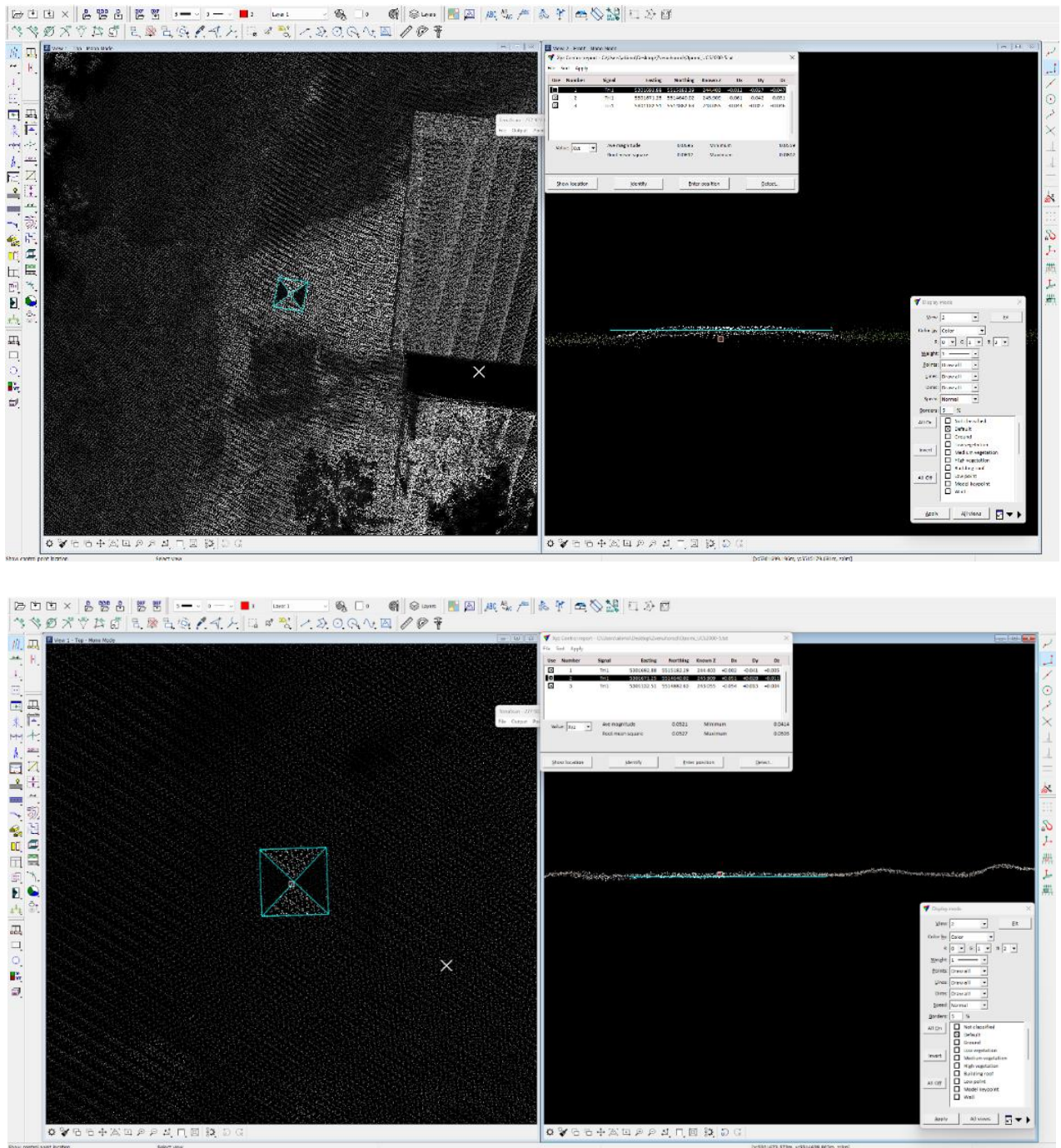


Рис.4.9. Прив'язка опорних точок в програмі Terra Scan

При скануванні повітряним лазерним сканером DJI Zenmuse L2, отримано наступний список контрольних точок з хмари точок (табл.4.3), а також, СКП контрольної точки хмари точок (табл.4.4).

Таблиця 4.3.

Список контрольних точок з хмари точок при сканування лідаром DJI Zenmuse L2

Ідентифікатор	Широта контрольної точки, м	Довгота контрольної точки, м	Висота контрольної точки, м	Висота реконструкції, м	Різниця висот, м	Максимальна різниця по висоті, м	Середня різниця по висоті, м	Стандартне відхилення висоти реконструкції, м	Різниця по висоті RMSE	Відбиття, %
T1	5301692.88	5515182.28	244.40	244.40	-0.0021	0.1008	-0.0021	0.0237	0.0237	48
T2	5301671.25	5514640.02	245.91	245.90	-0.0078	0.1020	-0.0078	0.0271	0.0281	50
T3	5301132.50	5514882.62	243.06	243.06	0.0100	0.0627	0.0100	0.0190	0.0215	53

Таблиця 4.4.

СКП контрольної точки хмари точок

Параметри	Кількість контрольних точок, шт	Середня висота, м	Середня різниця висот, м	Мін. різниця висот, м	Макс. різниця висот, м	Середнє абсолютне значення різниці висот, м	СКП, м	Стандартне відхилення, м
Значення	3	244.45	0	-0.0078	0.0100	0.0067	0.0074	0.0091

Всього було використано 3 контрольні точки. Середня висота контрольних точок складає 244.45 м. Цей показник використовується як базова висота для порівняння висот. Середня різниця висот дорівнює 0 м, що свідчить про те, що в середньому різниці між вимірними та еталонними висотами немає. Мінімальна різниця висот: -0.0078 м, тобто найменше відхилення висоти в бік зменшення. Максимальна різниця висот: 0.0100 м, тобто найбільше відхилення висоти в бік збільшення.

Середнє абсолютне значення різниці висот: 0.0067 м, що вказує на те, що в середньому абсолютне відхилення від еталонної висоти становить 0.0067 м. СКП дорівнює 0.0074 м. Цей показник враховує як позитивні, так і негативні відхилення від середньої різниці висот, надаючи оцінку розсіювання висотних

даних. Стандартне відхилення становить 0.0091 м, що показує ступінь розсіювання даних навколо середньої різниці висот.

Показники СКП та стандартного відхилення є досить малими (0.0074 м та 0.0091 м відповідно), що свідчить про високу точність висотних даних, отриманих під час повітряного лідарного знімання. Максимальні відхилення в межах -0.0078 м до 0.0100 м є дуже малими, що підтверджує високу точність лідарних даних. Низькі значення середнього абсолютного відхилення (0.0067 м) та стандартного відхилення (0.0091 м) свідчать про невеликі коливання між окремими вимірюваннями, що забезпечує надійність даних. Ці результати вказують на те, що повітряне лідарне знімання забезпечує високу точність висотних даних з мінімальними відхиленнями, що є важливим для точних геодезичних, землевпорядних та картографічних робіт.

Після фільтрації шуму, сегментації і класифікації точок, отримано наступну ЦМП (рис.4.5)

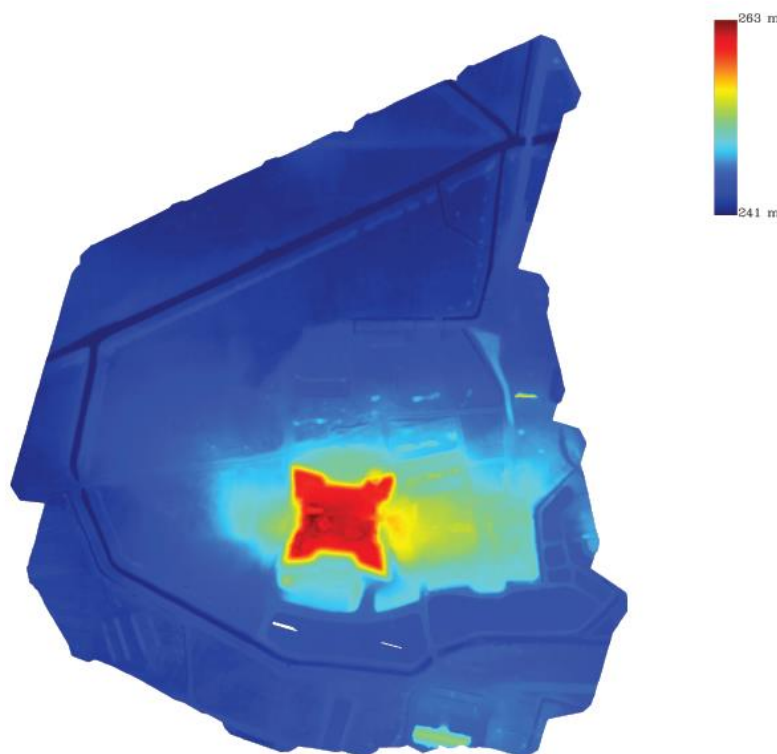


Рис.4.10. Цифрова модель поверхні, отримана за даними лідарного знімання з повітряного сканера DJI Zenmuse L2

Технологія опрацювання даних повітряного сканування лідаром CHCNAV Alpha Air 450 аналогічна, як і для лідару DJI Zenmuse L2. Наведемо деякі точнісні характеристики, які отримано внаслідок цього опрацювання.

В таблиці 4.10 наведені розраховані середні квадратичні похибки положення за внутрішньою сходимістю для 14 маршрутів.

Таблиця 4.5.

СКП положення маршрутів за внутрішньою сходимістю

Маршрут	Схід (сер), м	Північ (сер), м	Висота (сер), м	Схід (макс), м	Північ (макс), м	Висота (макс), м
1	0.00450	0.00502	0.00700	0.00500	0.00600	0.00700
2	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
3	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
4	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
5	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
6	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
7	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
8	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
9	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
10	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
11	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
12	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
13	0.00450	0.00500	0.00700	0.00500	0.00500	0.00700
14	0.00450	0.00503	0.00700	0.00500	0.00600	0.00700

На рис. 4.11 представлено графік візуалізації СКП.

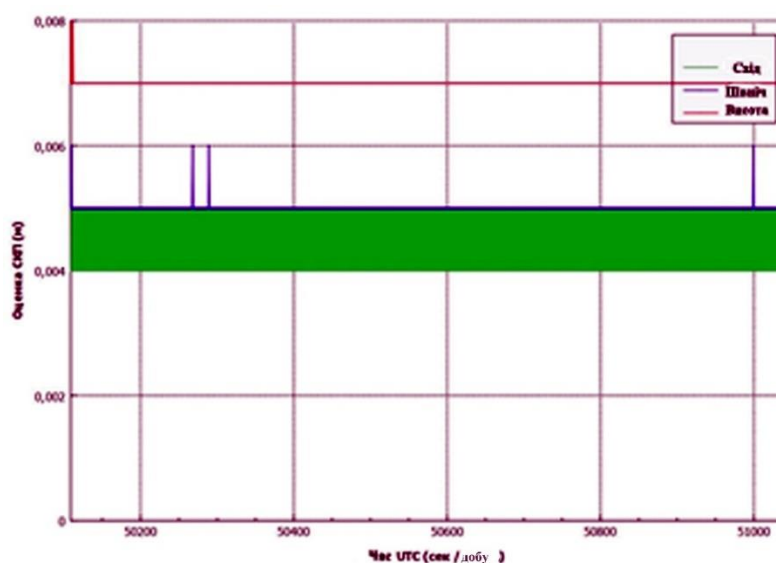


Рис.4.11. Графік СКП положення маршрутів за внутрішньою сходимістю

Середні значення похибок показує дуже низькими значення для всіх трьох компонентів (схід, північ, висота). Це свідчить про високу точність лідарних даних. Похибки є однорідними по всіх маршрутах, що вказує на стабільність і надійність системи вимірювання. Наприклад, похибка по осі схід (сер) незмінна для всіх маршрутів, а по осі висота (сер) також залишається стабільною на рівні 0.007 м. Максимальні значення похибок також є достатньо низькими і стабільними, що підтверджує високу якість даних. Найбільше значення похибки (0.006 м) по осі північ є лише на деяких маршрутах, що незначно відрізняється від основного значення (0.005 м).

В таблиці 4.6 подано СКП орієнтації маршрутів за внутрішньою сходимістю. А також їх візуалізація у вигляді графіка (рис.4.12).

Таблиця 4.6.

СКП орієнтації маршрутів за внутрішньою сходимістю

Маршрут	Крен (сер), мін	Тангаж (сер), мін	Курс (сер), мін	Крен (макс), мін	Тангаж (макс), мін	Курс (макс), мін
1	0.21683	0.12600	0.79911	0.43800	0.12600	0.95400
2	0.14520	0.12600	0.73380	0.20400	0.12600	0.75600
3	0.16395	0.12467	0.73829	0.25200	0.12600	0.78600
4	0.23775	0.12401	0.77590	0.39600	0.12600	0.87000
5	0.18840	0.12551	0.76879	0.34800	0.12600	0.84600
6	0.19470	0.12600	0.78314	0.34200	0.12600	0.85800
7	0.19161	0.12597	0.77408	0.32400	0.12600	0.84600
8	0.18223	0.12600	0.75825	0.30600	0.12600	0.82800
	0.19660	0.12600	0.76109	0.37800	0.12600	0.86400
10	0.18751	0.12586	0.77244	0.36000	0.12600	0.85800
11	0.25467	0.12631	0.86004	0.37800	0.13200	0.91200
12	0.17140	0.12668	0.89998	0.31200	0.13200	0.97200
13	0.25866	0.12708	1.01430	0.48000	0.13200	1.12200
14	0.20374	0.13147	1.14985	0.58200	0.13200	1.42200

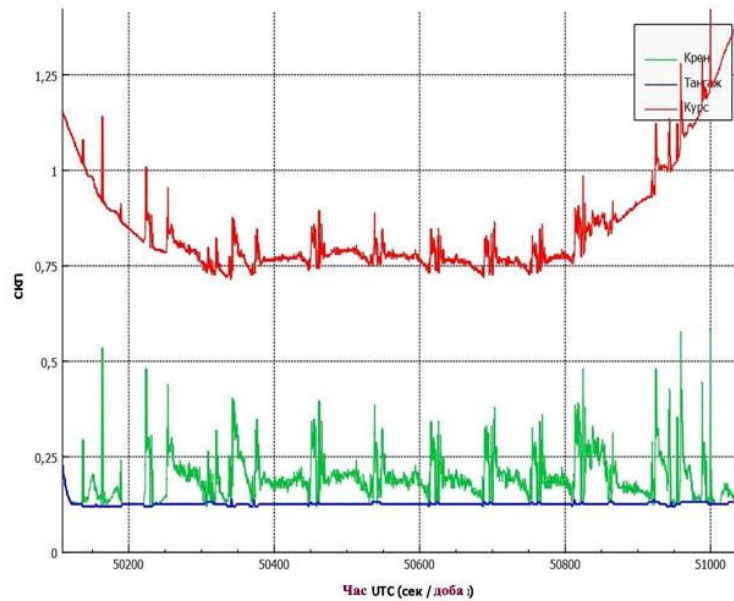


Рис.4.12. Графік СКП орієнтації маршрутів за внутрішньою сходимістю

Похибки крену, тангажу та курсу БПЛА показують, що всі три параметри є досить точними, але мають певні коливання між маршрутами. Найменші похибки спостерігаються у маршруті 2, тоді як найбільші похибки переважно є у маршруті 14. Тангаж має найменші коливання і показує найбільшу однорідність серед усіх маршрутів. Параметри крену та курсу мають більші коливання, особливо курс, який має значні максимальні похибки у деяких маршрутах (наприклад, маршрут 14). Максимальні значення похибок крену та курсу значно відрізняються між маршрутами, що вказує на можливу необхідність покращення методики знімання або опрацювання даних у певних умовах.

Повітряне лідарне знімання забезпечує високу точність орієнтації з відносно малими похибками у крені, тангажі та курсі. Однак, існують окремі маршрути з більшими максимальними похибками, що потребують уваги для забезпечення стабільності та точності даних. Загальна тенденція показує, що точність орієнтації є на прийнятному рівні для наших досліджень.

Точність побудови ЦМР залежить від точності складових апаратури – лазерного віддалеміра, сканувального механізму, інерційної навігаційної системи та системи ГНСС [3].

Похибку вимірювання віддалі оцінюють величиною 0,02 – 0,05м. Вимірювання координат точки S за допомогою ГНСС (та наявності базової станції) оцінюють СКП 0,05 – 0,07м. Практично ці дві величини не залежать від висоти польоту. Похибка, яку вносить INS, спричинює більшу похибку визначення лінійних елементів точки за більших висот знімання. Виключаючи систематичні похибки, повітряне лазерне сканування має точність визначення позначок висот точок моделі 0,15м. За низьких висот цю похибку зменшують до 0,1м.

Додатково на точність ЦМР вплине щільність, а також коригування позначок висот ділянок із рослинністю, щільною забудовою та іншими об'єктами. З урахуванням цих елементів точність визначення висотного положення ЦМР дорівнюватиме:

$$m_z = 0,15 \div 0,25\text{м.} \quad (4.10)$$

За статистичними дослідженнями лісистих регіонів чи регіонів із значними нахилами схилів ця помилка становитиме:

$$m_z = 0,18 + 1,2 \cdot tg\alpha\text{м.} \quad (4.11)$$

Встановлено, що втрати імпульсів в лісистій місцевості через крони дерев становлять не менше 25%.

4.3. Дослідження та порівняння ЦМР тестової ділянки за даними аерознімання та лідарного знімання

Дослідження та порівняння території за допомогою аерознімання та лідарного знімання виявляється дуже цікавим та інформативним процесом. Аерознімання, яке використовує різноманітні сенсори від камер до інфрачервоних пристроїв, дозволяє отримати детальні зображення поверхні землі з різних ракурсів. З іншого боку, лідарне знімання здатне надати тривимірні моделі території з високою точністю за рахунок вимірювання відстаней до об'єктів за допомогою лазерних променів [287].

Порівняння даних, отриманих за допомогою цих методів, може виявити нюанси та показати різницю в підходах. Наприклад, аерознімання може забезпечити більшу поверхневу деталізацію, але при цьому меншу точність вимірювання висот. З іншого боку, лідар забезпечить точні тривимірні дані, але може бути обмеженим у видимості та залежні від погодних умов.

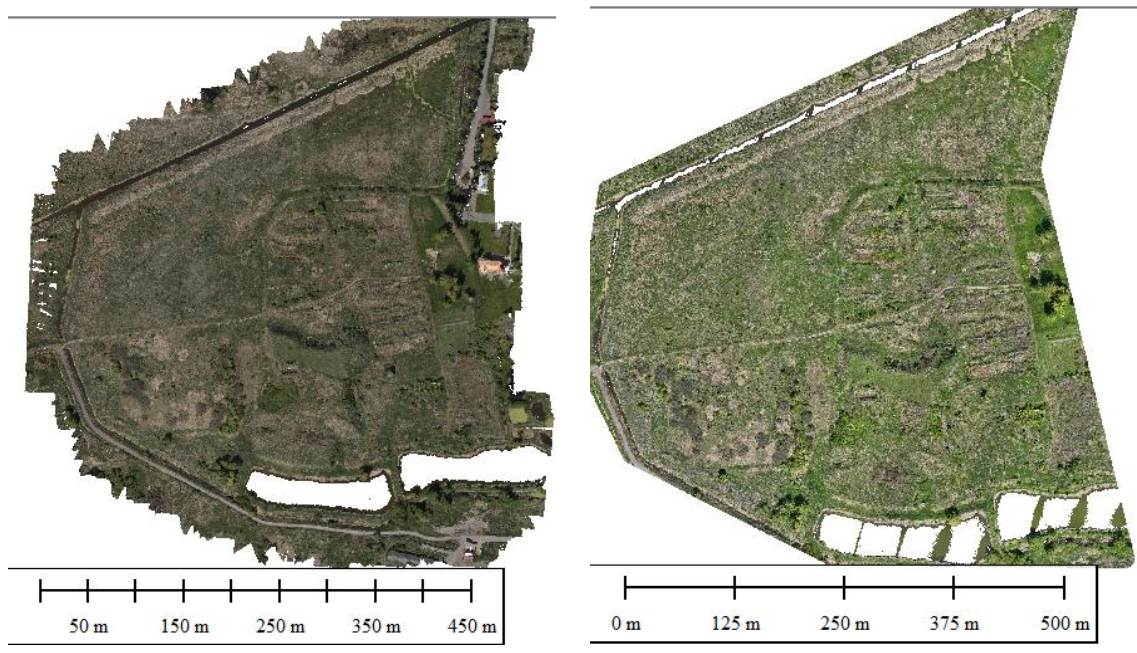
Порівняння цих двох методів дозволить здійснити глибокий аналіз території, оцінити їхню взаємодоповненість та визначити оптимальний підхід для конкретних завдань. Наприклад, для деяких досліджень може бути важливою детальна поверхнева інформація, тоді як для інших - точні тривимірні дані [157].

Результати такого порівняння можуть бути корисними для різних галузей, від урбаністичного планування до наукових досліджень у геології, геодезії, землеустрої та екології. Вони допоможуть визначити найбільш ефективний та точний спосіб аналізу та дослідження територій залежно від поставлених завдань і потреб.

Порівняння цифрових моделей поверхні (ЦМП) можна виконати кількома способами в залежності від мети аналізу і наявних інструментів. Розглянемо декілька підходів для порівняння ЦМП:

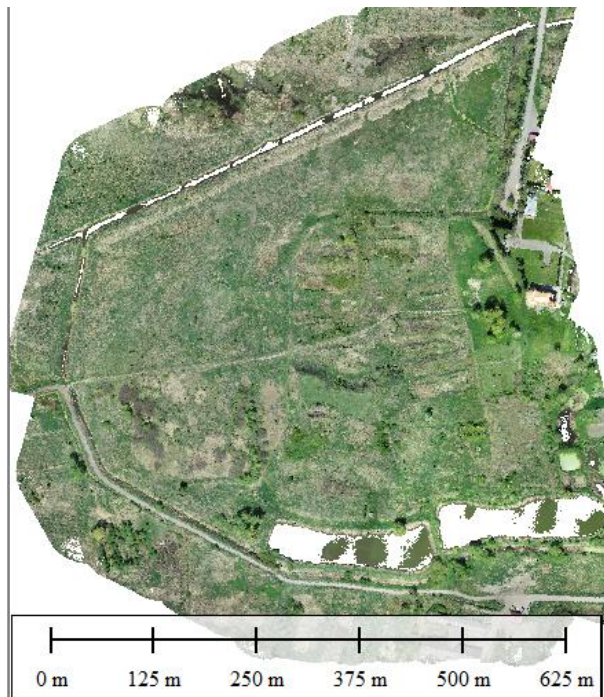
Візуальне порівняння

Для візуального порівняння використано хмари точок, отримані з даних аерознімання і повітряного лазерного сканування двома різними сканерами (рис.4.13).



a

б



в

Рис.4.13. Хмари точок, отримані за допомогою: а) аерознімання з БПЛА камерою DJI Zenmuse P1; б) лідарного знімання з БПЛА сканером DJI Zenmuse L2; в) лідарного знімання з БПЛА сканером CHCNAV Alpha Air 450

За даними на рис.4.13 в програмному пакеті GlobalMapper побудовані цифрові моделі поверхні (ЦМП) (рис.4.14).

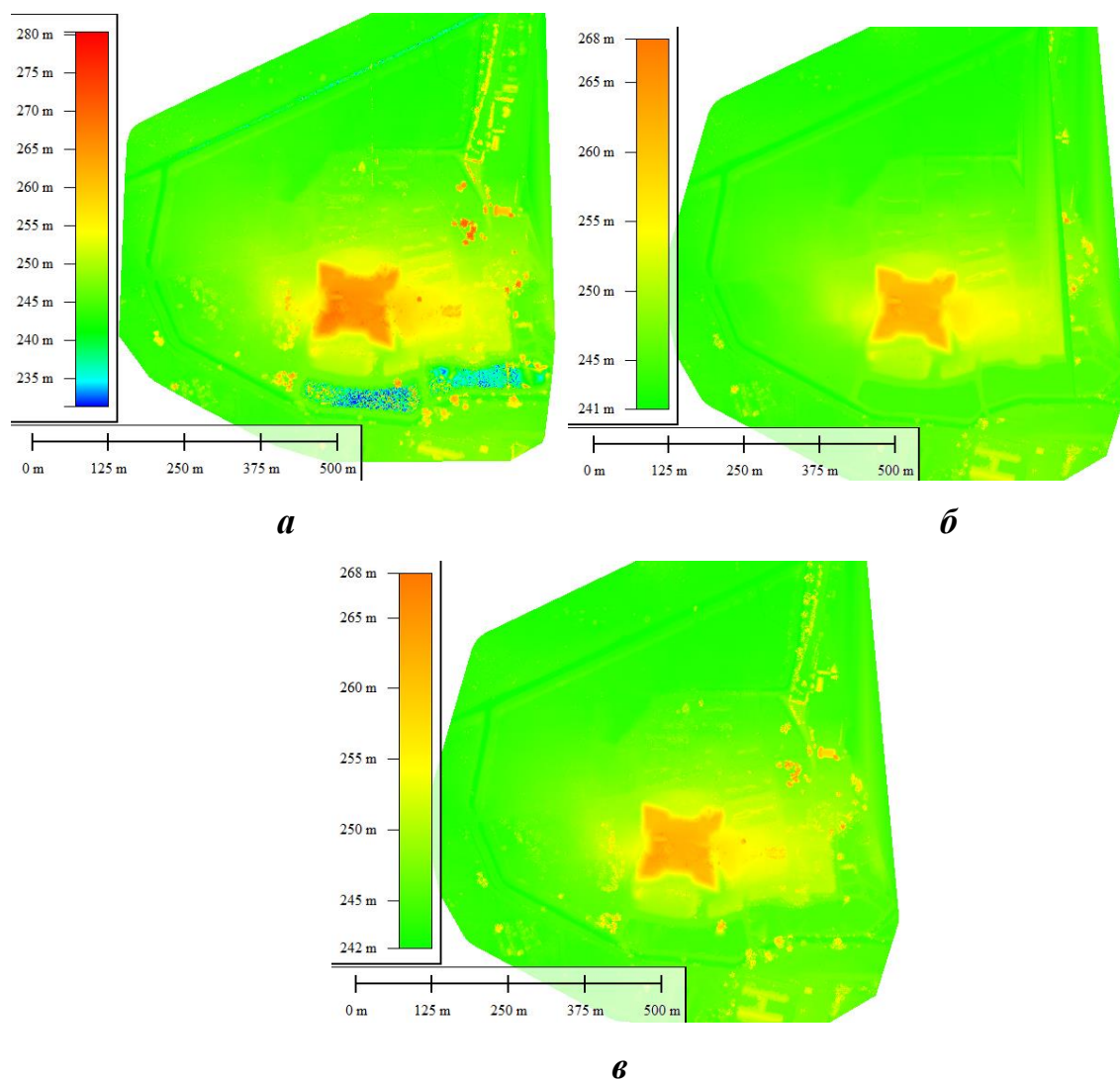


Рис.4.14. ЦМП, отримані за допомогою: а) хмари точок з аерознімання з БПЛА камерою DJI Zenmuse P1; б) хмари точок з лідарного знімання з БПЛА сканером DJI Zenmuse L2; в) хмари точок з лідарного знімання з БПЛА сканером CHCNAV Alpha Air 450

Як видно з рисунку ЦМП отримана за даними аерознімання з БПЛА містить найбільше хибних точок, особливо тих, що відносяться до класу гідрографії на території ставків і потічка по периметру території об'єкту. ЦМП, отримані за даними двох лідарів містять приблизно однакові елементи за однією відмінністю, що ЦМП, отримана за даними DJI Zenmuse L2 була «обрізана» по периметру об'єкту на етапі опрацювання і не містить дерев, що знаходяться за територією об'єкта. Висотні показники об'єктів в усіх трьох ЦМП на одному рівні, за однією відмінністю висоти дерев за даними аерознімання, яка складає

більше 270м над рівнем моря. Це може бути пов'язано з кращою проникністю лазерних променів, що має менше відбиття від листя ніж аерознімання.

Відмінності між ЦМП візуально добре демонструються при використанні елемента «шторка», що дозволяє накладати дані і переглядати та порівнювати зміщуючи верхній шар повзунком (рис.4.15) [210].

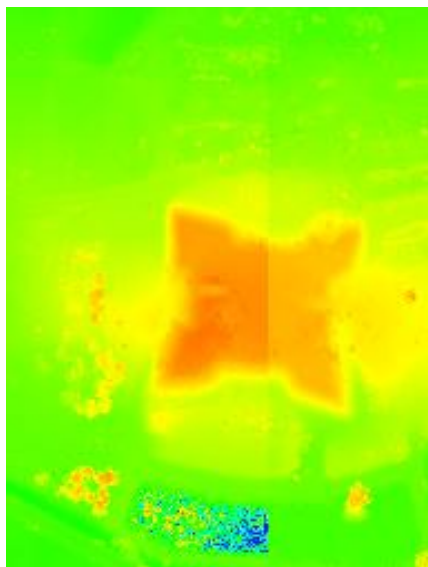


Рис.4.15. Порівняння ЦМП за допомогою функції «шторка»

Віднімання моделей (Difference Mapping)

Для методу віднімання моделей використано попарне опрацювання ЦМП в наступному порядку: аерознімання-лідар1, аерознімання-лідар2, лідар1-лідар2. При цьому програма віднімає від першої ЦМП об'єкти які мають однакові характеристики як планові так і висотні. Внаслідок цього отримано 3 моделі різницевих показників. Але оскільки моделі аерознімання-лідар1, аерознімання-лідар2 виявилися фактично тотожними на рис.4.16 подано тільки дві моделі: аерознімання-лідар1, лідар1-лідар2.

На рис.4.16а можна побачити, що на різницевій моделі залишилися помилкові елементи гідрографії з даних аерознімання, дерева, і навіть блідим зеленим кольором виділено підвищення залишків замку, що вочевидь відрізнялось по висоті, оскільки знову ж таки метод лідарного знімання виявився більш точним в відбивній здатності об'єктів. Загальна територія і об'єкти, що співпали, були відняті і ця територія заповнена блакитним тлом з 0 значенням висоти. На рис.4.16б можна побачити, що між даними лідарного знімання з

різних систем, різниця спостерігається тільки в елементах насаджень, що вочевидь пояснюється зафіксованою різною висотою об'єктів. Частково це пояснюється відсутністю цих елементів, які знаходяться поза межами об'єкту на даних, отриманих з сканера DJI Zenmuse L2. Ці об'єкти висотою порядку 10-15 метрів.

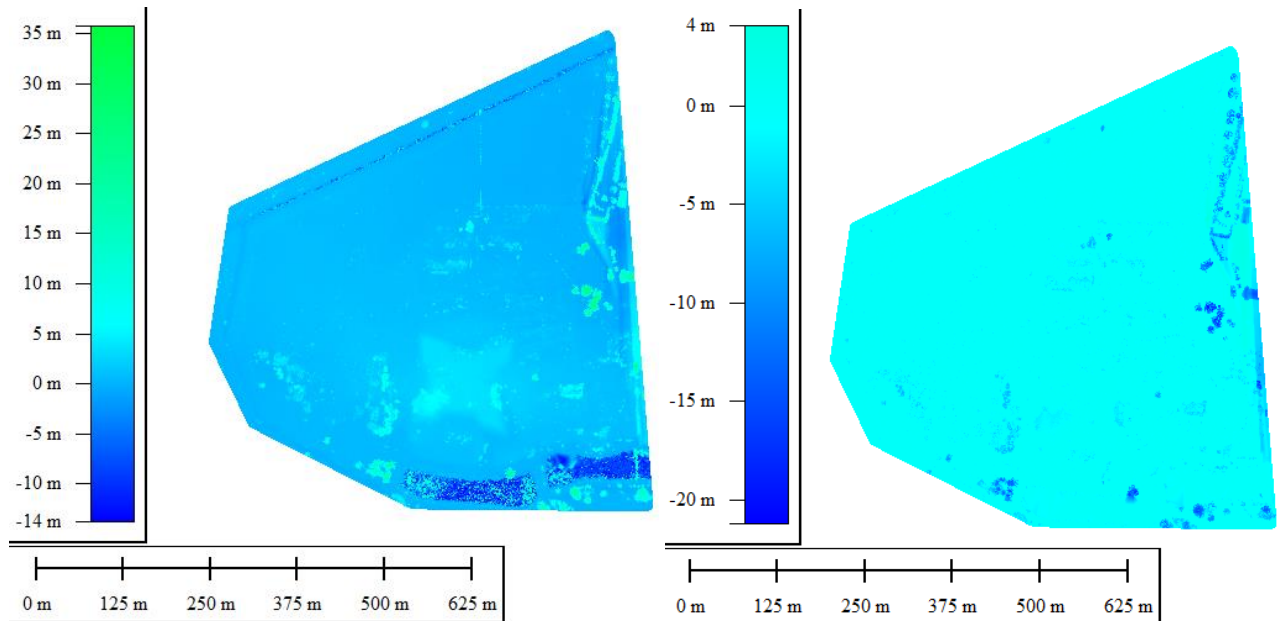


Рис.4.16. Різниця ЦМП згенеровані в ПП GlobalMapper для шарів ЦМП:

а) аерознімання і лідарного знімання сканером DJI Zenmuse L2; б) лідарного знімання сканерами DJI Zenmuse L2 і CHCNAV Alpha Air 450

Аналіз профілів ЦМП

Для аналізу профілів, побудовано 2 профілі на ЦМП, що мають напрями: Південний Захід – Північний Схід, Північний Захід- Південний Схід (рис.4.17).

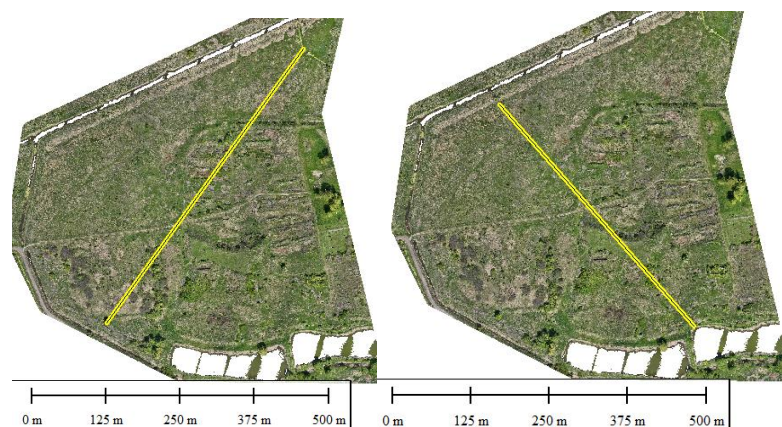


Рис.4.17. Побудовані два профіля на ЦМП

З цих профілів зняті показники для ЦМП побудованої за даними аерознімання (рис.4.18), за даними з лідара CHCNAV Alpha Air 450 (рис.4.19) і за даними з лідара DJI Zenmuse L2 (4.20).

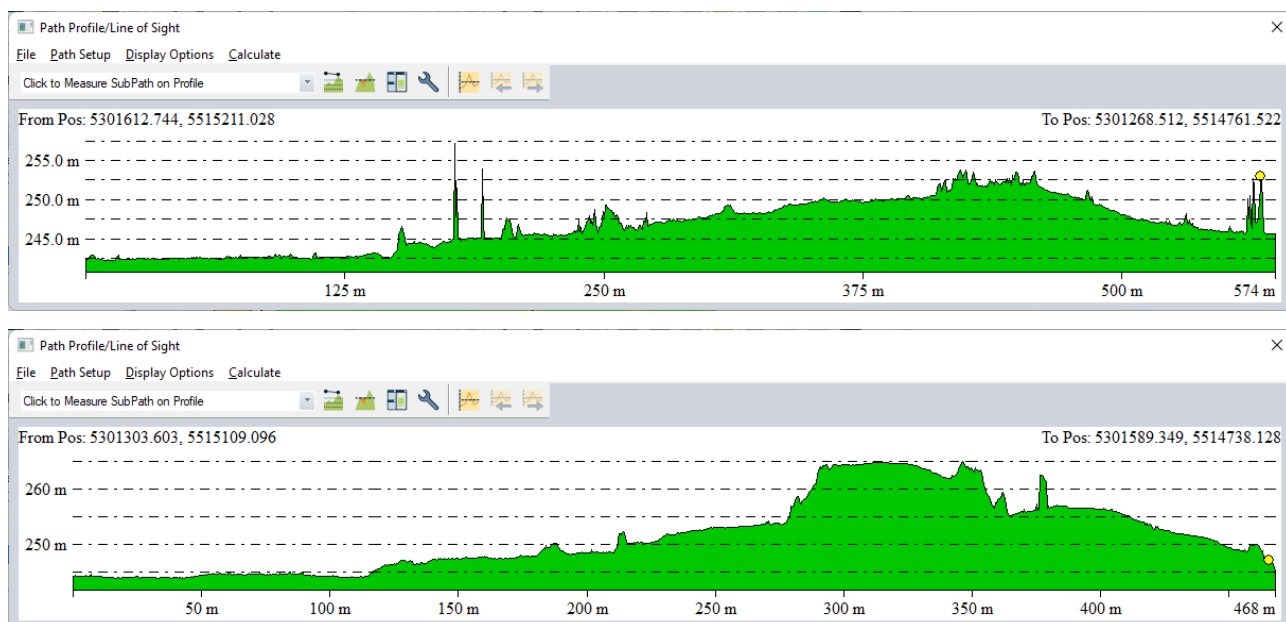


Рис.4.18. Профілі побудовані за даними аерознімання

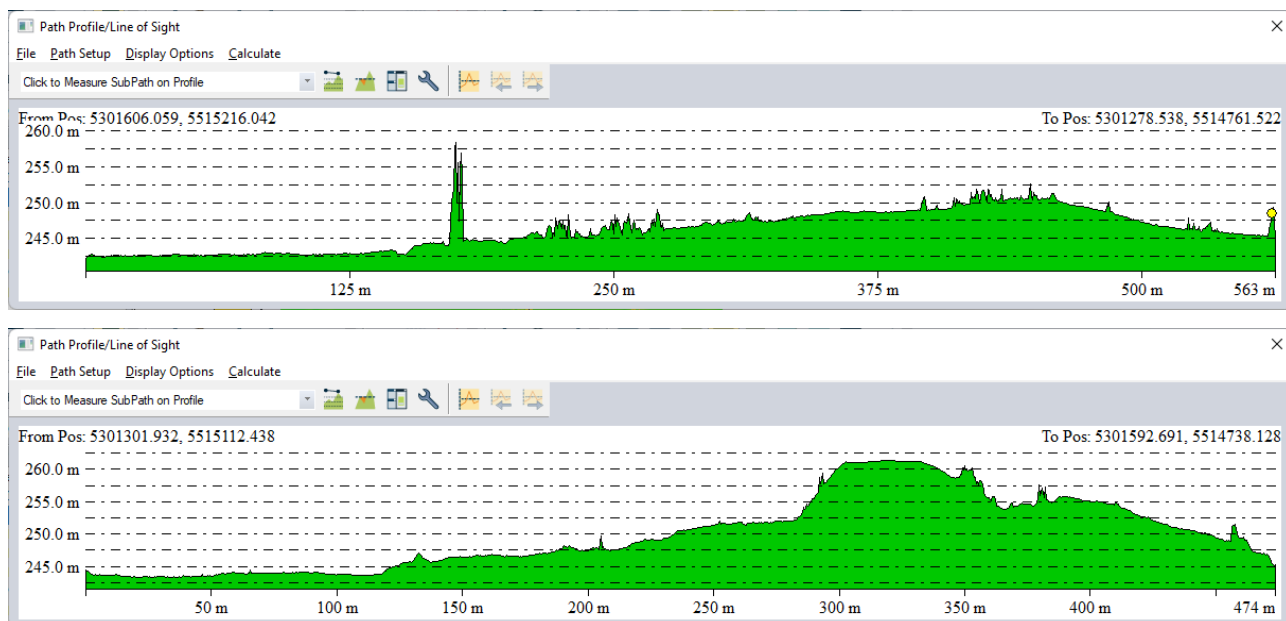
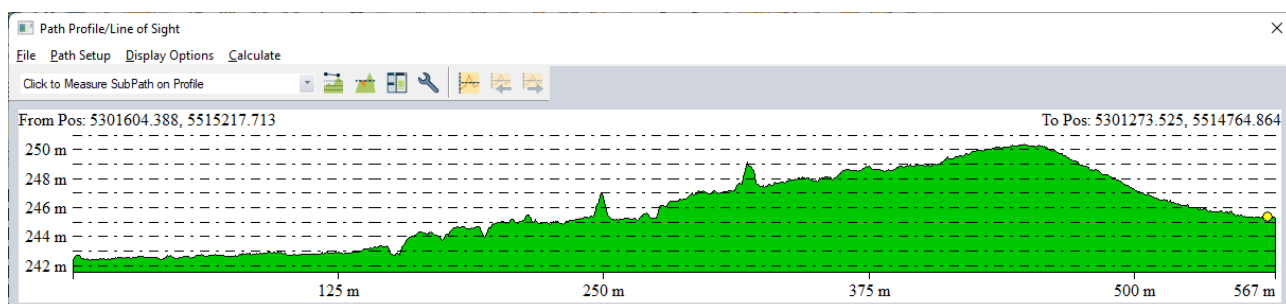


Рис.4.19. Профілі побудовані за даними лідара CHCNAV Alpha Air 450



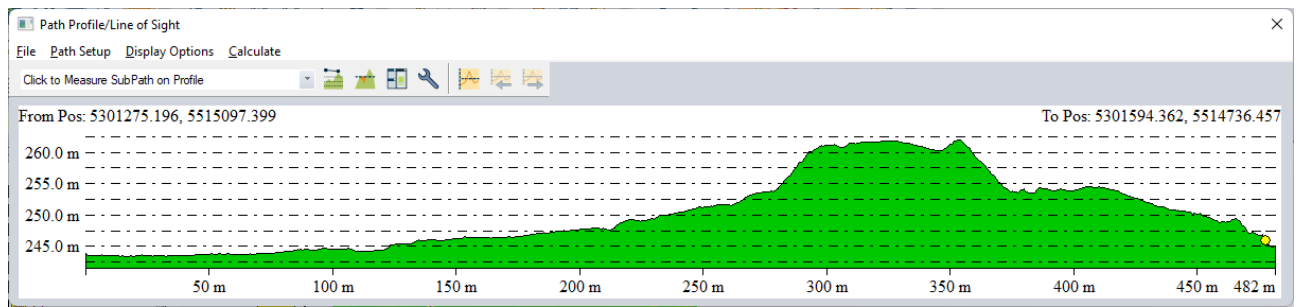


Рис.4.20. Профілі побудовані за даними лідару DJI Zenmuse L2

Із аналізу першого профілю видно, що найбільші спотворення по висоті об'єктів за даними аерознімання дають дерева, кращі показники, але теж з деякими скачками висоти дають дерева за даними лідарного сканування з CHCNAV Alpha Air 450 і найкращі показники отримано за даними лідарного сканування з DJI Zenmuse L2. Якщо говорити про другий профіль, то тут показники у всіх трьох ЦМП дещо кращі, навіть незважаючи на найвищий об'єкт, який на нього потрапляє, а саме підвищення залишків Звенигородського замку. Всі три профілі без значних спотворень, єдине, що потрібно зауважити, це те, що профілі за даними лідарного знімання є дещо плавнішими ві профілю, побудованого за ЦМП аерознімання [143].

3D-порівняння ЦМП

3D-моделі території Звенигородського городища побудовані за даними ЦМП подано на рис.4.21, 4.22, 4.23.

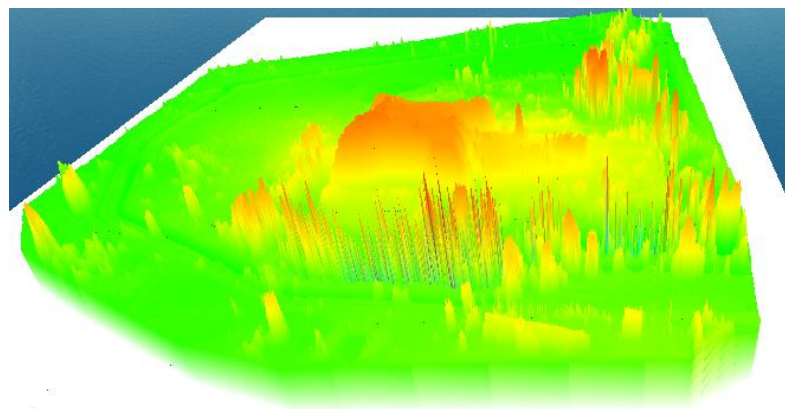


Рис.4.21. 3D-модель ЦМП території Звенигородського городища побудована за даними аерознімання

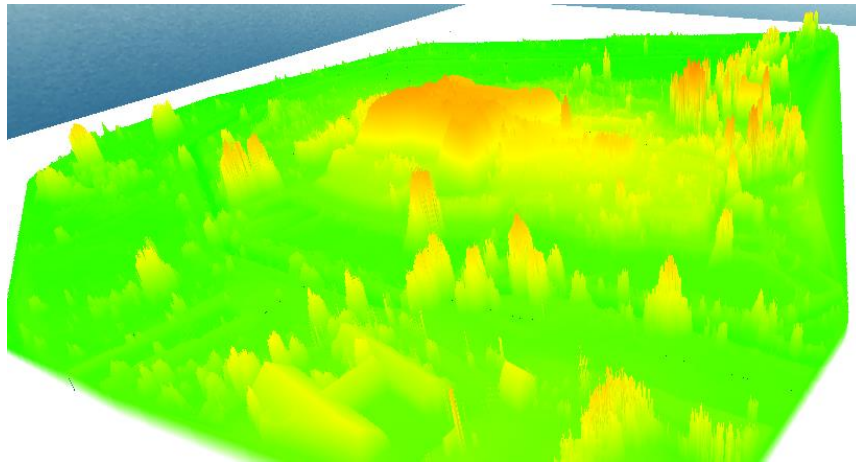


Рис.4.22. 3D-модель ЦМП території Звенигородського городища побудована за даними лідарного сканування з CHCNAV Alpha Air 450

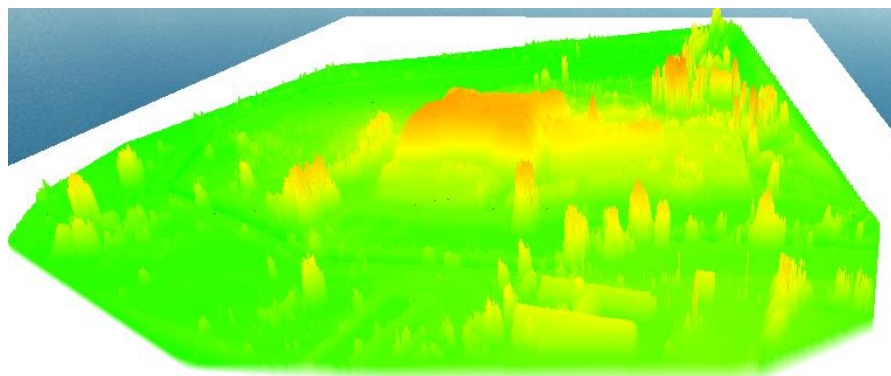


Рис.4.23. 3D-модель ЦМП території Звенигородського городища побудована за даними лідарного сканування з DJI Zenmuse L2

Аналізуючи всі три 3D-моделі, необхідно зазначити, що як і в попередніх методах аналізу, видно спотворення висот дерев на 3D-моделі ЦМП, побудованій за даними з аерознімання (рис.4.21).

3D-моделі побудовані за даними лідарного знімання з різних сканерів, фактично подібні, різниця відображена тільки в різній кількості насаджень, що вже зазначалося раніше, також деякі дерева на 3D-моделі за даними лідарного сканування з CHCNAV Alpha Air 450 мають певні спотворення по висоті, але таких елементів є тільки декілька [18].

Аналізуючи всі вищеподані методи, порівняння ЦМП, отримані з різних джерел даних, можна сказати, що найгірші показники дає модель побудована за даними аерознімання, все ж це не основне призначення даного виду робіт.

Найкращий результат показала ЦМП побудована за даними лідарного знімання з системи DJI Zenmuse L2, хоча модель, побудована за даними лідарного знімання з використанням системи CHCNAV Alpha Air 450, показала також хороші результати, однак і мала деякі спотворення певних об'єктів за висотою, що можна пояснювати різними погодними умовами сканування.

4.4. Створення концептуальної моделі використання даних ДЗЗ і георадару для вивчення земель історико-культурного призначення

Концептуальна модель - це абстрактне представлення системи або процесу, яке описує сутності (entities), їх атрибути (attributes) та зв'язки між ними (relationships). Це модель, яка описує те, що повинно бути зроблено, а не те, як це буде зроблено.

Концептуальна модель є важливою складовою при проектуванні системи або розробці програмного забезпечення. Вона дозволяє узагальнено описати структуру та поведінку системи, визначити основні елементи та їх взаємодію, що допомагає забезпечити ефективнішу розробку та підтримку системи в майбутньому. Крім того, концептуальна модель може бути використана для спілкування з клієнтом або користувачем, що допомагає уточнити вимоги та очікування щодо функціональності системи.

Концепція використання даних дистанційного зондування землі (ДЗЗ) і георадару для моніторингу земель історико-культурного призначення включає в себе використання сучасних технологій для виявлення, картографування та збереження культурних об'єктів та місць.

Ця концепція може бути корисною для археологів, істориків, географів та інших дослідників, які займаються збереженням та вивченням культурної спадщини. Вона дозволяє ефективно використовувати технології для збереження історичних та культурних цінностей на землях історико-культурного призначення.

Розроблена узагальнена концептуальна модель включає шість основних блоків, починаючи з збору даних за допомогою дистанційного зондування та зображень радіолокації землі, і закінчуючи остаточним аналізом та інтерпретацією отриманих даних (рис.4.24). Додатково узагальнена концептуальна модель включає обробку та візуалізацію даних. На цьому етапі космічні знімки опрацьовуються для отримання детальної інформації про земельні покриви, а дані радіолокації землі опрацьовуються для виявлення підземних структур, таких як фундаменти будівель або археологічні залишки. Візуалізація опрацьованих даних допомагає краще розуміти географічний контекст вивченої області. У блоку попереднього аналізу та інтерпретації даних використовуються алгоритми машинного навчання та комп'ютерний зір для класифікації земельних покривів та ідентифікації ознак, пов'язаних із історичними та культурними об'єктами. Інтерпретація результатів аналізу спрямована на виявлення земель історичної та культурної значимості, таких як місця стародавніх поселень, фортеці або археологічні пам'ятки. Етап валідації даних відбувається після класифікації зображень, коли важливо перевірити результати. Це включає порівняння класифікованих даних з валідаційним набором даних, що містить інформацію про відомі історичні та культурні об'єкти. Валідація допомагає оцінити точність та надійність класифікації та виявити потенційні помилки. Після валідації рекомендується проведення ґрунтових досліджень для детального вивчення історичних та культурних об'єктів. Це може включати відвідування місць, де виявлені потенційні об'єкти, збір додаткової інформації, археологічні розкопки або профілі радару з пенстрацією в ґрунт для отримання докладніших даних щодо структури та характеристик об'єктів. Наступним кроком є створення карт, що зображують землі історичної та культурної значимості на основі класифікованих даних та результатів ґрунтових досліджень. Це може бути зроблено шляхом створення векторних або растрових шарів, що показують місця та типи історично та культурно значимих об'єктів на карті. Остаточний етап включає аналіз та інтерпретацію отриманих результатів. Це може включати виявлення

закономірностей, взаємозв'язків та тенденцій у розподілі земель історичної та культурної значимості, а також встановлення значення та статусу виявлених об'єктів.

Детальна концептуальна модель надає докладний опис кожного етапу дослідження (рис.4.25). Вона включає збір, аналіз та інтерпретацію картографічних матеріалів та даних дистанційного зондування, а також розгалуження на паралельні процеси обробки космічних радарних зображень та отримання інтерферограм, а також отримання ортофотопланів та хмар точок з аерознімків та даних лідару на БПЛА (хоча в цьому прикладі дослідження ми фокусуємося лише на радіолокації та зображеннях радару з penetрацією в ґрунт, концептуальна модель описує застосування різних методів дистанційного та неінвазивного дослідження для комплексного вивчення об'єктів історичної та культурної спадщини). Блок обробки космічних радарних зображень та отримання інтерферограм поділяється на ручне та напівавтоматичне отримання результатів. У подальшому розробляється програмний модуль для завантаження отриманих даних та побудови загальних тривимірних моделей поверхневих і підземних елементів об'єктів історичної та культурної спадщини. Після аналізу отриманих даних вибудовується загальна дослідницька модель нерухомих об'єктів історичної та культурної спадщини, за якою слідує напівавтоматичне встановлення захисних зон для об'єктів історичної та культурної спадщини на основі отриманих даних.

Технологія реалізації концептуальної моделі передбачає використання двох типів вхідних даних: аналіз архівних повітряних фотознімків (таких як ті з епохи Другої світової війни), якщо об'єктом дослідження є, наприклад, масові могили або схожі об'єкти, які часто не зображені на картографічних матеріалах та аналіз архівних картографічних матеріалів (кадастрових планів, інших картографічних продуктів) - для інших плоских об'єктів історичної та культурної спадщини (рис.4.26). Після аналізу архівних аерознімків вони інтерпретуються через візуальний огляд виконавця або за допомогою комп'ютерного зору для виявлення потенційних зон інтересу, таких як можливі місця масових могил та

інші елементи об'єктів історичної та культурної спадщини. Якщо на цьому етапі виявлені зони інтересу, відбувається перехід до ґрунтових радарних обстежень для виявлення аномалій; в іншому випадку визначаються зони інтересу, і починається пошук космічних радарних зображень середнього або високого розрізнення, які опрацьовуються методами радарної інтерферометрії в програмних пакетах SNAP або SARscape тощо. Отримують інтерферограми, визначаються екстремальні точки вертикальних зміщень, та будуються карти вертикальних зміщень. Потім проводяться ґрунтові радарні обстеження для виявлення аномалій. Перехід до радарного зображення з пенетрацією в ґрунт також відбувається після локалізації об'єктів історичної та культурної спадщини та моніторингу змін їх меж за допомогою різних картографічних матеріалів протягом часу. Якщо ґрунтові радарні обстеження не дали результатів, дослідження припиняється; якщо аномалії виявлені, вони інтерпретуються та ідентифікуються елементи об'єктів історичної та культурної спадщини. Паралельно з цими процесами проводиться розробка програмного забезпечення для напівавтоматичного пошуку зон інтересу на радарних зображеннях з пенетрацією в ґрунт та побудови загальної тривимірної моделі за допомогою мов програмування Visual Basic або Python, а також лідарного знімання та аерознімків з БПЛА. Хмари точок опрацьовуються для створення ортофотопланів та будуються цифрові моделі поверхні або цифрові моделі рельєфу, залежно від об'єкта. Інтерпретовані аномалії з ґрунтових радарних обстежень та цифрові моделі поверхні або цифрові моделі рельєфу з БПЛА завантажуються в розроблений програмний модуль, що передбачає завантаження даних та побудову тривимірних моделей поверхневих і підземних елементів об'єктів історичної та культурної спадщини, а також аналіз та інтерпретацію елементів для включення в них відомостей, знайдених під час дослідження в межі визначених об'єктів історичної та культурної спадщини. Якщо елементи вписуються у визнані межі об'єкта, дослідження завершується; якщо ні, межі об'єктів історичної та культурної спадщини уточнюються, та пропонуються рекомендації щодо створення захисних зон [119].

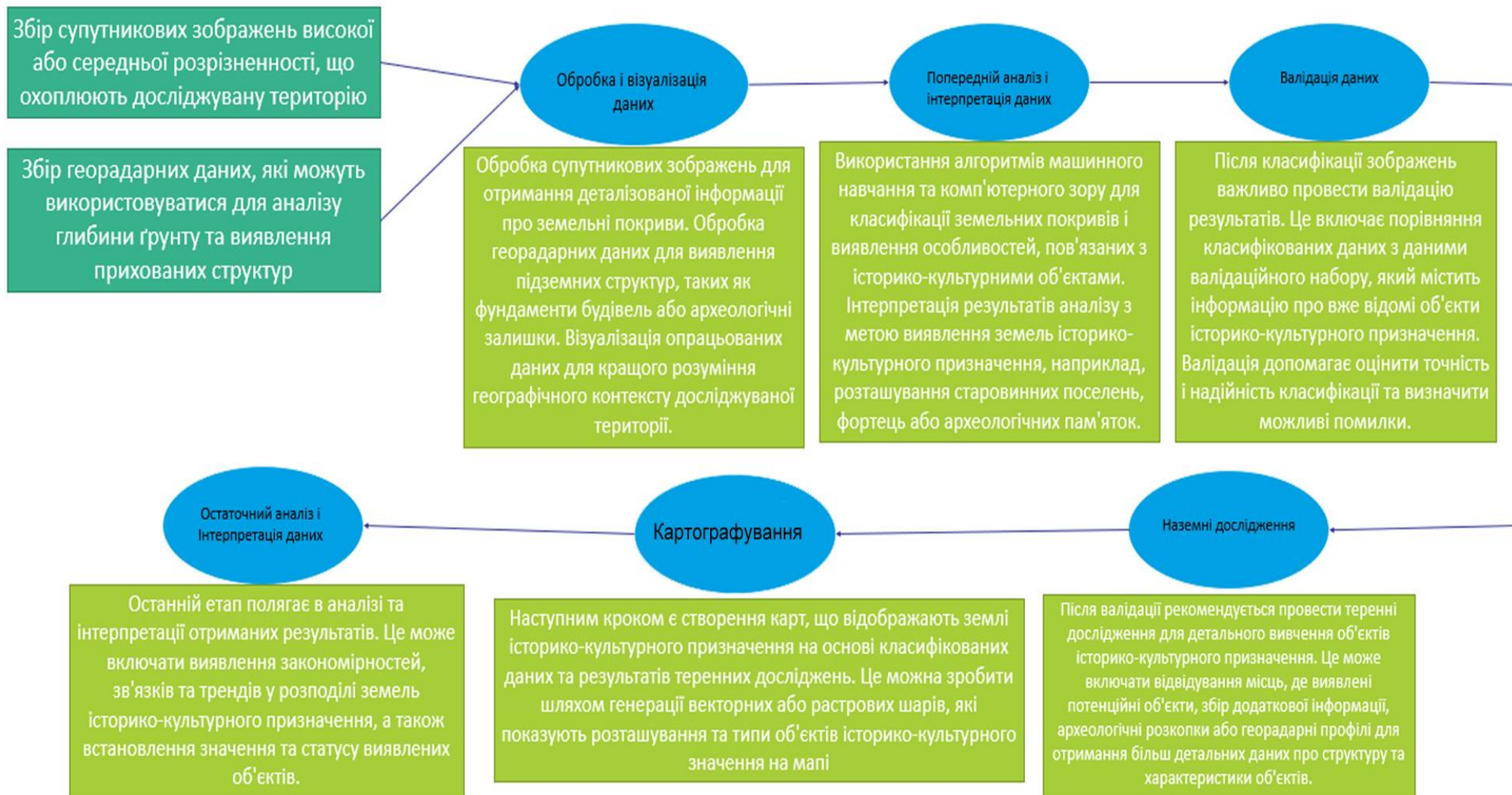


Рис.4.24. Узагальнена концептуальна модель використання даних ДЗЗ і георадару для вивчення земель історико-культурного призначення



Рис.4.25. Детальна концептуальна модель використання даних ДЗЗ і георадару для вивчення земель історико-культурного призначення

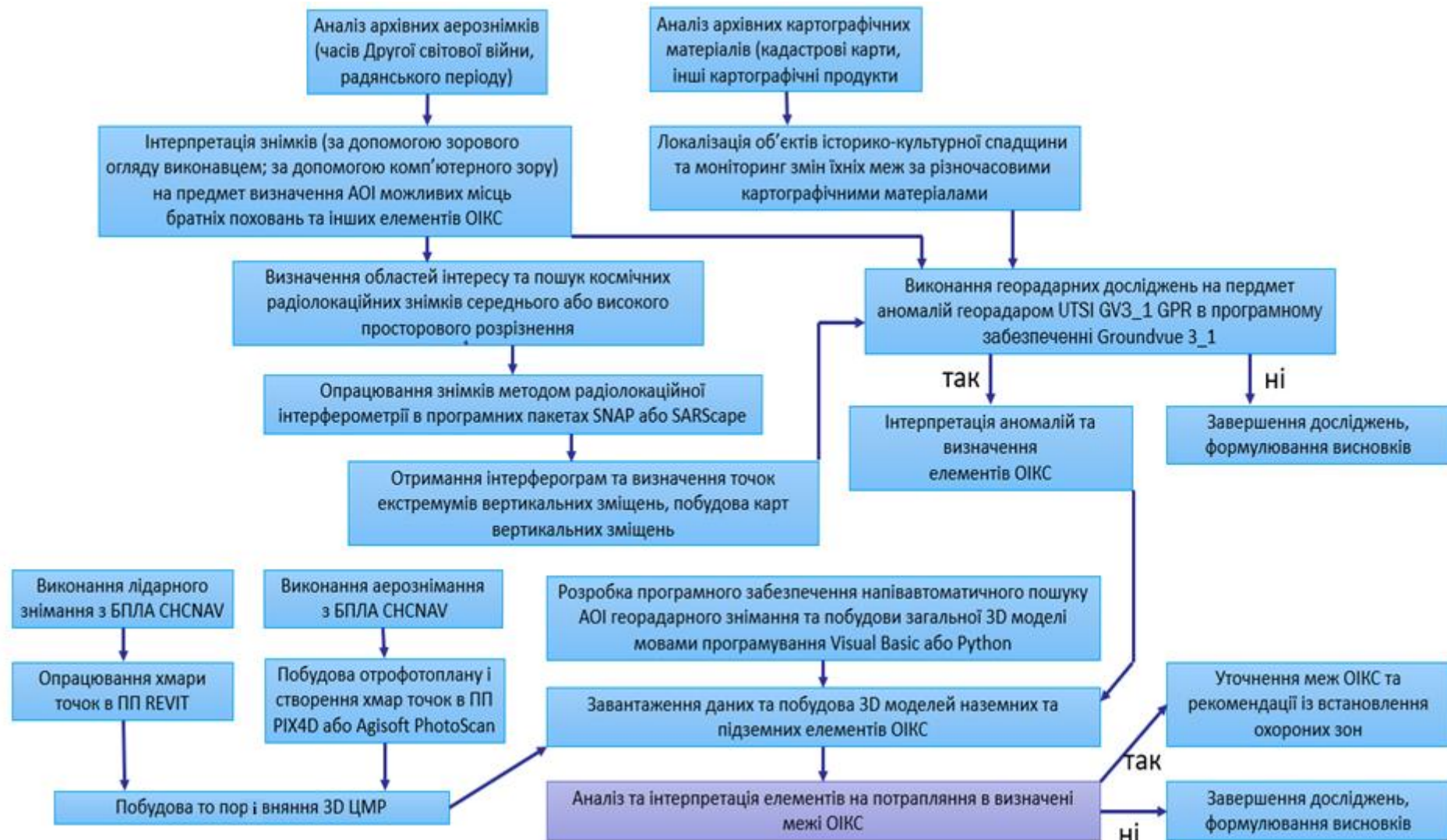


Рис.4.26. Технологічна схема реалізації концептуальної моделі використання даних ДЗЗ і георадару для вивчення земель історико-культурного призначення

Висновки та рекомендації до розділу 4

Результати аналізу передумов та тенденцій використання аерознімальних методів у межах історико-культурного заповідника «Древній Звенигород» надали можливість зробити ряд висновків:

1. За допомогою камери DJI Zenmuse P1 створено ортофотоплан і цифрову модель поверхні (ЦМП) у масштабі 1:2000 з плановою точністю $\pm 0,2$ м та висотною $\pm 0,5$ м. Оптимальна висота польоту та GSD на рівні 2 см/піксель забезпечили необхідну точність, що відповідає стандартам для моніторингу земель історико-культурного призначення.

2. Результати лідарного знімання території заповідника двома сканерами, DJI Zenmuse L2 і CHCNAV Alpha Air 450, продемонстрували високу точність даних. Середня різниця висот між контрольними та еталонними точками становила 0 м з мінімальним відхиленням $-0,0078$ м і максимальним $0,0100$ м. Отримані значення середнього абсолютного та стандартного відхилення підтвердили надійність вимірювань і високу якість даних обох сканерів. Це підкреслює важливість використання лідарних технологій для точного визначення площ земель історико-культурного призначення.

3. Порівняння ЦМП, створених за допомогою аерознімання та лідарного сканування, показало, що лідарні дані, особливо від DJI Zenmuse L2, є точнішими та стабільнішими. Аерознімання продемонструвало більшу кількість хибних точок, особливо в класі гідрографії, та значні спотворення висот дерев. Лідарне сканування забезпечило більш плавні та точні профілі, що робить його найкращим методом для створення детальної моделі поверхні.

4. Результати дослідження також підтвердили доцільність використання комплексної концептуальної моделі моніторингу земель історико-культурного призначення. Модель охоплює процеси збору, аналізу та інтерпретації даних дистанційного зондування, включаючи ортофотоплани, хмари точок з аерознімків та лідарних даних, з особливим акцентом на радіолокаційні дослідження та георадарне знімання.

5. На основі проведених досліджень, розроблена методика комплексного використання дистанційних неінвазивних методів моніторингу ОІКС також може бути застосована для ідентифікації поховань на території сучасної України, зокрема жертв російської агресії. Для цього замість архівних аерознімків можуть бути використані сучасні матеріали з безпілотників або космічні знімки.

РОЗДІЛ 5.

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ НАПІВАВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТЕЙ ІНТЕРЕСУ ТА СТВОРЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ 3D-МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ ІСТОРИКО- КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

Розробка програмного забезпечення для напівавтоматичного опрацювання геопросторових даних є важливим напрямком в сучасній науці та індустрії. Ця технологія здатна значно спростити та прискорити процес аналізу геопросторових даних, що має широкі застосування в різних галузях, від геодезії, геології та археології до міського планування та обліку ресурсів.

Завдяки програмному забезпеченню для визначення областей інтересу напівавтоматично, дослідники та фахівці можуть ефективно аналізувати великі обсяги геоданих та відокремлювати області, які потребують подальшого дослідження чи уваги. Це дозволяє значно зменшити час та зусилля, витрачені на ручне або повністю автоматичне аналізування даних [39, 64, 112].

Створення загальної 3D-моделі за допомогою цього програмного забезпечення відкриває нові можливості для візуалізації та дослідження географічних об'єктів.

5.1. Розробка алгоритмів створення програмного забезпечення для напівавтоматичного визначення ділянок досліджень та відображення загальної 3D-моделі ЦМР і георадарного знімання

Створення програмного забезпечення для напівавтоматичного визначення ділянок досліджень та відображення загальної 3D-моделі ЦМР та георадарного знімання вимагає розробки відповідних алгоритмів та використання відповідних технологій.

Запропонуємо загальний алгоритм для створення програмного забезпечення для напівавтоматичного визначення ділянок досліджень та відображення загальної 3D-моделі ЦМР на основі георадарного знімання:

➤ Підготовка даних:

- необхідно зібрати та обробити дані георадарного знімання, включаючи фільтрацію шуму та усунення артефактів;
- необхідно зібрати інші доступні дані, такі як геодезичні дані або дані від супутникових систем позиціонування (наприклад, GPS), якщо це необхідно.

➤ Сегментація областей інтересу:

- використання методів обробки зображень та машинного навчання для сегментації георадарних зображень і виділення областей, що вимагають уваги. Це може включати виявлення аномальних зон, таких як підземні структури чи об'єкти.

➤ Класифікація ділянок:

- використання алгоритмів машинного навчання для класифікації сегментованих ділянок на основі їх характеристик та зіставлення з відомими шаблонами або класами. Це може включати виявлення різних типів підземних структур або природних формацій.

➤ Створення 3D-моделі:

- використання інформації з сегментації та класифікації для створення загальної 3D-моделі ЦМР. Це може бути здійснене за допомогою методів реконструкції 3D або об'єднанням даних з різних джерел.

➤ Візуалізація та аналіз результатів:

- розробка інструментів для візуалізації 3D-моделі та результатів аналізу;
- необхідно надати можливість користувачам взаємодіяти з моделлю, відображати різні шари інформації, вимірювати відстані та інше.

➤ Користувацький інтерфейс:

- розробка інтерфейсу користувача для зручного доступу до функцій програми, вибору параметрів та відображення результатів.

➤ Тестування та вдосконалення:

- проведення тестування програмного забезпечення на реальних даних та користувацьких вимогах;
- внесення виправлення та вдосконалення на основі отриманих результатів.

Цей алгоритм надає загальний огляд процесу розробки програмного забезпечення для аналізу георадарних даних та створення 3D-моделі ЦМР.

Далі запропонуємо детальну технологію побудови і роботи розробленого модуля 3DDEM&RADAR, що складається з трьох функціональних блоків: визначення ділянок з інтерферограм (для подальшого геофізичного або археологічного опрацювання); побудова загальної 3D ЦМР (що складається з наземних і підземних елементів ОІКС); уточнення меж об'єктів історико-культурної спадщини (у випадку віднайдення додаткових підземних елементів та побудова охоронної зони ОІКС) [119, 120].

Отже, реалізація першого функціонального блоку, який відповідає за визначення ділянок на інтерферограмі, передбачає наступні кроки. По-перше, проводиться завантаження інтерферограми за допомогою кнопки `CommandButton`. Потім відбувається аналіз інтерферограми, при якому модуль перевіряє значення вертикального зміщення в кожній комірці растра. Далі виконується виділення ділянок екстремумів вертикальних зміщень за допомогою кнопки `CommandButton`, підсвічуючи пікселі, що належать до цих ділянок, помаранчевим кольором та групуючи їх. Після цього можна виконати формування каталогу координат за допомогою ще однієї кнопки `CommandButton`. Модуль переходить до наступного вікна, або формується каталог після виділення ділянок екстремумів вертикальних зміщень. Подальші дії включають можливість припинити виконання модуля за допомогою кнопки "Закрити вікно", або завантажити координати виділених ділянок растру у вигляді чотирьох пар координат, розділених ентером, в поле "Каталог координат" типу `Frame`. Після цього виконується збереження каталогу координат у текстовий файл з розширенням `*.txt`, а вікно можна закрити за допомогою ще однієї кнопки `CommandButton`.

Реалізація другого функціонального блоку, який відповідає за побудову загальної 3D моделі і включає наступні кроки. Спочатку відбувається завантаження 3D моделі за допомогою кнопки `CommandButton`. Далі завантажуються дані георадарного знімання за допомогою ще однієї кнопки `CommandButton`. Після цього виконується побудова загальної 3D моделі за допомогою (кнопка `CommandButton`), яка об'єднує завантажені результати опрацювання 3D моделі і георадарного знімання. Після цього можна перейти до іншого вікна. Тут можна закрити вікно за допомогою кнопки `CommandButton` або заповнити поле відкриття зображення за допомогою компоненту `PictureBox`. Потім завантажуються загальна 3D модель опрацювання попередніх даних. Наступний етап - експорт побудованої моделі у векторний формат даних за допомогою кнопки `CommandButton` [119, 120].

Реалізація третього функціонального блоку, який відповідає за уточнення меж об'єкта історико-культурної спадщини, включає такі етапи. Спочатку завантажуються загальна 3D модель за допомогою кнопки `CommandButton`. Потім завантажуються модель, експортована на попередньому етапі. Далі завантажуються існуюча межа об'єкту у векторному форматі `*.dxf` в поле завантаження даних та визначення оновлених меж і охоронної зони разом з 3D моделлю. Виконується аналіз меж за допомогою кнопки `CommandButton`. Потім проводиться накладання існуючої межі на проекцію 3D моделі. Перевіряється, чи всі елементи об'єкту потрапляють в існуючі межі. Потім, якщо підземні елементи не виходять за існуючі межі об'єкта, поле завантаження даних та визначення оновлених меж і охоронної зони заповнюється за допомогою компоненту `PictureBox`. Або перебудовується межа та визначається охоронна зона за допомогою кнопки `CommandButton`. Виконується оконтурення всіх додаткових елементів об'єкту і будується буферна зона від оновлених меж. Після цього є можливість експортувати межі і охоронні зони за допомогою кнопки `CommandButton`. Експорт в обмінний формат `*.dxf`, після чого вікно закривається за допомогою кнопки `CommandButton`.

Покрокова технологічна схема реалізації програмного модуля 3DDEM&RADAR подана на рис.5.1.

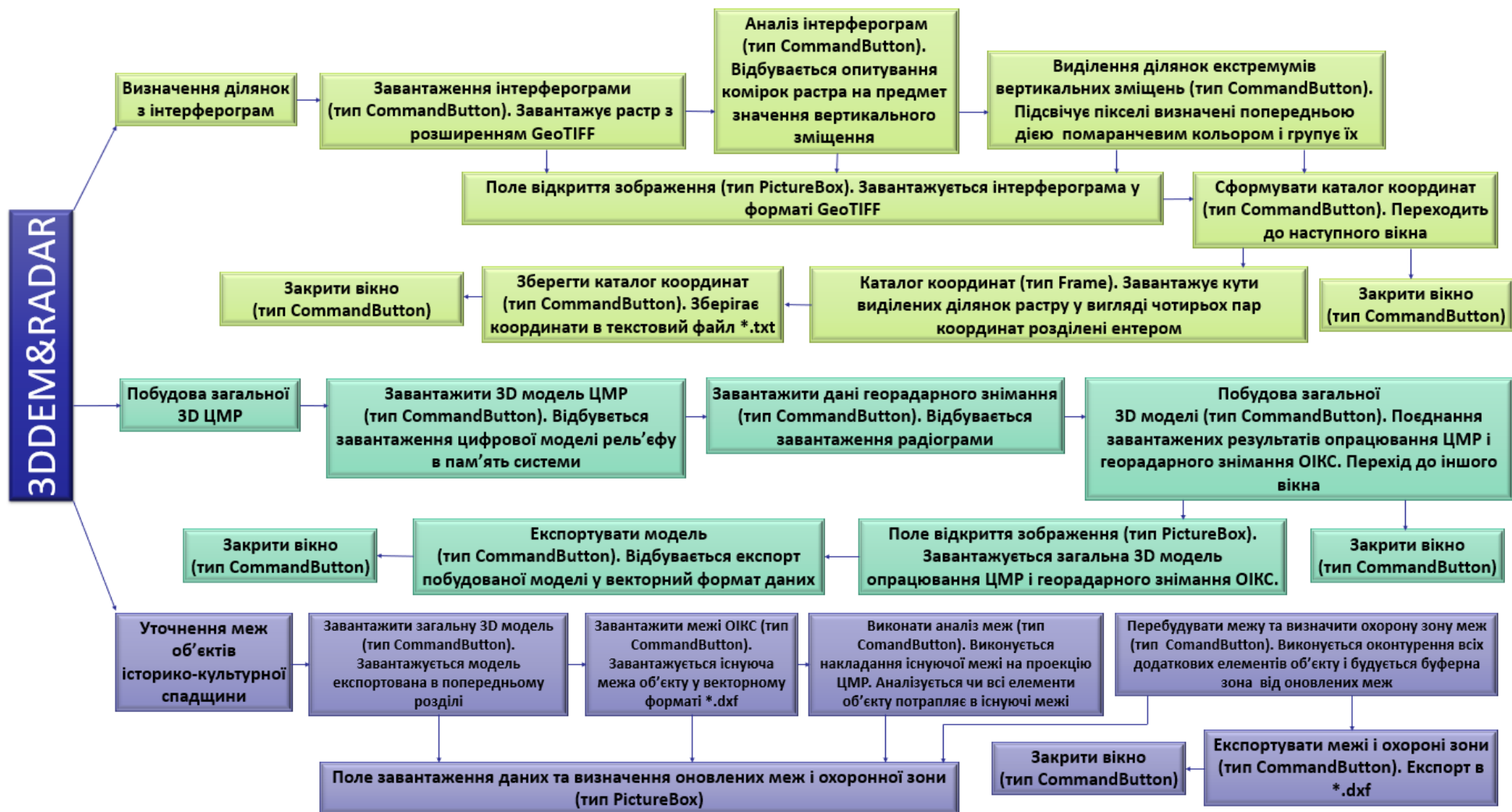


Рис.5.1. Технологічна схема створення модуля 3DDEM&RADAR

5.2. Розробка макету оболонки та визначення основних функцій програми (модуля) 3DDEM&RADAR

Розробка макету програмного модуля - це процес створення візуального представлення інтерфейсу користувача (UI) для програмного модуля перед його реалізацією. Макет допомагає визначити вигляд і організацію елементів інтерфейсу, їх розміщення та взаємодію [11, 10, 27].

Основні кроки при розробці макету програмного модуля:

Збір вимог: розуміння потреб користувачів та визначення функціональності, яку повинен надавати модуль. Це включає аналіз вимог, взаємодію з зацікавленими сторонами та встановлення основних цілей і задач модуля.

Створення концепту: визначення загальної ідеї і концепції макету. Це включає вибір кольорової палітри, типографії, стилістики та загальної композиції інтерфейсу.

Створення структури: визначення структури модуля, розміщення елементів інтерфейсу, створення основних розділів та навігаційної схеми.

Прототипування: створення прототипу макету з використанням спеціальних інструментів або навіть на папері. Прототип допомагає візуалізувати розташування елементів, їх зовнішній вигляд та взаємодію.

Валідація та зворотній зв'язок: проведення валідації прототипу з користувачами або зацікавленими сторонами для збору зворотного зв'язку та виявлення можливих проблем або покращень.

Вдосконалення макету: врахування отриманого зворотного зв'язку та внесення необхідних змін до макету. Цей процес може включати декілька ітерацій для досягнення оптимального дизайну.

В процесі розробки макету можуть використовуватися спеціальні програмні інструменти, такі як графічні редактори або інструменти прототипування, які допомагають створити візуальне представлення модуля [134, 140, 166, 146].

Основне вікно програмного модуля 3DDEM&RADAR включає тільки три кнопки виклику трьох функціональних блоків про які йшлося в п.5.1.

Для першого функціонального блоку "Визначення областей інтересу" було вирішено створити діалогове вікно з розгорнутим функціональним меню. Реалізацію блоку проведено за допомогою мови програмування Visual Basic, розташовуючи об'єкти на вікні форми. Початково всі команди модуля були створені у вигляді розгорнутого меню, щоб зберегти місце на формі для обробки завантаженого зображення. Меню містило дві вкладки: "Визначення АОІ з інтерферограм" та "Сформувати каталог координат". Створення розгорнутого меню здійснювалося за допомогою функціонального вікна Menu Editor (рис. 5.2).

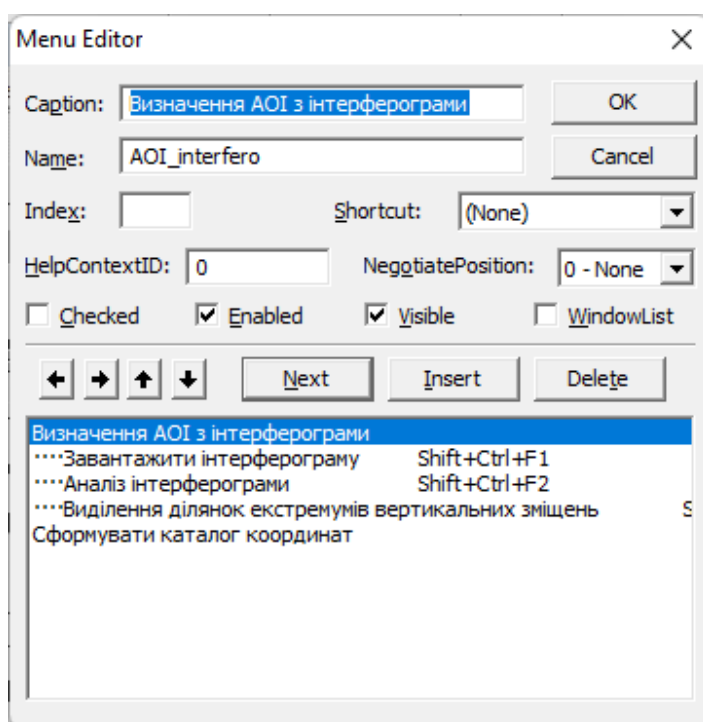


Рис.5.2. Діалогове вікно редагування розгорнутого меню з основними командами функціонального блоку

На першій вкладці були розташовані три основні команди функціонального блоку, тоді як друга вкладка використовувалася як єдина команда. Кожній команді були присвоєні клавіші швидкого доступу з комбінацією Shift+Ctrl+F.

На рисунку 5.3 наведено зразок вигляду вікна макету з розгорнутими меню, де розміщені наступні команди: "Завантажити інтерферограму", "Аналіз інтерферограми" та "Виділення ділянок екстремумів вертикальних зміщень".

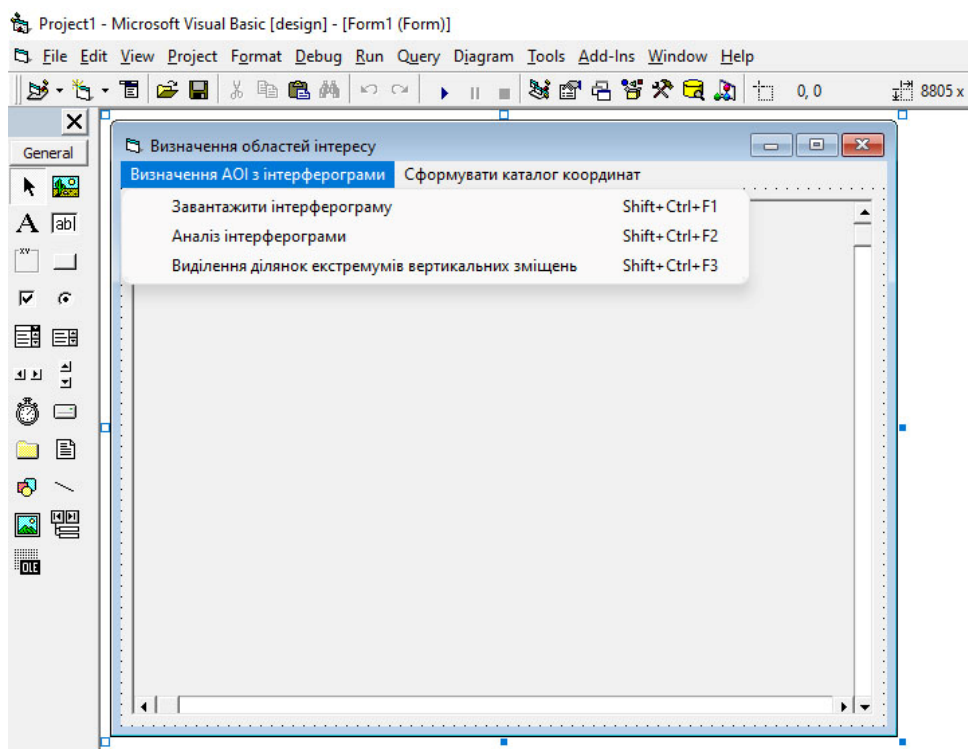


Рис.5.3. Діалогове вікно з відкритою першою вкладкою, що містить основні команди

При активації команди "Аналіз інтерферограми" відкривається нова форма (Form2), призначена для введення порогових значень найбільших і найменших вертикальних зміщень для вибірки (див. рис. 5.4). На цій формі розташовані елементи класу Label, Text та Button.

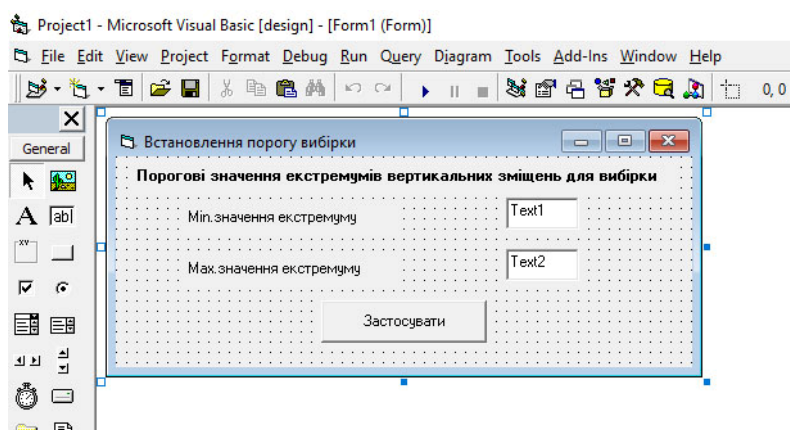
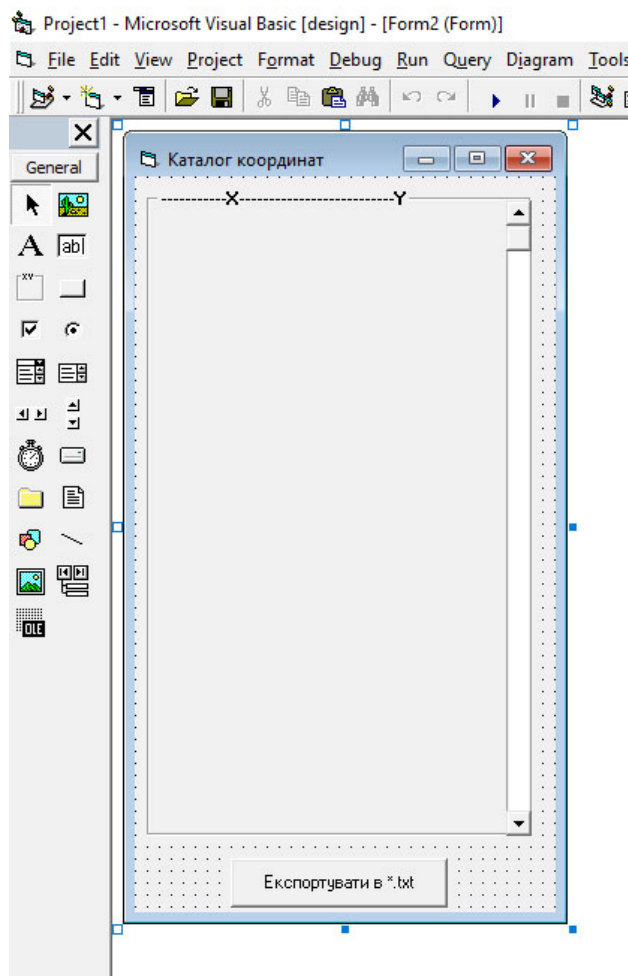


Рис.5.4. Додаткова форма для визначення меж вертикальних зміщень для подальшого аналізу

При переході на другу вкладку під назвою "Сформувати каталог координат" відкривається нове діалогове вікно (Form3) з назвою "Каталог координат". На

цьому вікні розміщене поле для завантаження координат виділених АОІ, які будуть розділені за допомогою клавіші "Enter", а також кнопка для експорту візуалізованого каталогу координат у файл з розширенням ".txt" (див. рис. 5.5).



Ри.5.5. Діалогове вікно, що містить поле для відображення та експорту координат областей інтересу

Всі дані, які будуть завантажуватися та експортуватися модулем, використовують систему координат WGS84.

Для макетування другого функціонального блоку «Побудова загальної 3D ЦМР» за допомогою функції MenuEditor створено розділи реалізації блоку та встановлено поєднання «гарячих клавіш» для альтернативного виклику тої чи іншої команди [30, 84, 15](рис.5.6).

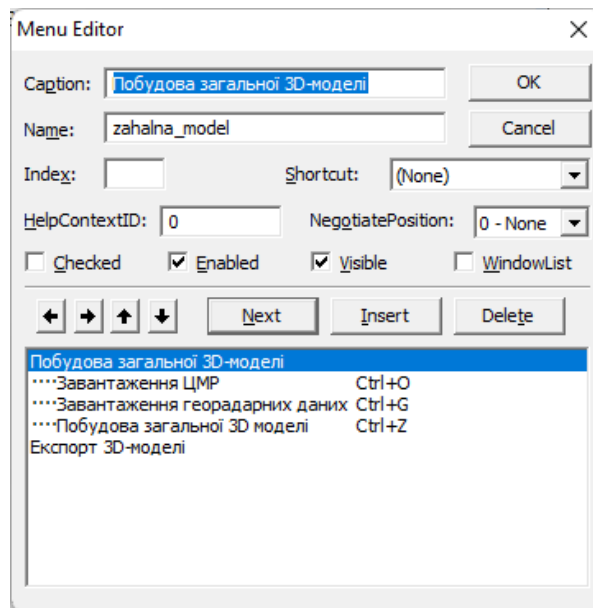


Рис.5.6. Діалогове вікно для створення команд спадаючого меню

Поле для завантаження, аналізу та перегляду даних було реалізовано за допомогою функції PictureBox з вбудованою можливістю прокручування (зміни масштабу зображення). Додатково до цього були додані кнопки "+" і "-", які дозволяють змінювати масштаб відображення моделі. В меню "Побудова загальної 3D-моделі" розміщено команди для завантаження ЦМР, георадарних даних та побудови загальної 3D-моделі (рис. 5.7).

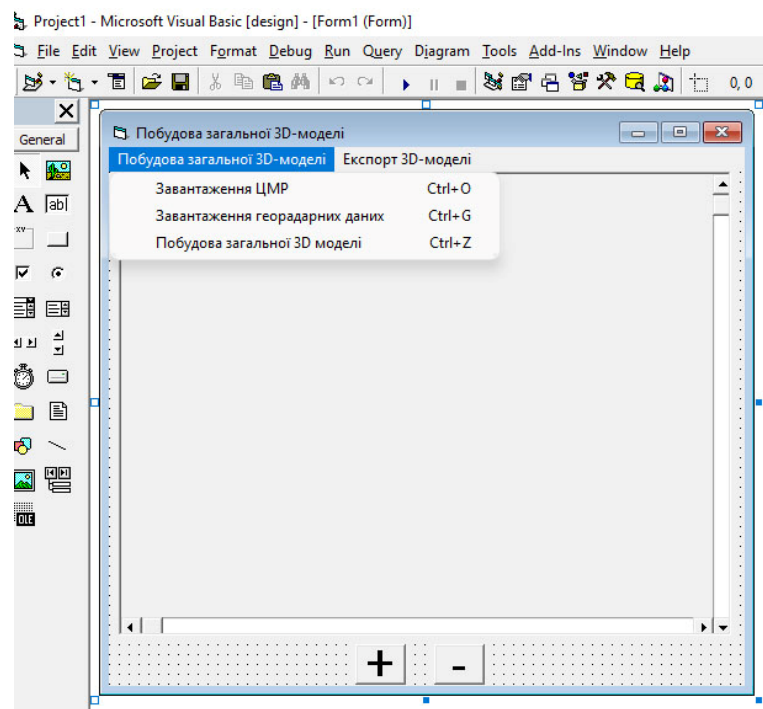


Рис.5.7. Макет функціонального блоку для реалізації етапу створення загальної тривимірної моделі

Меню "Експорт 3D-моделі" включало лише одну команду, яка відповідала за експорт загальної моделі наземних і підземних елементів об'єкта історико-культурної спадщини у формат 3DS (рис. 5.8).

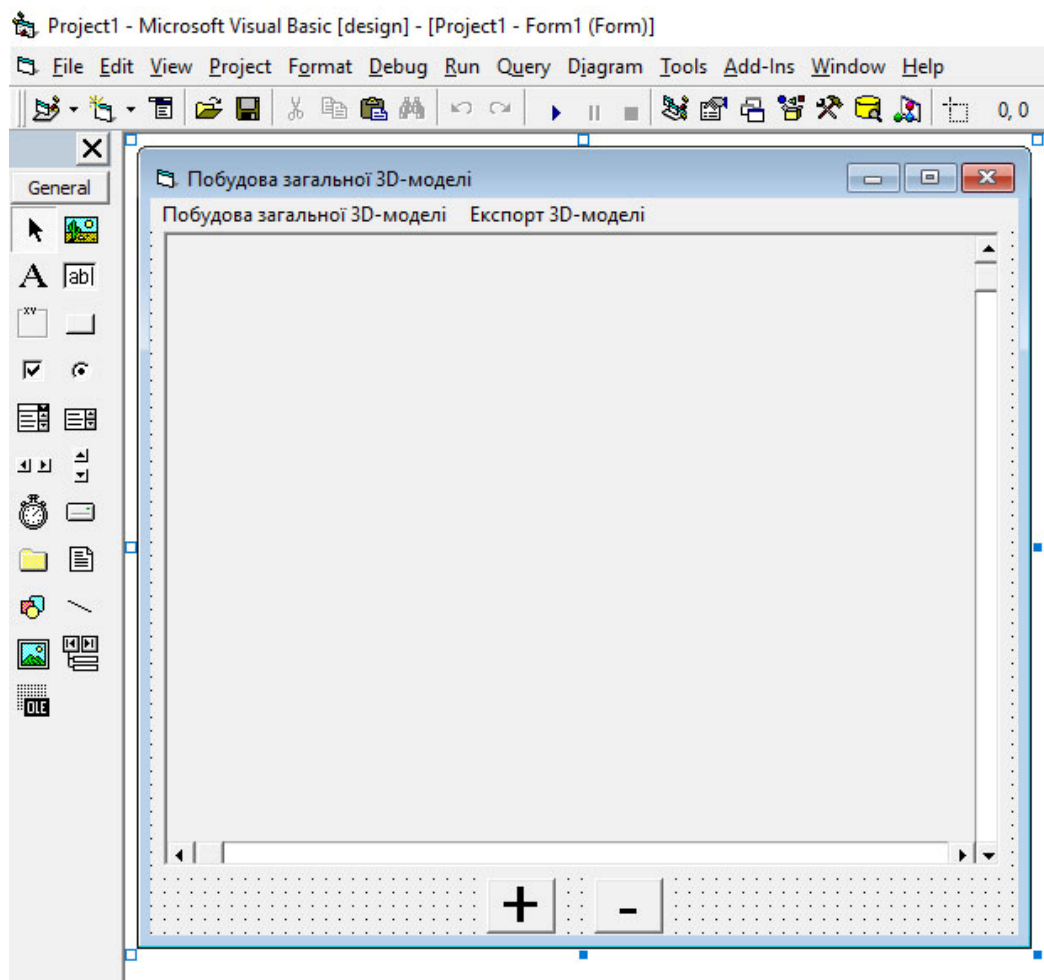


Рис.5.8. Макет функціонального блоку для реалізації меню експорту загальної тривимірної моделі об'єкта історико-культурної спадщини

Для виконання останнього функціонального блоку "Уточнення меж ОІКС" було розділено макет на три функціональні зони. Перша зона - "Завантаження даних", включає процес завантаження різноманітних геопросторових даних. Друга зона - "Виконання аналізу", де проводиться аналіз завантажених даних та видається результат. Третя зона - "Експорт результату в обмінний формат".

За допомогою функції MenuEditor були створені блоки реалізації функціонального блоку та встановлені поєднання "гарячих клавіш" для альтернативного виклику різних команд (рис. 5.9).

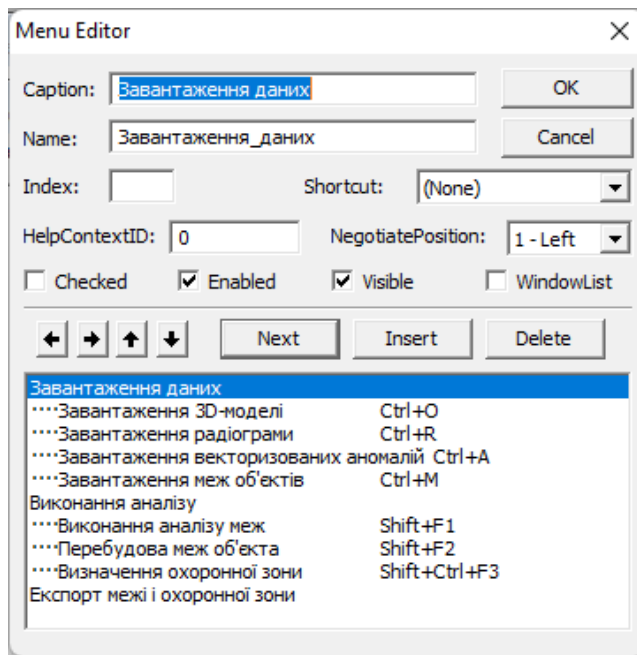


Рис.5.9. Вікно створення команд спадаючого меню

Для завантаження, аналізу та перегляду даних використано поле з вбудованою функцією прокрутки та масштабування зображення, що реалізоване через функцію PictureBox.

В меню виконання програми включено такі команди в меню "Завантаження даних": завантаження 3D-моделі, радіограми, векторизованих аномалій та меж об'єктів (рис. 5.10).

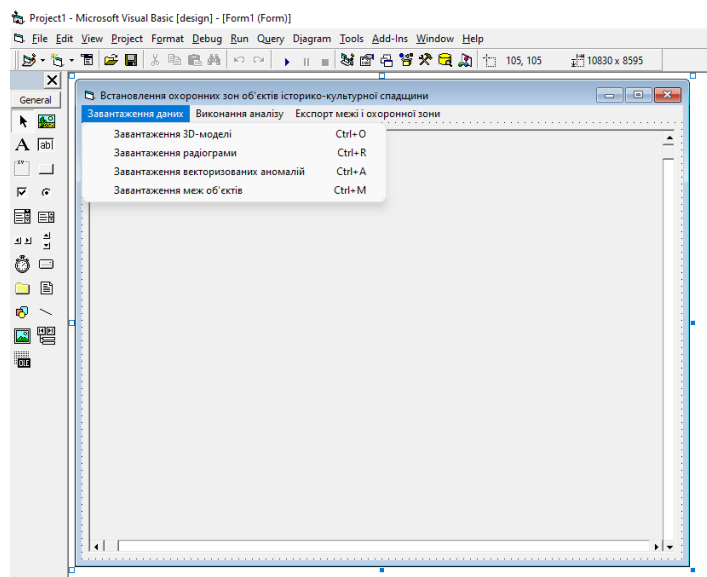


Рис.5.10. Структура функціонального блоку для реалізації опцій меню завантаження даних

У меню "Виконання аналізу" включено такі команди: аналіз меж, перебудова меж об'єкта, визначення охоронної зони (див. рис. 5.10).

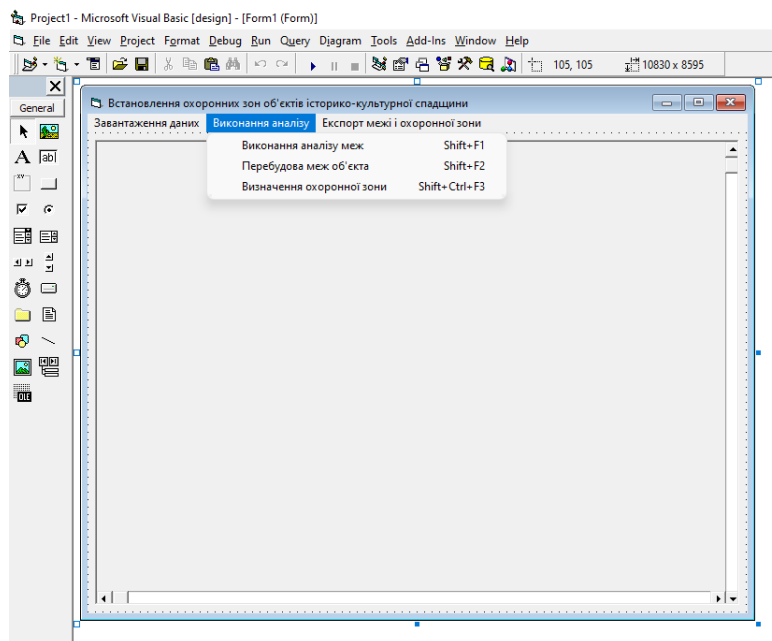


Рис.5.10. Структура функціонального блоку для реалізації опцій меню аналізу

Меню "Експорт межі і охоронної зони" містить лише одну команду, яка відповідає за виконання самого процесу експорту у обмінний векторний формат (рис. 5.11).

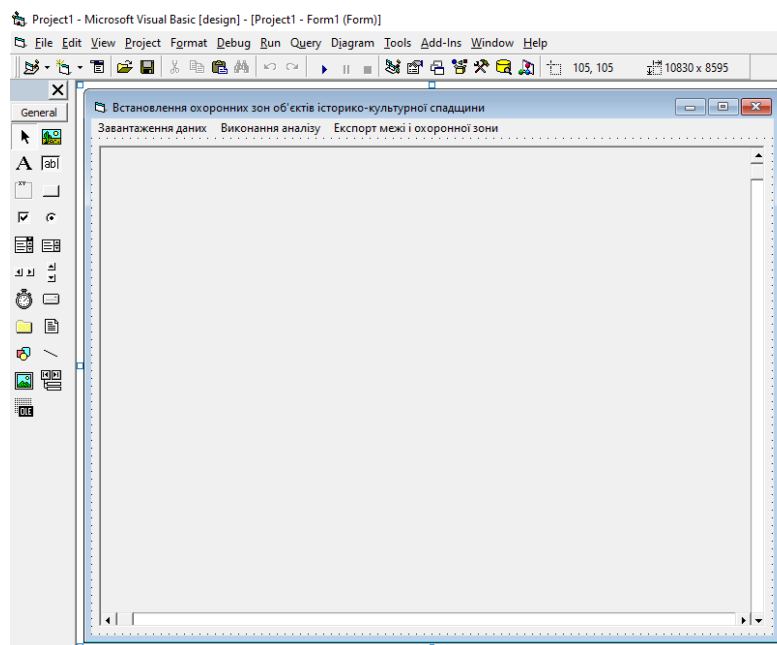


Рис.5.11. Структура функціонального блоку для виконання команд експорту межі і охоронної зони об'єкта історико-культурної спадщини

5.3. Написання коду програми (модуля) 3DDEM&RADAR для визначеного функціоналу

Методика створення програмного коду для програмного модуля оновлення меж охоронних зон може включати наступні кроки:

Аналіз вимог: розуміння функціональних вимог до програмного модуля оновлення меж охоронних зон. Це включає вивчення правил та процедур, пов'язаних з оновленням меж, і визначення вхідних та вихідних даних.

Проектування архітектури: визначення структури програмного модуля та вибір відповідного архітектурного шаблону. Які компоненти будуть присутні в модулі, як вони взаємодіють між собою і які будуть використовувати основні команди та функції.

Написання коду: написання програмного коду для реалізації основних команд і функцій модуля. Це може включати розробку функцій для взаємодії з базою даних, обробки геопросторових даних, валідації та оновлення меж охоронних зон.

Тестування: виконання тестування коду для перевірки правильності його роботи. Використовуються тестові дані, щоб перевірити, чи відбувається коректне оновлення меж охоронних зон та чи відповідає програмний модуль вимогам.

Оптимізація та покращення: виявлення можливих шляхів оптимізації коду та вдосконалення функціональності модуля. Це може включати покращення продуктивності, оптимізацію запитів до бази даних або впровадження додаткових функцій.

Документація: підготовка документації, яка пояснює структуру, функціональність і використання основних команд і функцій програмного модуля оновлення меж охоронних зон. Це допоможе іншим розробникам або користувачам зрозуміти, як використовувати та налагоджувати модуль.

При розробці програмного коду важливо керуватися кращими практиками програмування, такими як чіткість, модульність, перевикористання коду та документування [194, 235, 170].

Після створення макетів програмного модуля, що описано в параграфі 5.2 переходимо до написання коду для кожної команди та функції модуля.

Давайте детально розглянемо програмування компонентів першого функціонального блоку модуля "Визначення областей інтересу". Перша операція з першої вкладки спадного меню "Завантаження інтерферограми" має на меті завантажити растровий файл інтерферограми об'єкта культурної спадщини у вікно програми. Ось приклад коду на Visual Basic для виконання команди "zavantazhennia_interfero_Click()", яка завантажує файл з розширенням GeoTiff з кореневого каталогу у поле "Picture1_Click()":

```
Private Sub zavantazhennia_interfero_Click()  
    ' Отримати шлях до кореневого каталогу  
    Dim rootPath As String  
    rootPath = App.Path ' Або можна вказати конкретний шлях до кореневого каталогу  
    ' Перевірити, чи існує GeoTiff файл у кореновому каталозі  
    Dim filePath As String  
    filePath = rootPath & "\Cytadel.tif"  
    If Dir(filePath) <> "" Then  
        ' Файл існує, завантажити його у поле Picture1  
        Picture1.Picture = LoadPicture(filePath)  
    Else  
        ' Файл не знайдено  
        MsgBox "Файл GeoTiff не знайдено у кореновому каталозі.", vbExclamation  
    End If  
End Sub
```

Наступним етапом є виконання команди "Аналіз інтерферограми", яка перевіряє кожен піксель растра на наявність екстремумів вертикальних зміщень. Нижче подано приклад коду на Visual Basic, який виконує команду "Analiz_interfero_Click()" для відкриття вікна "Form2":

```
Private Sub Analiz_interfero_Click()  
    ' Створити новий екземпляр форми Form2  
    Dim frm As New Form2
```

```
' Відобразити форму Form2
frm.Show
End Sub
```

Цей фрагмент коду ініціює створення нового екземпляру форми з назвою Form2 і показує її за допомогою методу Show(). Після цього, коли користувач клікає на кнопку Command1, виконується функція Command1_Click(). Ця функція аналізує растрове зображення у форматі *.tiff, яке було завантажено за допомогою методу Picture1_Click(), і підсвічує оранжевим кольором пікселі, які знаходяться у заданому діапазоні від значення Text1 до Text2. У наступному коді поєднано вибір діапазону значень вертикальних зміщень з виконанням команди "Виділення ділянок екстремумів вертикальних зміщень".

```
Private Sub Command1_Click()
' Отримати мінімальне і максимальне значення вертикальних зміщень
Dim minValue As Double
Dim maxValue As Double
On Error Resume Next ' Обробка помилок при конвертації значень з полів Text1 і
Text2
minValue = CDbI(Text1.Text)
maxValue = CDbI(Text2.Text)
On Error GoTo 0 ' Вимкнути обробку помилок
' Перевірити, чи значення вертикальних зміщень введені коректно
If IsNumeric(Text1.Text) And IsNumeric(Text2.Text) And minValue <= maxValue Then
' Аналізувати растр, якщо значення коректні
AnalyzeRaster(minValue, maxValue)
Else
' Вивести повідомлення про помилку, якщо значення введені некоректно
MsgBox "Будь ласка, введіть коректні значення вертикальних зміщень.",
vbExclamation
End If
End Sub
Private Sub AnalyzeRaster(ByVal minValue As Double, ByVal maxValue As Double)
' Перевірити, чи завантажений растр
If Picture1.Picture Is Nothing Then
MsgBox "Будь ласка, завантажте растр у поле Picture1.", vbExclamation
Exit Sub
End If
```

```

' Отримати розмір растру
Dim width As Integer
Dim height As Integer
width = Picture1.Picture.Width
height = Picture1.Picture.Height
' Створити зображення-копію растру
Dim bmp As Bitmap
bmp = New Bitmap(Picture1.Picture)
' Перебрати всі пікселі растру і виконати аналіз
Dim x As Integer
Dim y As Integer
Dim pixelColor As Color
For x = 0 To width - 1
    For y = 0 To height - 1
        ' Отримати колір пікселя
        pixelColor = bmp.GetPixel(x, y)
        ' Отримати значення вертикального зміщення з каналу червоного (Red)
        Dim verticalShift As Double
        verticalShift = CDbI(pixelColor.R)
        ' Перевірити, чи потрапляє значення вертикального зміщення у діапазон
        If verticalShift >= minValue And verticalShift <= maxValue Then
            ' Підсвітити піксель помаранчевим кольором
            bmp.SetPixel(x, y, Color.Orange)
        End If
    Next y
Next x
' Оновити зображення в полі Picture1
Picture1.Picture = bmp
End Sub

```

Цей фрагмент коду перевіряє правильність введених значень вертикальних зміщень, а потім викликає функцію `AnalyzeRaster`. Ця функція проймається через кожен піксель растру, перевіряє його значення вертикального зміщення і підсвічує пікселі, що відповідають заданому діапазону значень, оранжевим кольором.

Наступна частина коду на Visual Basic призначена для виконання команди `katalog_AOI_Click()`. Ця команда викликає вікно `Form3` і завантажує координати

пікселів, які були підсвічені оранжевим кольором на растрі у полі Picture1_Click(), у систему координат WGS84.

```
Private Sub katalog_AOI_Click()  
    ' Перевірити, чи завантажений растр  
    If Picture1.Picture Is Nothing Then  
        MsgBox "Будь ласка, завантажте растр у поле Picture1.", vbExclamation  
        Exit Sub  
    End If  
    ' Створити новий екземпляр форми Form3  
    Dim frm2 As New Form3  
    ' Отримати розмір растру  
    Dim width As Integer  
    Dim height As Integer  
    width = Picture1.Picture.Width  
    height = Picture1.Picture.Height  
    ' Створити зображення-копію растру  
    Dim bmp As Bitmap  
    bmp = New Bitmap(Picture1.Picture)  
    ' Отримати координати пікселів, підсвічених помаранчевим кольором  
    Dim coordinates As String = ""  
    Dim startX As Integer = -1  
    Dim startY As Integer = -1  
    Dim x As Integer  
    Dim y As Integer  
    Dim pixelColor As Color  
    For x = 0 To width - 1  
        For y = 0 To height - 1  
            ' Отримати колір пікселя  
            pixelColor = bmp.GetPixel(x, y)  
            ' Перевірити, чи піксель підсвічений помаранчевим кольором  
            If pixelColor = Color.Orange Then  
                ' Якщо початок нової групи пікселів  
                If startX = -1 And startY = -1 Then  
                    ' Перетворити координати пікселя в систему координат WGS84  
                    Dim WGSX As Single  
                    Dim WGSY As Single  
                    WGSX = ConvertToWGS84X(x)  
                    WGSY = ConvertToWGS84Y(y)
```

```

        ' Додати координати в рядок
        coordinates = coordinates & WGSX & "," & WGSY & vbCrLf
        startX = x
        startY = y
    End If
Else
    ' Якщо кінець групи пікселів
    If startX <> -1 And startY <> -1 Then
        ' Перетворити координати пікселя в систему координат WGS84
        Dim WGSX As Single
        Dim WGSY As Single
        WGSX = ConvertToWGS84X(x - 1)
        WGSY = ConvertToWGS84Y(y - 1)
        ' Додати координати в рядок
        coordinates = coordinates & WGSX & "," & WGSY & vbCrLf
        ' Скинути початкові координати
        startX = -1
        startY = -1
    End If
End If
Next y
Next x
' Перевірити, чи є остання група пікселів, якщо так, то додати її координати
If startX <> -1 And startY <> -1 Then
    ' Перетворити координати пікселя в систему координат WGS84
    Dim WGSX As Single
    Dim WGSY As Single
    WGSX = ConvertToWGS84X(width - 1)
    WGSY = ConvertToWGS84Y(height - 1)
    ' Додати координати в рядок
    coordinates = coordinates & WGSX & "," & WGSY & vbCrLf
End If
' Передати координати у вікно Form3
frm2.Frame1.Text = coordinates
' Відобразити форму Form3
Frm3.Show
End Sub
Private Function ConvertToWGS84X(ByVal pixelX As Integer) As Single

```



```

' Код для перетворення координати X пікселя в систему координат WGS84
  Return pixelX * 0.01 ' масштабування координати пікселя
End Function
Private Function ConvertToWGS84Y(ByVal pixelY As Integer) As Single
' Код для перетворення координати Y пікселя в систему координат WGS84
  Return pixelY * 0.01 ' масштабування координати пікселя
End Function

```

У цьому коді використовуються функції ConvertToWGS84X і ConvertToWGS84Y для перетворення координат пікселя у систему координат WGS84. Для експорту даних груп координат з поля вікна у текстовий файл необхідно виконати команду Command2_Click(). При натисканні кнопки ця команда зберігає групи координат з методу Frame3_DragDrop(Source As Control, X As Single, Y As Single) у файл з розширенням txt.

```

Private Sub Command2_Click()
' Отримати шлях до файлу для збереження
Dim filePath As String
filePath = "D:\...\...\*.txt"
' Отримати групи координат з поля Frame3
Dim coordinates As String
coordinates = Frame3.Text
' Перевірити, чи є координати для збереження
If coordinates <> "" Then
' Зберегти координати у файл
SaveCoordinatesToFile(filePath, coordinates)
MsgBox "Групи координат успішно збережено у файл " & filePath & ".",
vbInformation
Else
MsgBox "Немає груп координат для збереження.", vbExclamation
End If
End Sub
Private Sub SaveCoordinatesToFile(ByVal filePath As String, ByVal coordinates As String)
' Створити новий текстовий файл для запису
Dim file As System.IO.StreamWriter
file = My.Computer.FileSystem.OpenTextFileWriter(filePath, False)
' Записати групи координат у файл
file.Write(coordinates)
' Закрити файл

```

```
file.Close()  
End Sub
```

У цьому коді при натисканні кнопки `Command2_Click()` програма отримує шлях до файлу для збереження групи координат з поля `Frame3`. Потім вона викликає функцію `SaveCoordinatesToFile`, яка створює новий текстовий файл і записує у нього групи координат.

Для програмування другого функціонального блоку модуля "Побудова загальної 3D ЦМР" для завантаження даних 3D моделей наземних і підземних елементів об'єктів історико-культурної спадщини передбачено використання двох типів файлів з розширеннями `*.xyz` і `*.3DS` [28, 29, 88, 111].

Формат даних XYZ є простим текстовим форматом для представлення тривимірних геометричних даних. У цьому форматі кожна лінія файлу представляє одну точку в тривимірному просторі і містить її координати у вигляді трьох чисел, розділених пробілами або табуляцією. Перше число відповідає координаті X, друге - координаті Y, а третє - координаті Z.

Формат 3DS є бінарним форматом для збереження тривимірних моделей, розроблений компанією Autodesk. Він використовується для збереження геометричних даних, текстур, анімацій та інших параметрів, пов'язаних з тривимірними об'єктами.

Для реалізації завантаження 3D-моделі ЦМР Цитаделі у форматі XYZ або 3DS у поле перегляду `PictureBox` необхідно виконати наступний код:

```
Imports System.IO  
Imports System.Drawing  
Imports System.Windows.Forms  
Imports Microsoft.DirectX  
Imports Microsoft.DirectX.Direct3D  
Public Class Form1  
    Private Device As Device  
    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load  
        InitializeGraphics()  
    End Sub  
    Private Sub InitializeGraphics()  
        ' Створення об'єкта Device для рендерингу
```

```

Dim presentParams As New PresentParameters()
presentParams.Windowed = True
presentParams.SwapEffect = SwapEffect.Discard
Device = New Device(0, DeviceType.Hardware, Me,
CreateFlags.SoftwareVertexProcessing, presentParams)
End Sub

Private Sub zavantazhennia_DEM_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
zavantazhenniaDEM.Click
Dim filePath As String = "" ' Шлях до файлу 3D-моделі
' Відкрити діалогове вікно вибору файлу
Dim openFileDialog As New OpenFileDialog()
openFileDialog.Filter = "Файли 3D-моделі (*.xyz, *.3ds)|*.xyz;*.3ds"
If openFileDialog.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
filePath = openFileDialog.FileName
' Перевірити розширення файлу
Dim extension As String = Path.GetExtension(filePath)
If extension = ".xyz" Then
' Завантажити модель з файлу XYZ
Dim model As Model = LoadModelFromXYZ(filePath)
' Застосувати проекцію WGS84 до моделі
Dim projectedModel As Model = ApplyWGS84Projection(model)
' Відображення моделі у полі PictureBox
zavantazhenniaDEM(projectedModel)
ElseIf extension = ".3ds" Then
' Завантажити модель з файлу 3DS
Dim model As Model = LoadModelFrom3DS(filePath)
' Застосувати проекцію WGS84 до моделі
Dim projectedModel As Model = ApplyWGS84Projection(model)
' Відображення моделі у полі PictureBox
zavantazhenniaDEM(projectedModel)
Else
MessageBox.Show("Непідтримуваний формат файлу!")
End If
End If
End Sub

PictureBox
' Використовуйте Device для рендерингу моделі
End Sub

```

```

Protected Overrides Sub OnPaint(ByVal e As PaintEventArgs)
    MyBase.OnPaint(e)
    Device.Present()
End Sub
End Class
Public Class Model
    ' Опис класу моделі
End Class

```

При натисканні кнопки викликається обробник події `zavantazhennia_DEM_Click()`, який відкриває діалогове вікно вибору файлу та обробляє вибраний файл. В залежності від розширення файлу (`.xyz` або `.3ds`), викликається відповідна функція `LoadModelFromXYZ()` або `LoadModelFrom3DS()`, яка має бути реалізована для завантаження моделі з файлу [2, 100, 186, 77]. Після завантаження моделі викликається функція `ZobrazhenniaModeli()`, де можна реалізувати код для відображення моделі у полі `PictureBox`.

Тут ми завантажуюємо лише фрагмент загальної 3D-моделі Цитаделі, отриманої за даними радіолокаційного знімання, оскільки георадарні дані доступні лише у вигляді фрагментів території об'єкта. Таким чином, завантажуюється лише фрагмент наземної частини об'єкта, який відповідає розміру ділянки георадарного знімання.

Для реалізації завантаження 3D-моделі георадарних даних у форматі XYZ або 3DS у поле перегляду `PictureBox` необхідно виконати наступний код:

```

Imports System.IO
Imports System.Drawing
Imports System.Windows.Forms
Imports Microsoft.DirectX
Imports Microsoft.DirectX.Direct3D
Public Class Form1
    Private Device As Device
    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
        InitializeGraphics()
    End Sub
    Private Sub InitializeGraphics()

```

```

' Створення об'єкта Device для рендерингу
Dim presentParams As New PresentParameters()
presentParams.Windowed = True
presentParams.SwapEffect = SwapEffect.Discard
Device = New Device(0, DeviceType.Hardware, Me,
CreateFlags.SoftwareVertexProcessing, presentParams)
End Sub

Private Sub zavantazhennia_georadar_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
zavantazhennia_georadar.Click
    Dim filePath As String = "" ' Шлях до файлу 3D-моделі
    ' Відкрити діалогове вікно вибору файлу
    Dim openFileDialog As New OpenFileDialog()
    openFileDialog.Filter = "Файли 3D-моделі (*.xyz, *.3ds)|*.xyz;*.3ds"
    If openFileDialog.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
        filePath = openFileDialog.FileName
        ' Перевірити розширення файлу
        Dim extension As String = Path.GetExtension(filePath)
        If extension = ".xyz" Then
            ' Завантажити модель з файлу XYZ
            Dim model As Model = LoadModelFromXYZ(filePath)
            ' Застосувати проекцію WGS84 до моделі
            Dim projectedModel As Model = ApplyWGS84Projection(model)
            ' Відображення моделі у полі PictureBox
            ZobrazhenniaGeoradaru(projectedModel)
        ElseIf extension = ".3ds" Then
            ' Завантажити модель з файлу 3DS
            Dim model As Model = LoadModelFrom3DS(filePath)
            ' Застосувати проекцію WGS84 до моделі
            Dim projectedModel As Model = ApplyWGS84Projection(model)
            ' Відображення моделі у полі PictureBox
            ZobrazhenniaGeoradaru(projectedModel)
        Else
            MessageBox.Show("Непідтримуваний формат файлу!")
        End If
    End If
End Sub

Private Function LoadModelFromXYZ(filePath As String) As Model
    ' Реалізуйте код для завантаження моделі з файлу XYZ

```

```

    ' Поверніть об'єкт моделі
End Function
Private Function LoadModelFrom3DS(filePath As String) As Model
    ' Реалізуйте код для завантаження моделі з файлу 3DS
    ' Поверніть об'єкт моделі
End Function
Private Function ApplyWGS84Projection(model As Model) As Model
    ' Реалізуйте код для застосування проекції WGS84 до моделі
    ' Поверніть модель у проекції WGS84
End Function
Private Sub ZobrazhenniaGeoradaru(model As Model)
    ' Реалізуйте код для відображення георадарної моделі у полі PictureBox
    ' Використовуйте Device для рендерингу моделі
End Sub
Protected Overrides Sub OnPaint(ByVal e As PaintEventArgs)
    MyBase.OnPaint(e)
    Device.Present()
End Sub
End Class
Public Class Model
    ' Опис класу моделі
End Class

```

Для рендерингу 3D-моделі у полі PictureBox використовується бібліотека Microsoft.DirectX.Direct3D. Також, потрібна додаткова настройка, включаючи встановлення DirectX та посилання на відповідні бібліотеки.

Загальна структура коду демонструє, як можна виконати завантаження 3D-моделі з файлу (у форматі XYZ або 3DS), застосування проекції WGS84 до моделі і відображення моделі у полі PictureBox за допомогою об'єкта Device. Треба відзначити, що підготовлені дані мають бути заздалегідь збережені у проекції WGS84.

Для реалізації побудови загальної 3D-моделі георадарних даних із двох завантажених та відображення її у полі перегляду PictureBox необхідно виконати наступний код:

```

Imports System.IO
Imports System.Drawing

```

```

Imports System.Windows.Forms
Imports Microsoft.DirectX
Imports Microsoft.DirectX.Direct3D
Public Class Form1
    Private Device As Device
    Private Model1 As Model
    Private Model2 As Model
    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
        InitializeGraphics()
    End Sub
    Private Sub InitializeGraphics()
        ' Створення об'єкта Device для рендерингу
        Dim presentParams As New PresentParameters()
        presentParams.Windowed = True
        presentParams.SwapEffect = SwapEffect.Discard
        Device = New Device(0, DeviceType.Hardware, Me,
CreateFlags.SoftwareVertexProcessing, presentParams)
    End Sub
    Private Sub zavantazhennia_georadar_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
zavantazhennia_georadar.Click
        Dim filePath1 As String = "" ' Шлях до першої 3D-моделі
        Dim filePath2 As String = "" ' Шлях до другої 3D-моделі
        ' Відкрити діалогове вікно вибору файлу для першої моделі
        Dim openFileDialog1 As New OpenFileDialog()
        openFileDialog1.Filter = "Файли 3D-моделі (*.xyz, *.3ds)|*.xyz;*.3ds"
        If openFileDialog1.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
            filePath1 = openFileDialog1.FileName
            ' Відкрити діалогове вікно вибору файлу для другої моделі
            Dim openFileDialog2 As New OpenFileDialog()
            openFileDialog2.Filter = "Файли 3D-моделі (*.xyz, *.3ds)|*.xyz;*.3ds"
            If openFileDialog2.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
                filePath2 = openFileDialog2.FileName
                ' Перевірити розширення файлів
                Dim extension1 As String = Path.GetExtension(filePath1)
                Dim extension2 As String = Path.GetExtension(filePath2)
                If extension1 = ".xyz" AndAlso extension2 = ".xyz" Then
                    ' Завантажити першу модель з файлу XYZ
                    Model1 = LoadModelFromXYZ(filePath1)
                End If
            End If
        End If
    End Sub
End Class

```

```

' Завантажити другу модель з файлу XYZ
Model2 = LoadModelFromXYZ(filePath2)
' Об'єднати моделі
Dim combinedModel As Model = CombineModels(Model1, Model2)
' Застосувати проекцію WGS84 до моделі
Dim projectedModel As Model = ApplyWGS84Projection(combinedModel)
' Відображення моделі у полі PictureBox
ZobrazhenniaModeli(projectedModel)
Else
    MessageBox.Show("Непідтримуваний формат файлу!")
End If
End If
End If
End Sub

```

Для другого блоку, який включає лише одну команду експорту загальної 3D-моделі у форматі XYZ або 3DS, потрібно використати такий код:

```

Imports System.IO
Imports System.Windows.Forms
Imports Microsoft.DirectX
Imports Microsoft.DirectX.Direct3D
Public Class Form1
    Private Device As Device
    Private CombinedModel As Model
    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
        InitializeGraphics()
    End Sub
    Private Sub InitializeGraphics()
        ' Створення об'єкта Device для рендерингу
        Dim presentParams As New PresentParameters()
        presentParams.Windowed = True
        presentParams.SwapEffect = SwapEffect.Discard
        Device = New Device(0, DeviceType.Hardware, Me,
CreateFlags.SoftwareVertexProcessing, presentParams)
    End Sub
    Private Sub export_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles export.Click
        If CombinedModel IsNot Nothing Then
            ' Відкрити діалогове вікно для вибору місця збереження файлу
            Dim saveFileDialog As New SaveFileDialog()

```



```

saveFileDialog.Filter = "Файли 3D-моделі (*.xyz, *.3ds)|*.xyz;*.3ds"
If saveFileDialog.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
    Dim filePath As String = saveFileDialog.FileName
    Dim extension As String = Path.GetExtension(filePath)
    If extension = ".xyz" Then
        ' Експорт моделі у формат XYZ
        ExportToXYZ(filePath)
    ElseIf extension = ".3ds" Then
        ' Експорт моделі у формат 3DS
        ExportTo3DS(filePath)
    Else
        MessageBox.Show("Непідтримуваний формат файлу!")
    End If
End If
Else
    MessageBox.Show("Немає об'єднаної моделі!")
End If
End Sub
Private Sub ExportToXYZ(filePath As String)
    ' Реалізуйте код для експорту моделі у формат XYZ
    ' Використовуйте CombinedModel для отримання даних моделі
    ' Запишіть дані у файл з розширенням XYZ
End Sub
Private Sub ExportTo3DS(filePath As String)
    ' Реалізуйте код для експорту моделі у формат 3DS
    ' Використовуйте CombinedModel для отримання даних моделі
    ' Запишіть дані у файл з розширенням 3DS
End Sub
Protected Overrides Sub OnPaint(ByVal e As PaintEventArgs)
    MyBase.OnPaint(e)
    Device.Present()
End Sub
End Class
Public Class Model
    ' Опис класу моделі
End Class

```

Додамо код програми для двох кнопок, які збільшують і зменшують масштаб моделі у вікні PictureBox:

```

Imports System.Windows.Forms
Imports Microsoft.DirectX
Imports Microsoft.DirectX.Direct3D
Public Class Form1
    Private Device As Device
    Private Model As Model
    Private ScaleFactor As Single = 1.0F ' Початковий масштаб
    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
        InitializeGraphics()
    End Sub
    Private Sub InitializeGraphics()
        ' Створення об'єкта Device для рендерингу
        Dim presentParams As New PresentParameters()
        presentParams.Windowed = True
        presentParams.SwapEffect = SwapEffect.Discard
        Device = New Device(0, DeviceType.Hardware, Me,
CreateFlags.SoftwareVertexProcessing, presentParams)
    End Sub
    Private Sub Command1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Command1.Click
        ' Збільшення масштабу
        ScaleFactor += 0.1F ' Можна змінити значення за потребою
        ' Перемасштабувати модель
        ScaleModel()
        ' Оновити відображення моделі
        RefreshModelView()
    End Sub
    Protected Overrides Sub OnPaint(ByVal e As PaintEventArgs)
        MyBase.OnPaint(e)
        Device.Present()
    End Sub
End Class
Public Class Model
    ' Опис класу моделі
End Class

```

У цьому коді кнопка `Command1_Click` збільшує масштаб 3D-моделі у полі `PictureBox`.

```
Imports System.Windows.Forms
```

```

Imports Microsoft.DirectX
Imports Microsoft.DirectX.Direct3D
Public Class Form1
    Private Device As Device
    Private Model As Model
    Private ScaleFactor As Single = 1.0F ' Початковий масштаб
    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
        InitializeGraphics()
    End Sub
    Private Sub InitializeGraphics()
        ' Створення об'єкта Device для рендерингу
        Dim presentParams As New PresentParameters()
        presentParams.Windowed = True
        presentParams.SwapEffect = SwapEffect.Discard
        Device = New Device(0, DeviceType.Hardware, Me,
CreateFlags.SoftwareVertexProcessing, presentParams)
    End Sub
    Private Sub Command2_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Command2.Click
        ' Зменшення масштабу
        ScaleFactor -= 0.1F ' Можна змінити значення за потребою
        ' Перемасштабувати модель
        ScaleModel()
        ' Оновити відображення моделі
        RefreshModelView()
    End Sub
    Protected Overrides Sub OnPaint(ByVal e As PaintEventArgs)
        MyBase.OnPaint(e)
        Device.Present()
    End Sub
End Class
Public Class Model
    ' Опис класу моделі
End Class

```

У цьому коді кнопка `Command2_Click` зменшує масштаб 3D-моделі у полі `PictureBox`.

Для третього функціонального блоку модуля "Уточнення меж ОІКС" передбачено виконання команд з завантаження різнорідних геопросторових даних. Код для цього виглядатиме наступним чином:

- для завантаження цифрової моделі рельєфу (ЦМР) у форматі GeoTIFF до поля перегляду PictureBox:

```
Private Sub Zavantazhenny_modeli1_Click()  
    Dim filePath As String  
    filePath = "D:\DEM_Cytadel.tiff"  
    If Dir(filePath) <> "" Then ' Перевірка наявності файлу  
        PictureBox1.Image = Image.FromFile(filePath) ' Завантаження зображення в  
PictureBox1  
    End If  
End Sub  
Private Sub PictureBox1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
PictureBox1.Click  
    If filePath.ToLower().EndsWith(".tiff") Then  
        PictureBox1.Image = Image.FromFile(filePath)  
    End If  
End Sub
```

При цьому програма відкриває файл на диску D і завантажує дані у поле PictureBox. Всі ці дані перетворюються в проекцію та координатну систему WGS84. Надалі наведено програмний код для завантаження даних радіограм георадарного знімання у форматі GeoTIFF у поле перегляду PictureBox:

```
Private Sub Zavantazhenny_radiogramy_Click()  
    Dim filePath As String  
    filePath = "D:\radiogram.tiff" ' Шлях до файлу radiogram.tiff на диску D  
    If System.IO.File.Exists(filePath) Then ' Перевірка наявності файлу  
        PictureBox1.Image = Image.FromFile(filePath) ' Завантаження зображення в  
PictureBox1  
    End If  
End Sub
```

Далі наведено код для завантаження векторних даних аномалій у форматі DXF та їх візуалізації в PictureBox.

У Visual Basic для візуалізації векторних файлів DXF використовується стороння бібліотека, така як AutoCAD.Interop. Але ця бібліотека не входить до

стандартного набору інструментів Visual Basic і не підтримується у Visual Studio Community Edition.

Як альтернативу можна використати сторонні бібліотеки, такі як NetDxf або DXFLib. Однак у цьому випадку код буде трохи складнішим і потребуватиме встановлення цих бібліотек.

```
Imports System.Drawing
Imports System.IO
Imports NetDxf
Private Sub Zavantazhennya_anomaliy_Click()
    Dim filePath As String
    filePath = "D:\anomalii.dxf" ' Шлях до файлу anomalii.dxf на диску D
    If File.Exists(filePath) Then ' Перевірка наявності файлу
        Dim dxf As New DxfDocument()
        dxf.Load(filePath)
        Dim bmp As Bitmap = dxf.Draw(800, 600) ' Розміри візуалізації зображення
        PictureBox1.Image = bmp ' Відображення зображення в PictureBox1
    Else
        MsgBox("Файл не знайдено!")
    End If
End Sub
```

Для використання цього коду спочатку потрібно встановити пакет NetDxf через менеджер пакетів NuGet. Для цього можна скористатися консоллю керування пакетами NuGet (Tools -> NuGet Package Manager -> Package Manager Console) та ввести команду Install-Package NetDxf.

Після встановлення пакету можна переходити до наступного кроку, який передбачає завантаження векторного шару меж об'єкта у форматі DXF та відображення його в PictureBox.

Нижче наведено приклад коду, який використовує бібліотеку NetDxf для завантаження векторного файлу DXF та відображення його в PictureBox:

```
Imports System.Drawing
Imports System.IO
Imports NetDxf
Private Sub Zavantazhennya_mezh_Click()
    Dim filePath As String
```

```

filePath = "D:\mezhy.dxf" ' Шлях до файлу mezhy.dxf на диску D
If File.Exists(filePath) Then ' Перевірка наявності файлу
    Dim dxf As New DxfDocument()
    dxf.Load(filePath)
    Dim bmp As Bitmap = dxf.Draw(800, 600) ' Розміри візуалізації зображення
    PictureBox1.Image = bmp ' Відображення зображення в PictureBox1
Else
    MsgBox("Файл не знайдено!")
End If
End Sub

```

Для аналізу того, чи всі елементи формату TIFF і DXF, завантажені в PictureBox, потрапили в межі об'єкту з файлу mezhy.dxf, нам знадобиться використати додаткові бібліотеки, які підтримують роботу з векторними файлами DXF та графічними файлами TIFF.

У цьому випадку ми знову скористаємося бібліотекою NetDxf для роботи з файлом DXF та бібліотекою System.Drawing для роботи з графічними файлами TIFF [279, 149].

Ось приклад коду, який виконує аналіз та порівняння об'єктів у файлі mezhy.dxf з елементами у PictureBox, що містяться у графічних файлах TIFF:

```

Imports System.Drawing
Imports System.IO
Imports NetDxf
Private Sub Analiz_mezh_Click()
    Dim dxfFilePath As String
    dxfFilePath = "D:\*.dxf"
    Dim tiffFilePath As String
    tiffFilePath = "D:\*.tiff" '
    If File.Exists(dxfFilePath) AndAlso File.Exists(tiffFilePath) Then
        Dim dxf As New DxfDocument()
        dxf.Load(dxfFilePath)
        Dim tiffImage As Image = Image.FromFile(tiffFilePath)
        Dim pictureBoxWidth As Integer = PictureBox1.Width
        Dim pictureBoxHeight As Integer = PictureBox1.Height
        ' Змінні для відслідковування, чи всі елементи в межах
        Dim allElementsInBounds As Boolean = True
        ' Перебір об'єктів в файлі DXF
    End If
End Sub

```

```

For Each entity As DxfEntity In dxf.Entities
    ' Отримання границь об'єкта в файлі DXF
    Dim entityBounds As RectangleF = entity.GetBounds()
        If entityBounds.Left < 0 OrElse entityBounds.Right > pictureBoxWidth OrElse
            entityBounds.Top < 0 OrElse entityBounds.Bottom > pictureBoxHeight Then
                allElementsInBounds = False
            Exit For
        End If
    Next
    If allElementsInBounds Then
        PictureBox1.Image = tiffImage
    End If
End Sub

```

Для перебудови межі в завантаженому файлі DXF в PictureBox відповідно до аналізу об'єктів, які вийшли за межі файлу `mezhu.dxf`, ми скористаємося бібліотекою `NetDxf` для роботи з файлом DXF.

Ось приклад коду, який виконує перебудову межі в файлі `mezhu.dxf` відповідно до аналізу об'єктів, які вийшли за межі:

```

Imports System.Drawing
Imports System.IO
Imports NetDxf
Private Sub Perebudova_mezh_Click()
    Dim dxfFilePath As String
    dxfFilePath = "D:\mezhu.dxf" ' Шлях до файлу mezhu.dxf на диску D
    Dim pictureBoxImage As Image = PictureBox1.Image
    If File.Exists(dxfFilePath) AndAlso pictureBoxImage IsNot Nothing Then
        Dim dxf As New DxfDocument()
        dxf.Load(dxfFilePath)
        Dim pictureBoxWidth As Integer = PictureBox1.Width
        Dim pictureBoxHeight As Integer = PictureBox1.Height
        dxf.Entities.Clear()
        Dim boundary As New DxfLwPolyline()
        boundary.Closed = True
        boundary.Layer = New DxfLayer("Boundary")
        boundary.Color = AciColor.Green
        boundary.Vertices.Add(New DxfLwPolylineVertex(0, 0))
        boundary.Vertices.Add(New DxfLwPolylineVertex(pictureBoxWidth, 0))
    End If
End Sub

```

```

        boundary.Vertices.Add(New DxfLwPolylineVertex(pictureBoxWidth,
pictureBoxHeight))
        boundary.Vertices.Add(New DxfLwPolylineVertex(0, pictureBoxHeight))
        dxf.AddEntity(boundary)
        dxf.Save(dxfFilePath)
        PictureBox1.Image = Image.FromFile(dxfFilePath)
    Else
        MsgBox("Файл mezhy.dxf або зображення в PictureBox не знайдено!")
    End If
End Sub

```

Для того, щоб відкрити діалогове вікно в Visual Basic за допомогою функції `Vyznachenny_okhoronnoi_zony_Click()`, нам потрібно скористатися класом `Form` і його методом `ShowDialog()`. Ось наведений приклад коду:

```

Private Sub Vyznachenny_okhoronnoi_zony_Click()
    ' Створення нової інстанції форми Vyznachenny_okhoronnoi_zony
    Dim dialogForm As New Vyznachenny_okhoronnoi_zony()
    ' Відкриття діалогового вікна та очікування його закриття
    dialogForm.ShowDialog()
    ' Після закриття діалогового вікна, програма продовжить виконувати код далі
    ' ...
End Sub

```

Після виклику методу `ShowDialog()`, програма буде очікувати закриття діалогового вікна `Vyznachenny_okhoronnoi_zony`. Після закриття вікна, виконання коду після виклику `ShowDialog()` продовжиться.

Ось приклад коду для форми `Vyznachenny_okhoronnoi_zony`, яка містить вибір побудови буферної зони навколо межі файлу `mezhy.dxf` на відстані 100 метрів, 200 метрів і 300 метрів, а також кнопки "ОК" і "Закрити":

```

Imports System.Drawing
Imports System.Windows.Forms
Public Class Vyznachenny_okhoronnoi_zony
    Inherits Form
    Private pictureBox As PictureBox
    Public Sub New(pictureBox As PictureBox)
        Me.pictureBox = pictureBox
        InitializeComponent()
    End Sub
    Private Sub InitializeComponent()

```



```

' Налаштування розмірів і розташування форми
Size = New Size(200, 180)
StartPosition = FormStartPosition.CenterScreen
' Додавання елементів у форму
' Label з описом
Dim label As New Label()
label.Text = "Виберіть розмір буферної зони:"
label.Location = New Point(10, 10)
label.AutoSize = True
Controls.Add(label)
' RadioButton для 100 метрів
Dim radioButton100 As New RadioButton()
radioButton100.Text = "100 метрів"
radioButton100.Location = New Point(10, 30)
radioButton100.AutoSize = True
radioButton100.Checked = True
Controls.Add(radioButton100)
' RadioButton для 200 метрів
Dim radioButton200 As New RadioButton()
radioButton200.Text = "200 метрів"
radioButton200.Location = New Point(10, 50)
radioButton200.AutoSize = True
Controls.Add(radioButton200)
' RadioButton для 300 метрів
Dim radioButton300 As New RadioButton()
radioButton300.Text = "300 метрів"
radioButton300.Location = New Point(10, 70)
radioButton300.AutoSize = True
Controls.Add(radioButton300)
' Button "ОК"
Dim buttonOK As New Button()
buttonOK.Text = "ОК"
buttonOK.Location = New Point(10, 100)
buttonOK.DialogResult = DialogResult.OK
AcceptButton = buttonOK
Controls.Add(buttonOK)
' Button "Закрити"
Dim buttonClose As New Button()

```

```

buttonClose.Text = "Закрити"
buttonClose.Location = New Point(90, 100)
buttonClose.DialogResult = DialogResult.Cancel
CancelButton = buttonClose
Controls.Add(buttonClose)
End Sub
Protected Overrides Sub OnFormClosing(e As FormClosingEventArgs)
    If DialogResult = DialogResult.OK Then
        Dim bufferSize As Integer = GetSelectedBufferSize()
        If bufferSize > 0 Then
            ' Завантаження межі файлу mezhy.dxf в Bitmap
            Dim boundaryBitmap As Bitmap = New Bitmap(pictureBox.Image)
            ' Побудова буферної зони
            Dim bufferedBitmap As Bitmap = BufferBoundary(boundaryBitmap, bufferSize)
            ' Встановлення зображення буферної зони в PictureBox
            pictureBox.Image = bufferedBitmap
            pictureBox.SizeMode = PictureBoxSizeMode.StretchImage
        End If
    End If
    MyBase.OnFormClosing(e)
End Sub
Private Function GetSelectedBufferSize() As Integer
    If Controls.OfType(Of RadioButton)().FirstOrDefault(Function(rb) rb.Checked
AndAlso rb.Text = "100 метрів") IsNot Nothing Then
        Return 100
    ElseIf Controls.OfType(Of RadioButton)().FirstOrDefault(Function(rb) rb.Checked
AndAlso rb.Text = "200 метрів") IsNot Nothing Then
        Return 200
    ElseIf Controls.OfType(Of RadioButton)().FirstOrDefault(Function(rb) rb.Checked
AndAlso rb.Text = "300 метрів") IsNot Nothing Then
        Return 300
    Else
        ' Повернути значення за замовчуванням, якщо нічого не вибрано
        Return 0
    End If
End Function
Private Function BufferBoundary(sourceBitmap As Bitmap, bufferSize As Integer) As
Bitmap

```

```

Dim bufferedBitmap As New Bitmap(sourceBitmap.Width, sourceBitmap.Height)
For x As Integer = 0 To sourceBitmap.Width - 1
  For y As Integer = 0 To sourceBitmap.Height - 1
    Dim pixel As Color = sourceBitmap.GetPixel(x, y)
    If pixel <> Color.White Then
      ' Зміна кольору пікселя на коричневий (буферна зона)
      bufferedBitmap.SetPixel(x, y, Color.brown)
      ' Побудова буферної зони
      For i As Integer = -bufferSize To bufferSize
        For j As Integer = -bufferSize To bufferSize
          Dim nx As Integer = x + i
          Dim ny As Integer = y + j
          If nx >= 0 AndAlso nx < sourceBitmap.Width AndAlso ny >= 0 AndAlso ny
< sourceBitmap.Height Then
            bufferedBitmap.SetPixel(nx, ny, Color.brown)
          End If
        Next
      Next
    End If
  Next
Next
Return bufferedBitmap
End Function
End Class

```

Цей код визначає форму `Vuznachenny_okhoronnoi_zonu`, яка успадковується від класу `Form`. При створенні екземпляра форми передається посилання на `PictureBox`, в який буде завантажено зображення буферної зони. Після закриття форми з результатом ОК виконується побудова буферної зони і завантаження її зображення в `PictureBox`.

Для експорту побудованої буферної зони у формат `.dxf` нам знадобиться використати бібліотеку, яка підтримує цей формат. Один з варіантів - використання бібліотеки `netDxf`, яка надає можливість створення та редагування файлів DXF. Ось приклад коду для експорту буферної зони у формат `.dxf`:

```

Imports System.Drawing
Imports System.Windows.Forms
Imports netDxf

```

```

Public Class Export_mezh
    Inherits Form
    Private pictureBox As PictureBox
    Public Sub New(pictureBox As PictureBox)
        Me.pictureBox = pictureBox
        InitializeComponent()
    End Sub
    Private Sub InitializeComponent() ' Налаштування розмірів і розташування форми
        Size = New Size(200, 100)
        StartPosition = FormStartPosition.CenterScreen ' Додавання елементів у форму
        ' Button "Експорт"
        Dim buttonExport As New Button()
        buttonExport.Text = "Експорт"
        buttonExport.Location = New Point(10, 30)
        buttonExport.DialogResult = DialogResult.OK
        AcceptButton = buttonExport
        Controls.Add(buttonExport) ' Button "Закрити"
        Dim buttonClose As New Button()
        buttonClose.Text = "Закрити"
        buttonClose.Location = New Point(90, 30)
        buttonClose.DialogResult = DialogResult.Cancel
        CancelButton = buttonClose
        Controls.Add(buttonClose)
    End Sub
    Protected Overrides Sub OnFormClosing(e As FormClosingEventArgs)
        If DialogResult = DialogResult.OK Then ' Створення нового файлу DXF
            Dim dxf As New DxfDocument() ' Додавання буферної зони до файлу DXF
            Dim boundaryEntity As New netDxf.Entities.Polyline()
            boundaryEntity.Color = netDxf.AciColor.Brown
            Dim bufferedBitmap As Bitmap = TryCast(pictureBox.Image, Bitmap)
            If bufferedBitmap IsNot Nothing Then
                For x As Integer = 0 To bufferedBitmap.Width - 1
                    For y As Integer = 0 To bufferedBitmap.Height - 1
                        Dim pixel As Color = bufferedBitmap.GetPixel(x, y)
                        If pixel = Color.Brown Then ' Додавання вершини до полілінії
                            Dim vertex As New netDxf.Vector2(x, y)
                            boundaryEntity.Vertices.Add(vertex)
                        End If
                    End For
                End For
            End If
        End Sub

```

```

        Next
    Next
End If
dxf.AddEntity(boundaryEntity) ' Експорт файлу DXF
Dim saveFileDialog As New SaveFileDialog()
saveFileDialog.Filter = "DXF files (*.dxf)|*.dxf"
saveFileDialog.DefaultExt = ".dxf"
saveFileDialog.AddExtension = True
If saveFileDialog.ShowDialog() = DialogResult.OK Then
    dxf.Save(saveFileDialog.FileName)
End If
End If
MyBase.OnFormClosing(e)
End Sub
End Class

```

При створенні екземпляра форми, ми передаємо посилання на PictureBox, з якого буде експортована буферна зона. Після закриття форми з результатом ОК, скрипт автоматично створює новий файл DXF та експортує у нього буферну зону.

Таким чином, всі необхідні функції та команди вже запрограмовані, і ми готові переходити безпосередньо до тестування створеного модуля на прикладі даних досліджень реального об'єкта історико-культурної спадщини.

5.4. Апробація програми (модуля) 3DDEM&RADAR

Для перевірки та апробації роботи створеного програмного модуля використовувалися графічні матеріали, які стосуються Львівської цитаделі, у різних форматах: георастрові дані ЦМР Цитаделі у форматі GeoTIFF, радіограма георадарного знімання окремих ділянок Цитаделі у форматі GeoTIFF, а також векторний шар, що містить оцифровані аномалії радіограм у форматі DXF, і межа об'єкта історико-культурної спадщини також у форматі DXF.

Тестування та апробація роботи програмного модуля для визначення областей інтересу з геопросторових даних сприяли перевірці правильності та ефективності його роботи перед впровадженням у реальне середовище [13, 102].

Після запуску виконуваного файлу .exe створеного модуля відкривається основне вікно програми, і розпочинається процес тестування всіх функцій модуля, використовуючи растрову інтерферограму об'єкта історико-культурної спадщини – Цитаделі у місті Львові у форматі GeoTIFF. Перша функція з функціонального блоку «Визначення АОІ з інтерферограми» відповідає за завантаження цього файлу у вікно модуля.

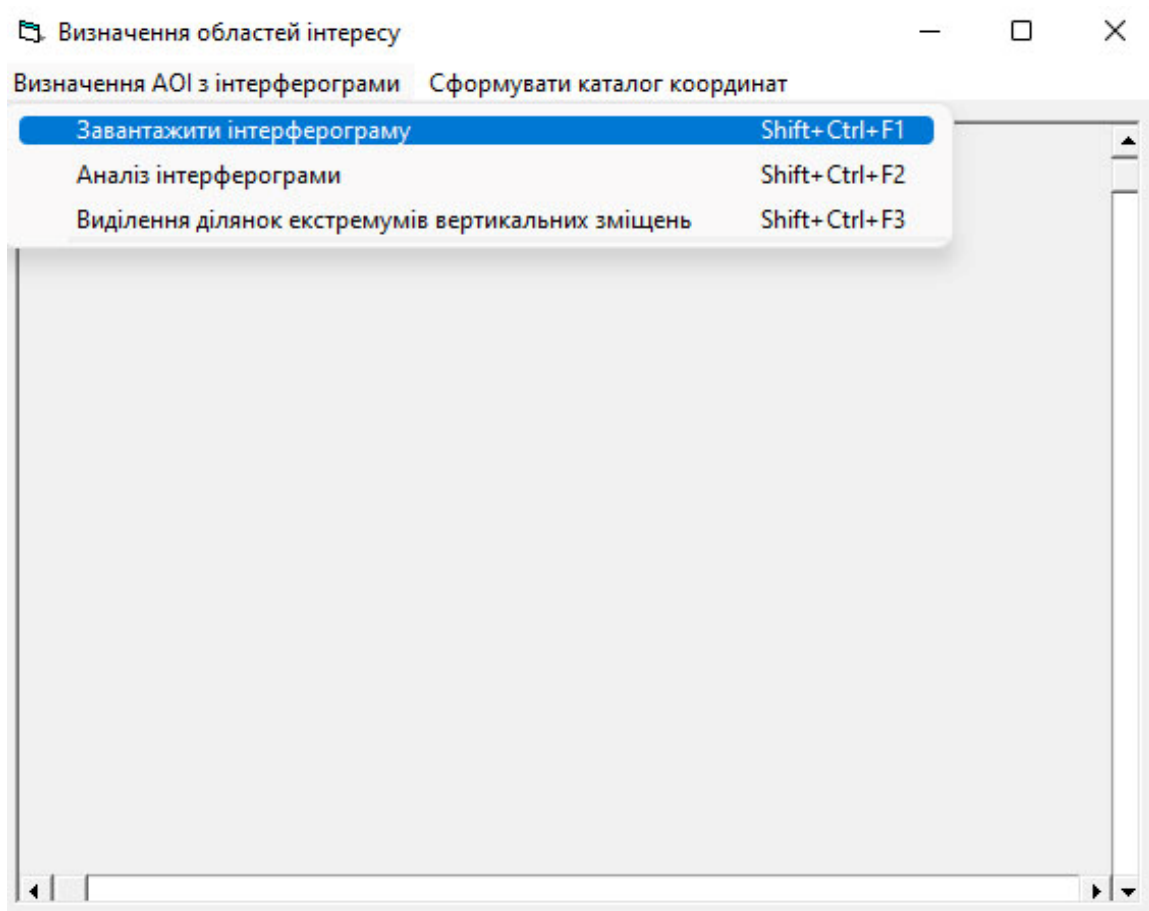


Рис.5.11. Виконання дії щодо завантаження файлу інтерферограми

Далі виконується дія "Аналіз інтерферограми" з того ж блоку (рис. 5.12). Під час виконання цієї дії відкривається додаткове вікно, в якому користувачу пропонується ввести мінімальне та максимальне значення вертикальних зміщень, що його цікавлять для аналізу (для цього необхідно ознайомитися з загальними значеннями вертикальних зміщень на інтерферограмі, отриманими під час її попереднього створення). У нашому випадку максимальні значення в районі, який нас цікавить, лежать у діапазоні від 16 до 30 сантиметрів (рис. 5.13).

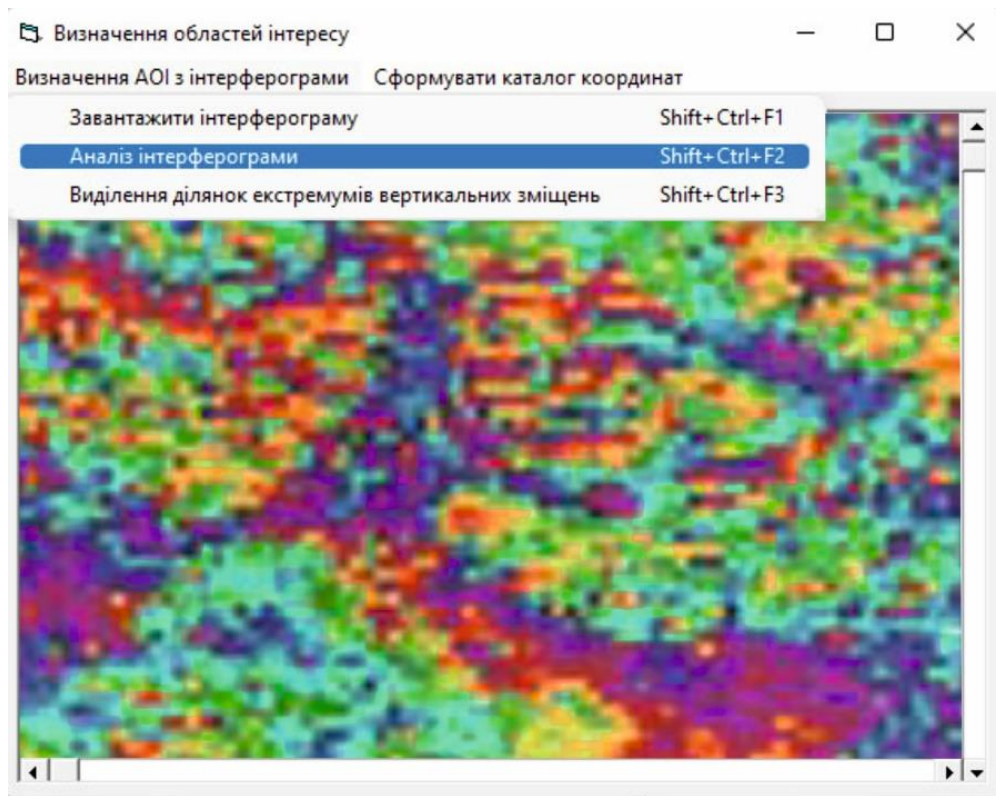


Рис.5.12. Виконання команди аналізу інтерферограми

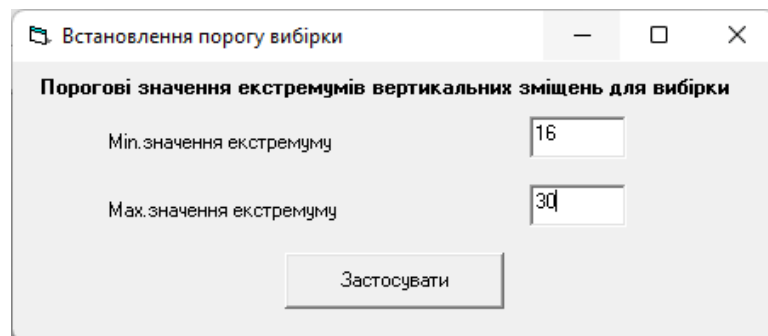


Рис.5.13. Вікно введення максимальних і мінімальних значень вертикальних зміщень для аналізу

Після цього модуль програми сканує всі пікселі на інтерферограмі, щоб визначити величину вертикальних зміщень в кожному з них [181, 275]

Потім виконується команда "Виділення ділянок екстремумів вертикальних зміщень" (рис.5.14). На цьому етапі програма обробляє результати аналізу інтерферограми, групуючи ті пікселі, які потрапляють в заданий діапазон вертикальних зміщень. Ці області виділяються помаранчевим кольором та виводяться у вікно програми замість відкритої інтерферограми (рис.5.15).

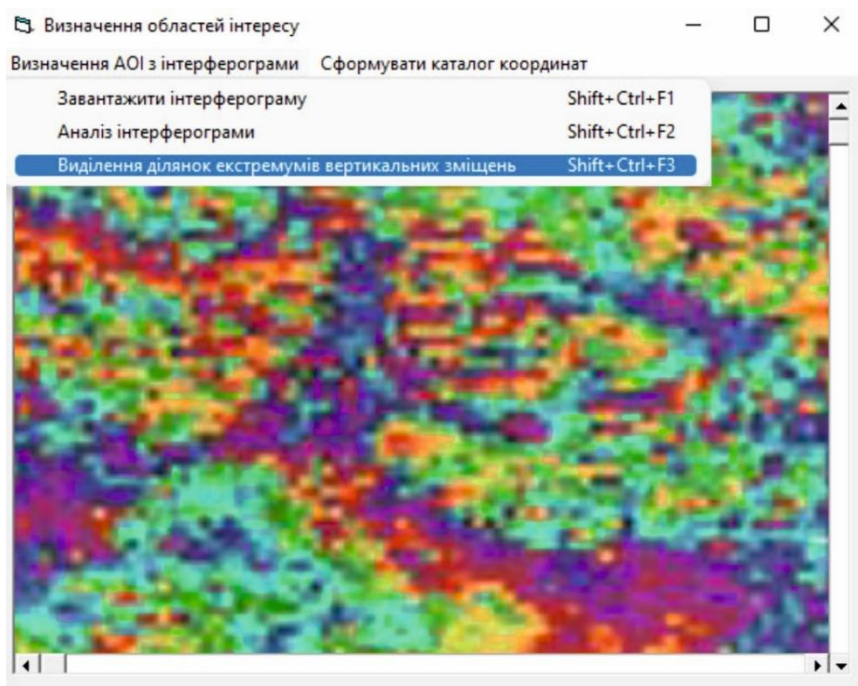


Рис.5.14. Виконання команди "Виділення ділянок екстремумів вертикальних зміщень"

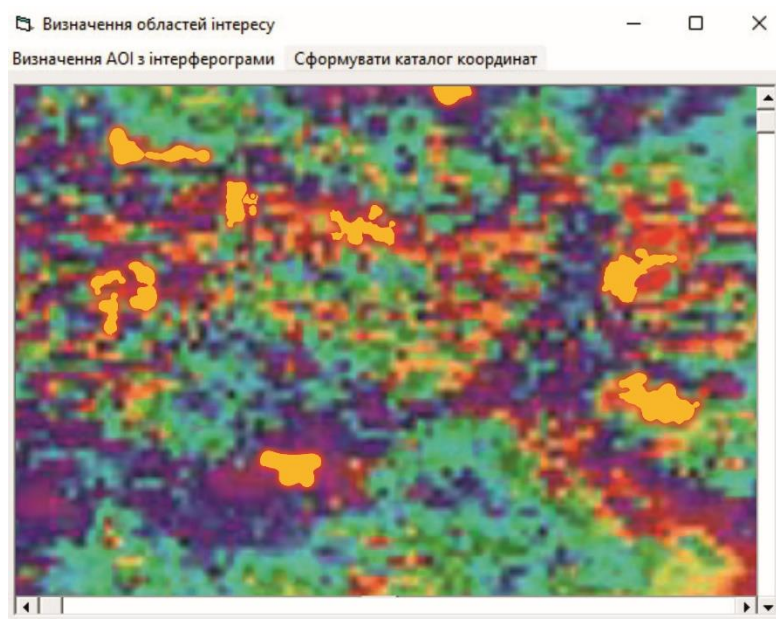


Рис.5.15. Вікно з виділеними ділянками максимальних зміщень з інтерферограми

Потім виконується команда другого блоку "Сформувати каталог координат". Це відкриває ще одне діалогове вікно, в яке завантажуються чотири пари координат кожного виділеного фрагменту (чотирьох його кутів). Координати кожного фрагменту розділені пробілом. Всі координати завантажуються в системі координат WGS84 (рис.5.16).

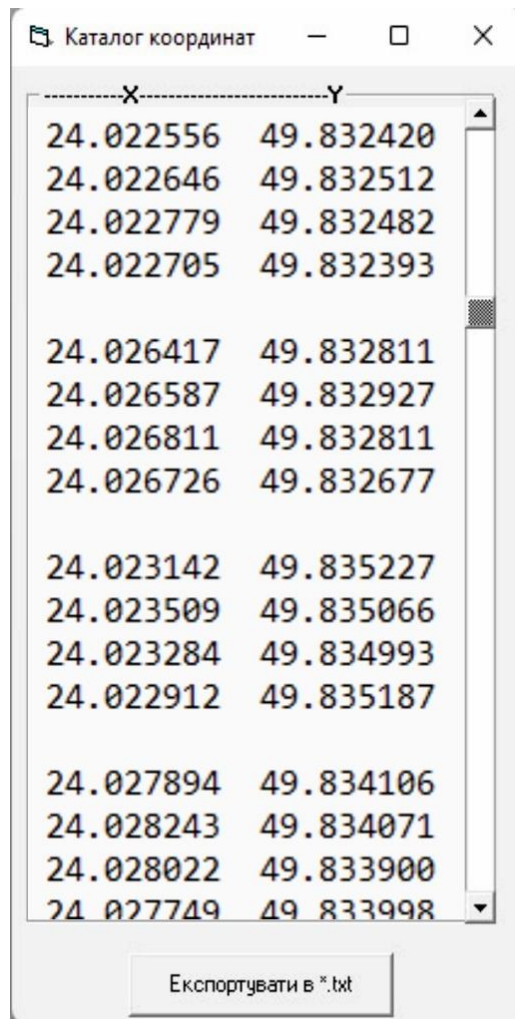


Рис.5.16. Вікно з завантаженими координатами виділених АОІ

Для того щоб зберегти координатні дані у текстовий файл, потрібно натиснути кнопку «Експортувати в *.txt». Після цього модуль попереджає, що текстовий файл буде автоматично збережено у кореневому каталозі модуля (див. рис.5.17).

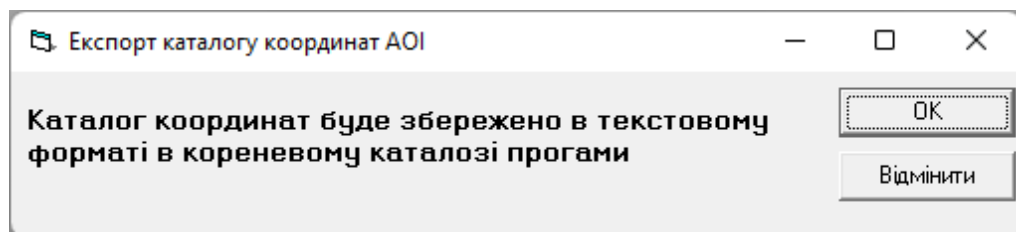


Рис. 5.17. Попереджувальне вікно збереження текстового файлу з координатами

Проведено перевірку другого функціонального блоку, що стосується створення загальної тривимірної моделі. Робота розпочалася з виконання

команди на завантаження цифрової моделі реального об'єкта (ЦМР) (рис.5.18), конкретно Цитаделі, у форматі 3DS.

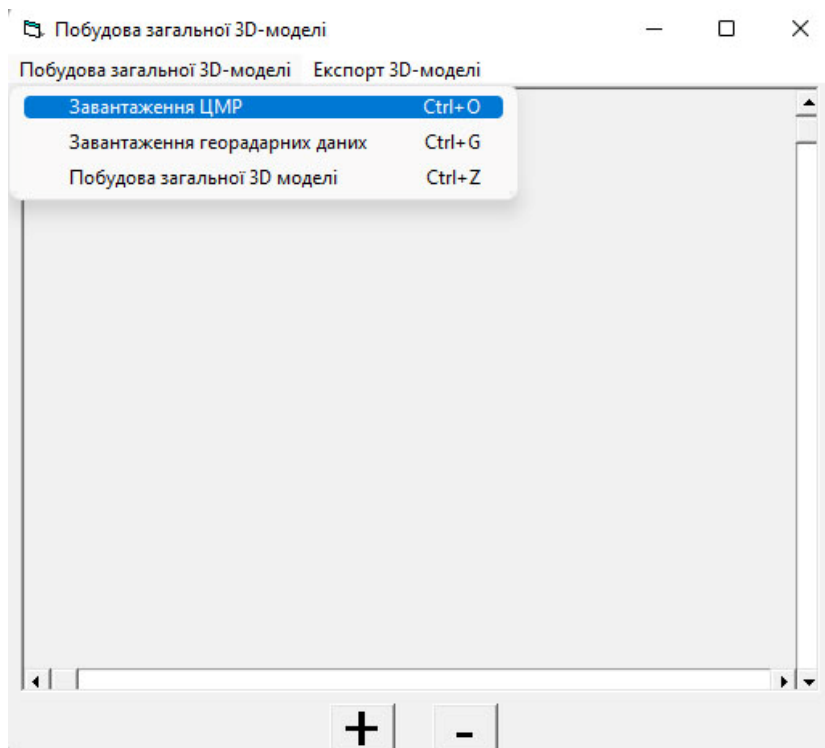


Рис.5.18. Виконання команди «Завантаження ЦМР»

Потім було виконано завантаження 3D-профілю георадарних даних (рис.5.19).

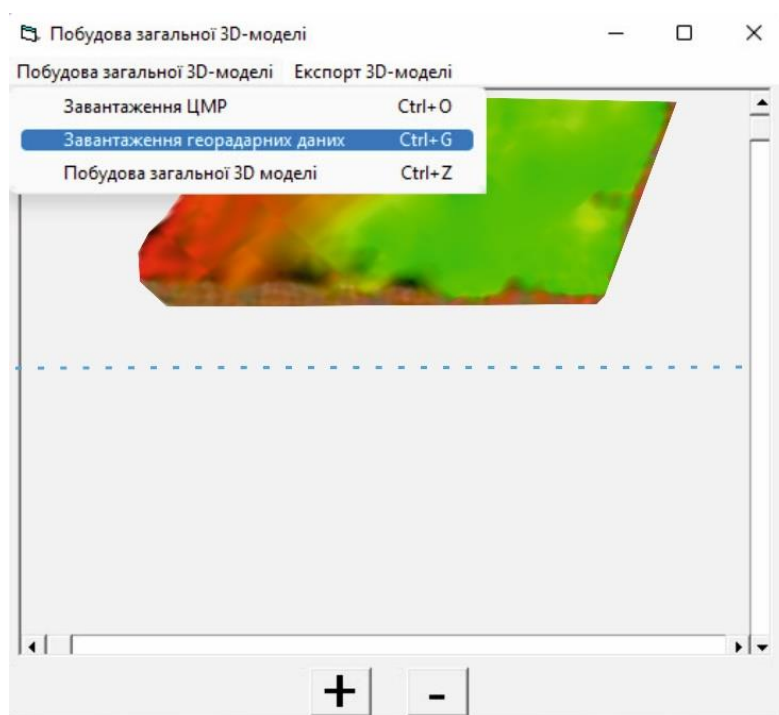


Рис.5.19. Виконання команди «Завантаження георадарних даних»

Після завантаження даних наземної і підземної частин елементів, ми переходимо до виконання основної команди цього модуля - «Побудова загальної 3D-моделі». Це призводить до того, що програма об'єднує дві моделі в одну (рис.5.20).

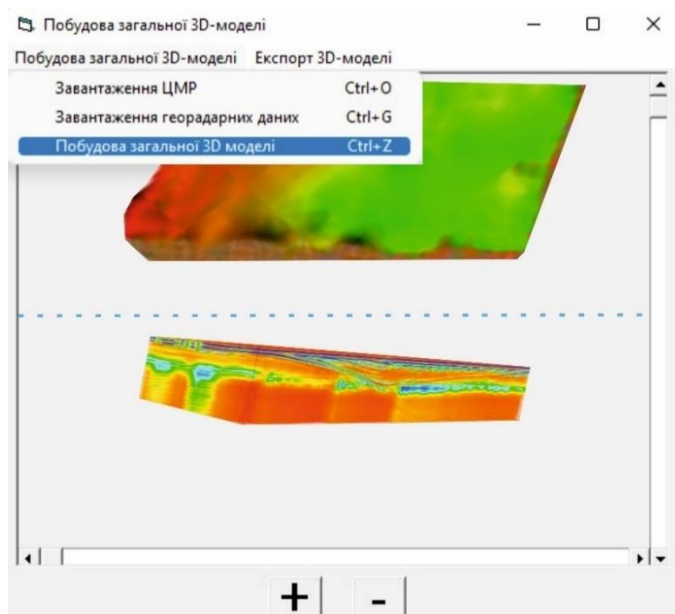


Рис.5.20. Виконання команди «Побудова загальної 3D-моделі»

Під час виконання другого блоку спадного меню, який містить лише одну команду, ми здійснили експорт загальної 3D-моделі у файл з розширенням 3DS або XYZ (рис.5.21).

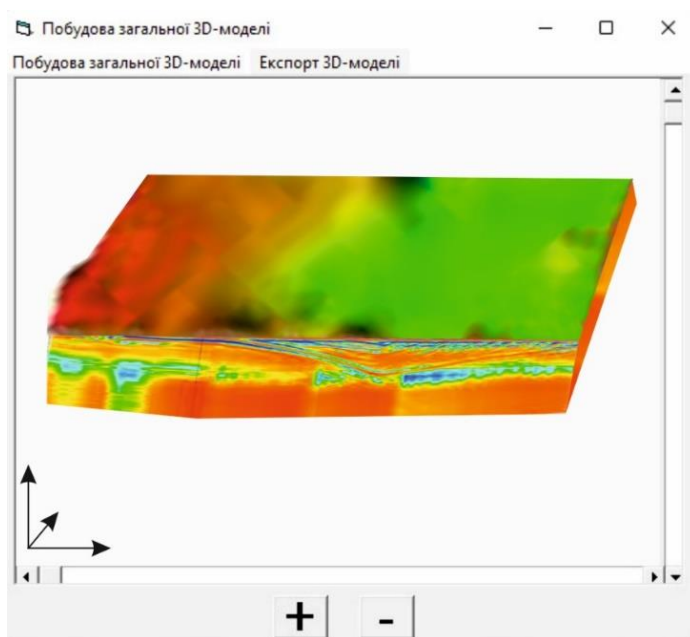


Рис.5.21. Виконання команди «Експорт 3D-моделі»

При виконанні даної команди з'являється уточнююче вікно як на рис.5.22.

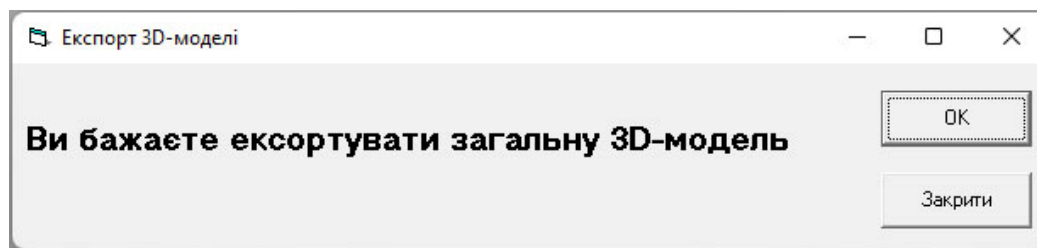


Рис.5.22. Вигляд уточнювального вікна при експорті 3D-моделі

Результатом є побудова загальної 3D-моделі об'єкта історико-культурної спадщини за даними ЦМР і георадарного знімання. Апробація третього функціонального блоку розпочалася з тесту першого блоку меню «Завантаження даних». Почали з виконання команди «Завантаження 3D-моделі» (рис.5.23), під час якої було завантажено ЦМР Цитаделі у форматі GeoTIFF.

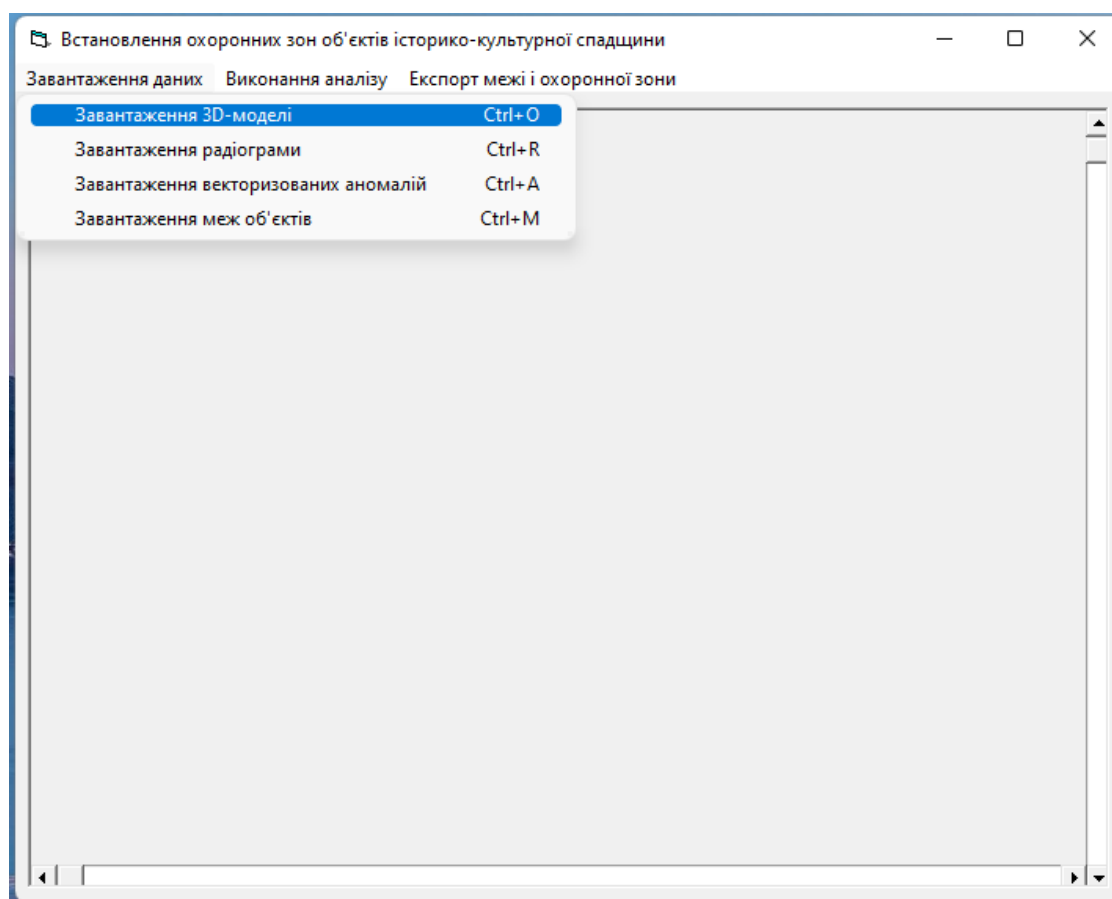


Рис.5.23. Виконання команди «Завантаження 3D-моделі»

Потім перейшли до наступного кроку - завантаження радіограми, отриманої з георадарного знімання у форматі GeoTIFF (рис.5.24).

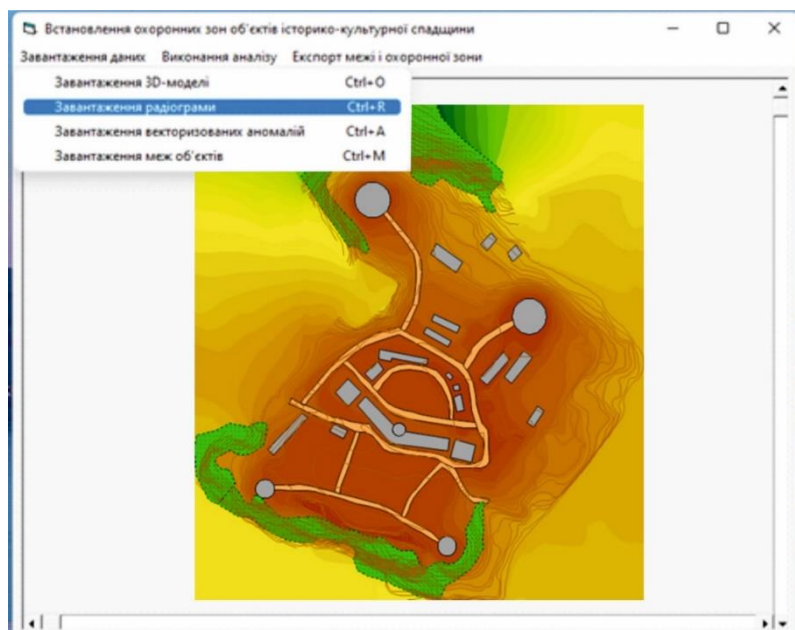


Рис.5.24. Виконання команди «Завантаження радіограми»

Потім ми перейшли до виконання команди завантаження векторизованих аномалій за радіограмами георадарного знімання у векторному обмінному форматі DXF [251, 256, 211] (рис.5.25).

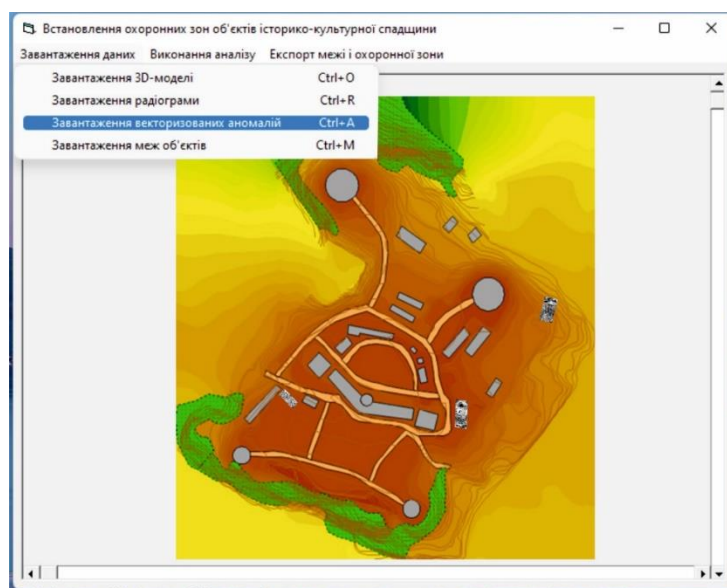


Рис.5.25. Виконання команди «Завантаження векторних аномалій»

На жаль, на рисунку 5.25 не відображено векторного шару векторизованих аномалій через те, що георадарні дослідження проводилися лише в окремих точках інтересу на території Цитаделі, а виявлені аномалії є ще меншими за радіограми за розміром. Останнім кроком першого блоку меню було

завантаження існуючих меж об'єкта, визначених Міністерством культури України, у векторному обмінному форматі DXF (рис.5.26).

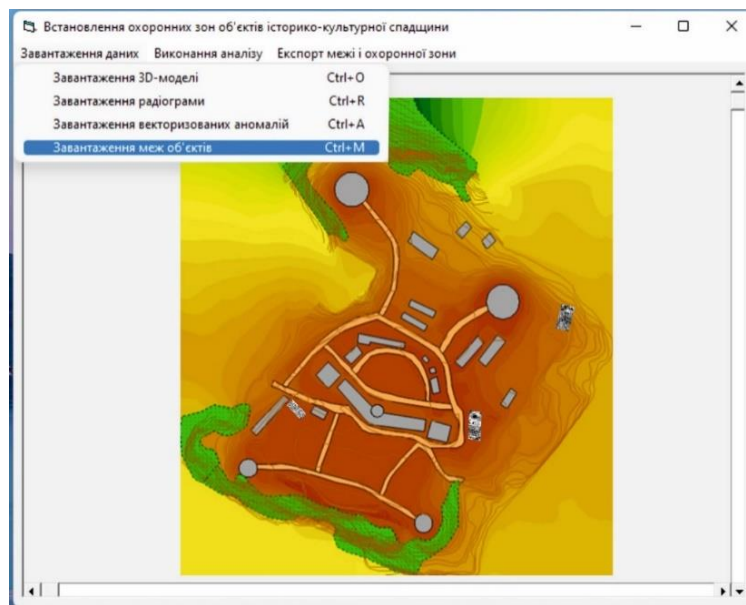


Рис.5.26. Виконання команди «Завантаження меж об'єктів»

На практиці, набір даних, який було завантажено у вікні на рисунку 5.27, є остаточним для виконання аналізу і можна переходити до наступного блоку меню. Першою командою, яку ми виконали у наступному блоці, є «Виконання аналізу меж». Виконання цієї команди приховане, і її результат завантажуються в пам'ять комп'ютера. Іншими словами, після виконання цієї команди зображення у вікні фактично не змінюється (рис. 5.27).

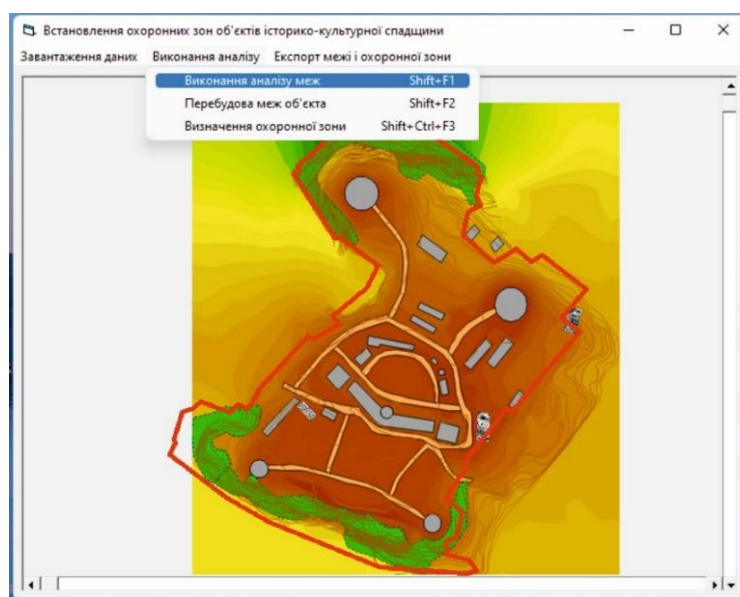


Рис.5.27. Виконання команди «Виконання аналізу меж»

Ця команда виконує оверлейний аналіз завантажених даних, а потім модуль визначає, чи всі додаткові елементи входять в існуючу межу об'єкта. Якщо це так, наступні команди стають зайвими. Якщо ні, програма перебудовує межу відповідно до нововиявлених елементів. Наступним кроком є виконання команди перебудови меж об'єктів (рис. 5.28), що призводить до візуалізації результатів попереднього кроку з пам'яті модуля у полі даних.

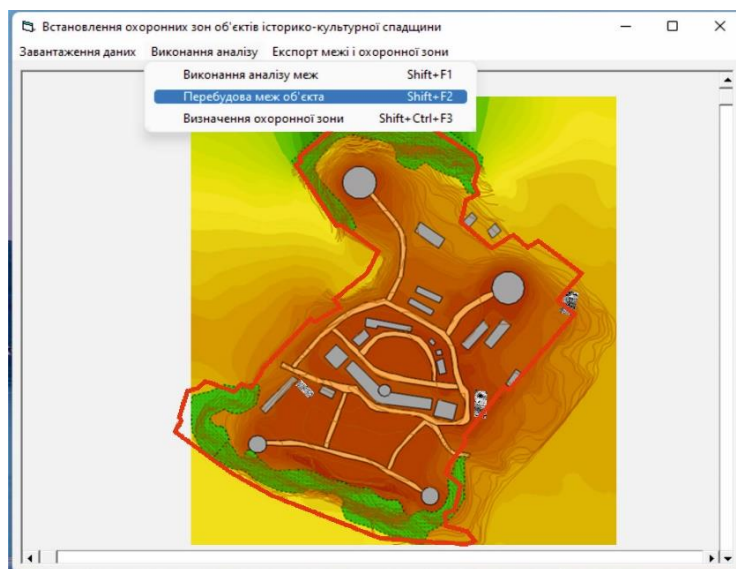


Рис.5.28. Виконання команди «Перебудова меж об'єкта»

Після внесення змін у межі об'єкта відповідно до нових елементів проводиться формування охоронної зони історико-культурної спадщини (рис.5.29).

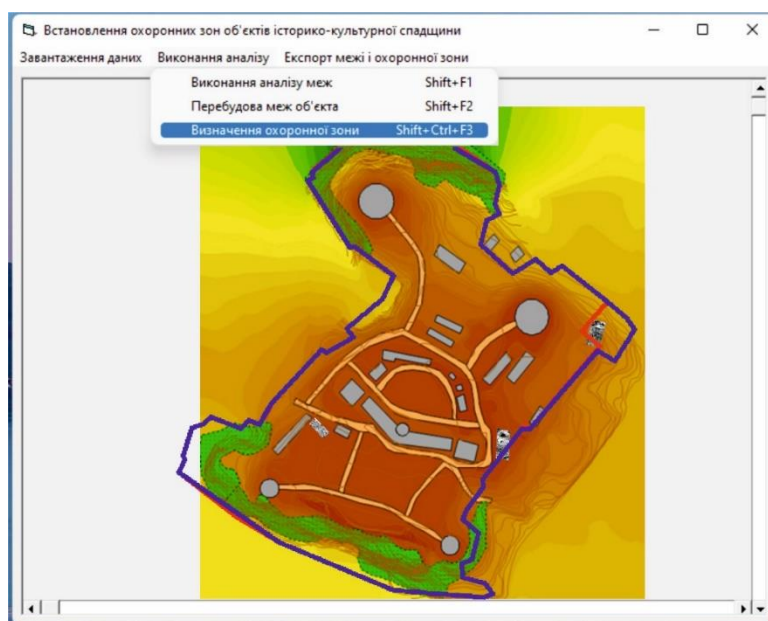


Рис.5.29. Виконання команди «Визначення охоронної зони»

У зв'язку з постійними змінами законодавчих норм щодо охоронних зон, передбачено створення охоронної зони з буфером на 100, 200 та 300 метрів. У рамках нашого тесту ми побудували буфер на відстані 100 м від оновленої межі об'єкта (рис.5.30).

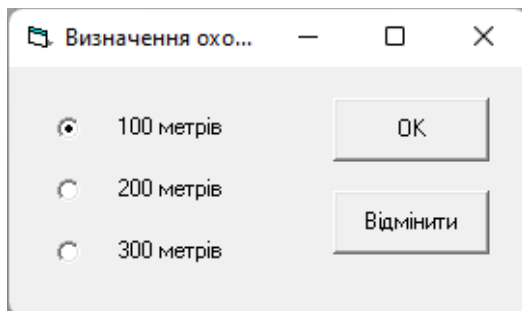


Рис.5.30. Діалог вибору радіусу буферної зони межі об'єкта

В результаті виконання цього блоку ми отримуємо оновлену межу об'єкта історико-культурної спадщини разом з автоматично побудованою охоронною зоною (рис.5.31). Після цього результат можна експортувати у векторний формат DXF і відкрити у будь-якій геоінформаційній або САД-системі для подальшої роботи (рис.5.32).



Рис.5.31. Вікно з результатом роботи програмного модуля

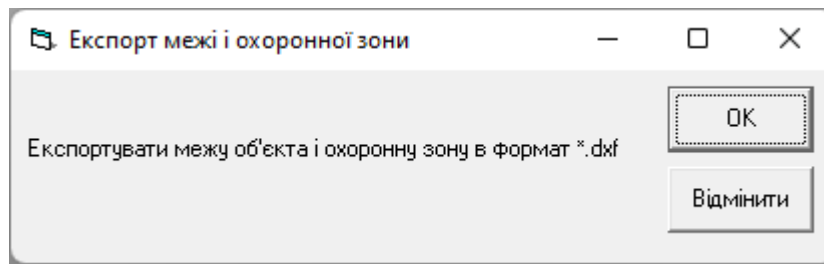


Рис.5.32. Діалогове вікно, що виникає при виконанні команди експорту

Для перевірки відображення результатів виконання програмного модуля ми відкрили експортовані дані у програмі MapInfo. В результаті були спостережені ті самі межі, які були видимі у вікні створеного програмного модуля (рис.5.33).

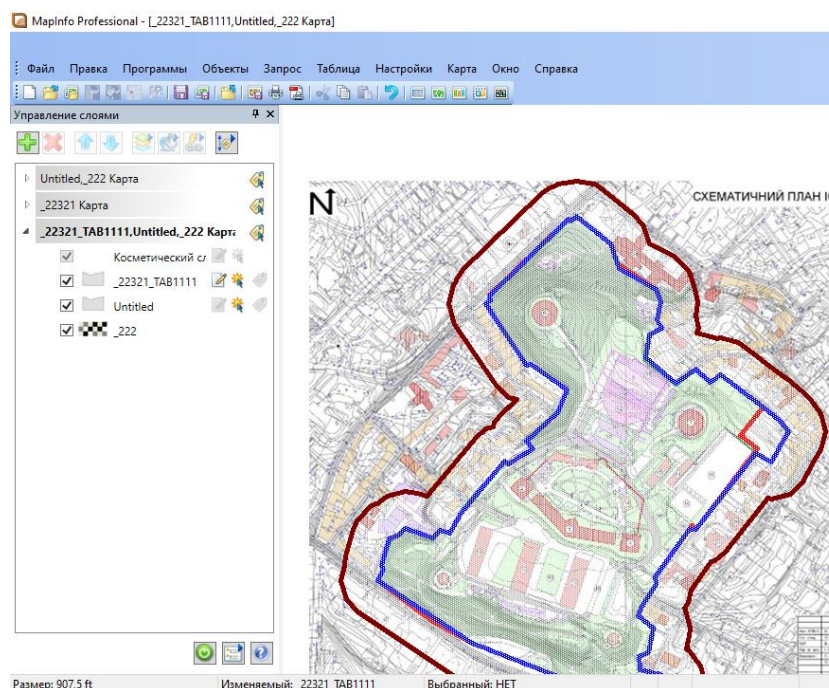


Рис.5.33. Експортовані з програмного модуля межі, відкриті в ПП MapInfo

Висновки та рекомендації до розділу 5

Експлікація наукових досліджень щодо створення програмного забезпечення для напіваавтоматичного визначення ділянок досліджень та відображення 3D-моделі ЦМР і георадарного знімання дозволила сформувані такі висновки:

1. Розроблено алгоритм, який включає три функціональні блоки (визначення ділянок з інтерферограм, побудова 3D ЦМР, уточнення меж об'єктів історико-культурної спадщини) та складається з 7 основних кроків, що забезпечує точне визначення меж земель історико-культурного призначення.

2. Аналіз створення інтерфейсу програмного модуля 3DDEM&RADAR свідчить про розробку інтуїтивного макета оболонки з додатковими функціями «гарячих клавіш», що сприяє зручності використання програми та підвищує ефективність її роботи.

3. Розгляд програмного коду 3DDEM&RADAR показав необхідність використання додаткових бібліотек для опрацювання даних ДЗЗ і картографічних процесів через обмежені можливості VisualBasic у цих завданнях. Однак, сумісність мови програмування з операційною системою Microsoft Windows забезпечує стабільну роботу програмного забезпечення.

4. Апробація модуля на прикладі об'єкта «Львівська цитадель» продемонструвала його ефективність, без помилок і з досягненням запланованих результатів. Це позитивно вплине на дослідження та корекцію меж історико-культурних земель і їх охоронних зон.

5. В результаті досліджень рекомендується використовувати новітні технології, такі як машинне навчання і комп'ютерна графіка, для покращення продуктивності та функціональності програмного забезпечення.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення науково-прикладного завдання, яке полягає в розробці комплексної системи моніторингу земель історико-культурного призначення на основі даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та георадарного знімання. Основні результати дослідження підтвердили виконання завдань дисертації та досягнення її мети.

1. Досліджено особливості земель історико-культурного призначення, що включають спеціальний правовий режим охорони та використання з метою збереження культурної спадщини. Визначено, що такі землі відіграють важливу роль у збереженні національних пам'яток та історичних цінностей, що вимагає особливої уваги до їхнього раціонального використання та моніторингу задля контролю за їх станом.

2. Систематизація завдань та методів просторової ідентифікації й моніторингу території об'єктів історико-культурної спадщини (ОІКС) з використанням геоінформаційних технологій, даних ДЗЗ та георадарного знімання дозволила вперше створити концептуальну модель, що включає етапи збору, аналізу та інтерпретації даних. Використання ортофотопланів і хмар точок із безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у поєднанні з космічними радіолокаційними даними дозволяє точно визначати зони для подальших георадарних досліджень.

3. Вперше розроблена математична подель поєднання результатів радіолокаційного та георадарного знімання, що сприяла синергії інформації з різних джерел, що значно покращує точність визначення вертикальних зміщень та характеристик підземних об'єктів. Це дозволило вдосконалити підходи до моніторингу земель історико-культурного призначення.

4. Вдосконалена технологія моніторингу земель історико-культурного призначення на основі супутникової радіолокаційної інтерферометрії показала високу ефективність у детальному аналізі вертикальних зміщень об'єктів.

Ідентифіковано 24 точки зміщень на Львівській цитаделі та 2 точки на Звенигородському городищі, що дозволило уточнити динаміку деформацій земної поверхні.

5. Вдосконалена технологія георадарного знімання підземних елементів ОКС дала можливість точно дослідити визначені точки екстремумів і виявити підземні об'єкти на території Львівської цитаделі та «Древнього Звенигорода». Це сприяло уточненню положення історичних структур і підвищило точність збереження об'єктів культурної спадщини.

6. Технологія побудови та порівняння цифрових моделей поверхні (ЦМП) на основі аерознімання з БПЛА і лідарного знімання продемонструвала високу точність та надійність лідарних даних. Це забезпечило покращений моніторинг земель історико-культурного призначення і більш точне визначення меж досліджуваних територій.

7. Розроблені алгоритми поєднання даних радіолокаційного та георадарного знімання для створення єдиної 3D-моделі підвищили точність інтеграції інформації, що сприяло точнішому моніторингу об'єктів історико-культурного призначення.

8. Створено та впроваджено програмний модуль 3DDEM&RADAR, який дозволяє інтегрувати дані з різних джерел та створювати точні 3D-моделі ЦМР і георадарного знімання. Модуль ефективно визначає ділянки для досліджень, що дозволяє покращити точність моніторингу та корекції кадастрових меж земель історико-культурного призначення.

9. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження знайшли практичне підтвердження у впорядкуванні історико-культурного заповідника «Древній Звенигород».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аерокосмічна зйомка для дослідження та охорони археологічної спадщини (організаційні та правові аспекти використання).
<https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=8623>
2. Андреев С. & Жилін В. (2019). Застосування даних аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів для побудови 3d-моделей місцевості. *Системи правління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава: ПНТУ, 1 (53), 3-16. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.003>.
3. Бабушка А. В. & Бурштинська Х. В. (2019). Авіаційне лазерне сканування: навч. посіб. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 114 с.
4. Бондар, К. (2023). Георадарне сканування та історична інтерпретація місця розташування Богоявленського собору Києво-Братського монастиря. *Київська Академія*, (20), 239–260. <https://doi.org/10.18523/1995-025X.2023.20.239-260>
5. Бурштинська Х. В. (1999). Аерофотографія : Підруч. для студ. вищ. закл. Освіти. Львів: астрон.-геодез. т-во, 340 с.
6. Бурштинська Х. В. & Станкевич С. А. (2010). Аерокосмічні знімальні системи: навч. посіб., Львів: Нац. ун-т "Львів. політехніка", 292 с.
7. Бурштинська Х. В., Станкевич С. А. & Денис Ю. В. (2019). Фотограмметрія та дистанційне зондування. Книга 2: підручн. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 216 с.
8. Глотов В. М. Фис М. М., Колесніченко В. Б. & Гуніна А. В. (2022) Застосування БПЛА у військовій справі та аерозніманні: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 196 с.
9. Гнера В.А. (2012). Застосування аерофотограмметричних методів дистанційного зондування земної поверхні в археології. *Праці Центру пам'яткознавства*, 21, 76-91.
10. Гордюк І.В., Костюченко О.А. & Хлюпин О.А. (2019). Інноваційні технології створення макетів в архітектурному проєктуванні. *Science and*

- society. Proceedings of the 12th International conference. Accent Graphics Communications & Publishing. Hamilton, Canada, 12–17.
11. Грицюк Ю. & Андрушакевич О. (2018). Засіб для визначення якості програмного забезпечення методами метричного аналізу. Науковий вісник НЛТУ України, 28(6), 159-171. <https://doi.org/10.15421/40280631>
 12. Губар Ю. П., Хавар Ю. С., Сай В. М., Винарчик Л. В., Гулько О. Р. & Мартинюк Т. В. (2021) Словник з кадастру, землеустрою та оцінки нерухомості (основні терміни та поняття): словник. Львів: Центр Європи, 338 с.
 13. Гурман І., Чешун В., Джулій А. & Чорненький В. (2021). Оціночні функції і метрики для виявлення помилок при тестуванні програмного забезпечення. *Measuring and computing devices in technological processes*, (2), 97–102. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2021-68-2-12>
 14. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручник для студ. вищих навч. закладів / С. С. Кохан, А. Б. Востоков. К. : Вища школа, 2009. 512 с.
 15. Дивак М., Манжула В., Мельник А. & Юшко А. (2024). Архітектура програмного забезпечення для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 125–139. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-15>
 16. Дорожинський О. Л. (2014). Наземне лазерне сканування в фотограмметрії. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 96 с.
 17. Дорожинський О.Л. (2019). Фотограмметрія та дистанційне зондування. Книга 1. Підручник. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 176с.
 18. Зборщик В. І. & Четверіков Б. В. (2022). 3D моделювання архітектурних об'єктів історико-культурної спадщини за допомогою мобільного додатку. Геофорум-2022 : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6–8 квітня 2022 р., Львів, Яворів, Брюховичі, 8–10.

19. Івакін В. & Зоценко І. (2020). Перспективи використання супутникових знімків для моніторингу стану пам'яток культурної спадщини. *Пам'яткознавчі студії: проблеми, практики, перспективи розвитку*, 1, 301-308
20. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500, затверджена наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України від 9 квітня 1998 року № 56. (1998). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0393-98#Text>
21. Катущков В., & Куліковська О. (2022). Проблеми фотограмметричного метода визначення площини забудованої території. Містобудування та територіальне планування, (81), 182–188. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.81.182-188>
22. Малолітнева В. К., Борисов А. В., Гурова А. М. & Малишев О. О. (2021). Основні результати наукового проєкту «Правові та організаційні аспекти використання аерокосмічної зйомки для дослідження й охорони археологічної спадщини України». *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*, 68, 174-179
23. Малолітнева В. & Гурова А. (2021). Правові засади використання аерофотозйомки для охорони об'єктів культурної спадщини в Україні. *Юридичний Вісник*, 6, 59-70. <https://doi.org/10.32837/yuv.v0i6.2266>
24. Мартин А., Новаковська І. & Новаковський Д. (2024). Управління історико-культурною цінністю територій через формування історичних ареалів міст. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*, [S.l.], 1, 35-48. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2024.01.03>.
25. Методи використання даних аерокосмічного знімання в задачах землеустрою : автореф. дис ... канд. техн. наук : [спец.] 05.24.04 / Марина Олегівна Пілічева, Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: 2016, 20 с.

26. Мозговий Д. К. (2018). Супутниковий моніторинг повеней за даними радарної зйомки С-діапазону. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 16, 4–12
27. Нещадим В.О. & Дорошенко Ю.О. (2018). Комп'ютерні методи реставрації фасадних елементів пам'яток архітектури. IX Міжнародна науково-практична конференція «Архітектура та екологія», 30 жовтня – 1 листопада, 85–87.
28. Нещадим В.О. & Дорошенко Ю.О. (2019). Пропозиційна класифікація елементів фасадного оздоблення будівель за їх об'ємним скануванням. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія та практика дизайну», 11 березня 2019 р., 116–117.
29. Нещадим В.О. & Дорошенко Ю.О. (2021). Лазерне сканування рельєфних поверхонь як розвиток фотограметричних методів. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Політ. Сучасні проблеми науки», м. Київ, 5–9 квітня 2021 р.
30. Окрушко, Д., & Каштальян, А. (2023). Система розподілу та оцінювання завдань у процесі розробки програмного забезпечення. *Computer Systems and Information Technologies*, (2), 86–97. <https://doi.org/10.31891/csit-2023-2-12>
31. Петраковська, О., & Михальова, М. (2023). Підходи до класифікації і реєстрації обмежень у використанні земель. *Просторовий розвиток*, (6), 329–337. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.329-337>
32. Петраковська, О., & Михальова, М. (2023). Структуризація обмежень щодо використання земель в Україні. *Просторовий розвиток*, (3), 134–143. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.3.134-143>
33. Петраковська, О., & Михальова, М. (2022). Підходи до просторового планування: ретроспектива та сучасний стан. *Просторовий розвиток*, (1), 117–128. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.117-128>
34. Про затвердження Порядку обліку об'єктів культурної спадщини. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0528-13#Text>

35. Піняжко Т. (2005). Львівська цитадель. Львів: Ліга-Прес., 91 с.
36. Сметанін К. (2018). Особливості використання безпілотних літальних апаратів в екологічному моніторингу. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 3 (49), 22-25. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.3.022>.
37. Три княжі столиці Львівщини.
https://galinfo.com.ua/articles/try_knyazhi_stolytsi_lvivshchyny_290872.html
38. Територія городища літописного Звенигорода.
<https://zvenyhorod.org/terytoriya-gorodyshha-litopysnogo-zvenygoroda>
39. Хіль О. С. & Яковина В. С. (2023). Аналіз проблеми застосування методів машинного навчання для оцінювання та прогнозування дефектів програмного забезпечення. *Науковий вісник НЛТУ України*, 33(3), 110-116.
<https://doi.org/10.36930/40330316>
40. Четверіков Б., Михайлюк В. & Согор А. (2017). Технологія створення цифрової моделі місцевості на прикладі Сирецького району м.Києва з використанням архівних даних. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, І(33), 116-119.
41. Четверіков Б.В., Бондар К.М., Хоменко Р.В., Діденко С.В. & Шейхет М.Г. (2017). Визначення розташування історичних об'єктів за допомогою фотограмметричного методу та методів наземних неруйнівних досліджень. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 85, 94-103.
42. Четверіков Б. (2017). Методика визначення перенесення меж Нового єврейського кладовища у Львові за допомогою геоінформаційних систем. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, ІІ(34), 98-101.
43. Четверіков Б. (2018). Методика визначення меж зруйнованого старого некрополя у м.Броди за допомогою ГІС-технологій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, І(35), 169-172.
44. Четверіков Б. (2019). Методика визначення фундаментів зруйнованих будівель за архівними аерознімками для відновлення об'єктів історико-культурної спадщини. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, І(37), 100-105.

45. Четверіков Б. & Кілару В. (2020). Визначення історичних меж «Старого юдейського кладовища» у м.Львові за допомогою картографічного методу та архівних аерознімків. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, II(40), 72-77.
46. Четверіков Б. В., Хінціцький О. В. & Калинич І. (2021). Методика картографування об'єктів історико-культурної спадщини засобами ГІС-технологій з використанням архівних картографічних та аероматеріалів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(41), 97–103.
47. Четверіков Б. В., Ванчура Р. Б. & Смолій К. Б. (2022). Методика визначення планового положення інфраструктури зруйнованого Звенигородського замку. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(43), 71–77.
48. Четверіков Б., Бабій Л., Кузик З., Заяць І. & Процик М. (2022). Дослідження цифрових моделей рельєфу нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини, створених за різні роки. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 96, 65–76.
49. Четверіков Б. (2023). Застосування методів радіолокаційної інтерферометрії та георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(45).
50. Четверіков Б. В. & Процик М. Т. (2023). Розроблення макета та основних функцій програмного модуля візуалізації результатів обробки геопросторових даних. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 2 (46), 106–112.
51. Chetverikov, B., Babiy, L., Oryński, S. & Różycki, S. (2024). Methods for Designating Protective Zones of Historical and Cultural Purpose Using Non-Invasive Methods—Two Case Studies for Ukraine and Poland. *Remote Sensing*, 16(13), 2330. <https://doi.org/10.3390/rs16132330>

52. Четверіков Б. В. & Тревого І. С. (2024). Моніторинг меж нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини картометричним методом. *Укр. геогр. журнал*, № 2, 61–70. <https://doi.org/10.15407/ugz2024.02.061>
53. Четверіков Б. В., Шейхет М. Г. & Грицюк Т. Ю. (2021). Визначення меж некрополів і меморіалів дистанційними та наземними неінвазивними методами: колективна монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 128с.
54. Четверіков Б. В. (2016). Створення цифрової моделі місцевості концтабору Stalag-328 (Цитадель) за допомогою ГІС-технологій. Матеріали III Міжнародної наукової конференції. Пам'ятки Тустані в контексті освоєння Карпат у доісторичну добу та в середньовіччі; проблеми їх збереження та використання, 179–180.
55. Четверіков Б. В. (2016). Визначення розташування історичних об'єктів за допомогою фотограмметричного методу та методів наземних неруйнівних досліджень. Матеріали тез XXI Міжнародної науково-технічної конференції "Геофорум-2016", 41–42.
56. Четверіков Б. В. (2016). Визначення місць масових поховань у Бабиному Яру за архівними картографічними та аероматеріалами. Збірник тез доповідей. Друга Міжнародна науково-технічна конференція «Геопростір-2016», 15–16.
57. Четверіков Б. В. (2016). Визначення ансамблю братніх могил району Білогорща (м. Львів) неруйнівними методами. GeoTerrace-2016 : міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених (15-17 грудня 2016 р., Львів), 126–129.
58. Четверіков Б. В. (2017). Аналіз сучасного стану стародавніх кладовищ м.Львова на основі картографічних матеріалів та даних ДЗЗ. Екогеофорум 2017. Актуальні проблеми та інновації : міжнародна науково-практична конференція (22-25 березня 2017 р., Івано-Франківськ), 316–317.
59. Четверіков Б. В. & Бондар К. М. (2017). Визначення меж масових розстрілів і поховань часів Другої світової війни фотограмметричним та геофізичними

- методами. Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку : матеріали восьмої міжнародної науково-технічної конференції, 14-16 вересня 2017 р., Львів, Східниця, Україна, 60–63.
60. Четверіков Б. & Марко О. (2017). Методика створення WEB-карти об'єктів історико-культурної спадщини м. Львова GeoTerrace-2017: міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, 14-16 грудня 2017, Львів, Україна, 125–129.
 61. Четверіков Б. В. (2020) Методика створення ГІС концентраційних таборів нацистської Німеччини періоду 1941–1944 років. Геофорум-2020: матеріали 25-ої Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, Брюховичі, Яворів, 1–3 квітня 2020 р.), 17–20.
 62. Четверіков Б. В., Тревого І. С. & Грицюк Т. (2021). Визначення меж концентраційних таборів в Україні за допомогою ГІС-технологій та аналіз збереження їх територій в порівнянні з європейським досвідом. Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції, 28-30 жовтня 2021 р., Ужгород, 97–101.
 63. Четверіков Б.В. (2015). Методи опрацювання аерокосмічних та картографічних матеріалів для відображення об'єктів історичного середовища [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.24.01. Львів: Нац. ун-т "Львів. політехніка", 19 с.
 64. Чумак Д. & Семеріков С. (2013). Development of Software for Metacomputer Computing. *New Computer Technology*, 5(1), 102-103. <https://doi.org/10.55056/nocote.v5i1.106>
 65. Acta IMEKO (2018). vol. 7, no. 3, article 11, month year, identifier: IMEKO-ASTA-07 (2018)-03-11
 66. Adam N., Kampes B. & Eineder M. (2005). Development of a scientific permanent scatterer system: Modifications for mixed ERS/ENVISAT time series, *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, (572), 457 – 465.*

67. Ade Dani Setiawan (2013). Cultural Messages of the Borobudur Temple's Symbols Seen from Aerial Photography Media. *Journal of visual art and design*, 4, 2, 162-181
68. Advances in remote sensing for archaeology and cultural heritage management: proceedings of the 1st international EARSeL workshop CNR, Rome, September 30 - October 4, 2008 / edited by Rosa Lasaponara, Nicola Masini.
69. Alma E. Thuestad, Hans Tømmervik & Stian Andre Solbø (2015). Assessing the impact of human activity on cultural heritage in Svalbard: a remote sensing study of London, *The Polar Journal*, 5:2, 428-445, <https://doi.org/10.1080/2154896X.2015.1068536>
70. Altan M.O., Çelikoyan T.M., Kemper G. & Toz G. (2004). Balloon photogrammetry for cultural heritage. SS 4: CIPA — *Low-Cost Systems in Recording and Managing the Cultural Heritage*, 1-5.
71. Amin Talha Hassan & Dieter Fritsch (2019) Integration of Laser Scanning and Photogrammetry in 3D/4D Cultural Heritage Preservation – A Review. *International Journal of Applied Science and Technology*, 9, 4, 76-91, doi:10.30845/ijast.v9n4p9
72. Amari I., Alsulaimani G. (2016) Detecting and Imaging Historical Graves by Using Visual Inspection and Ground Penetrating Radar Investigation. *International Journal of Science and Research (IJS)*, 4, 01-09.
73. Affek A. (2016). Hidden cultural heritage in the abandoned landscape - identification and interpretation using airborne LiDAR. *Geographia Polonica*, 89, 3, 411-414
74. Antonielli B., Sciortino A., Scancelli S., Bozzano F. & Mazzanti P. (2021). Tracking Deformation Processes at the Legnica Glogow Copper District (Poland) by Satellite InSAR—I: Room and Pillar Mine District. *Land*, 10, 653. <https://doi.org/10.3390/land10060653>
75. Annan A. P., & Davis J. L., (1977). Impulse radar applied to ice thickness measurements and freshwater bathymetry.

76. Annan A. P. (2004). GPR principles, procedures and applications. *Sensors & Software Inc.*
77. Antón, D., Medjdoub, B., Shrahily, R., & Moyano, J. (2018). Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(5), 790–805. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1415391>
78. Arato A., Garofalo F., Sammartano G. & Spanò A. (2016). Gathering GPR Inspections and UAV Survey in Cultural Heritage Documentation Context. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2016)*, 85-91.
79. Argyrou A. & Agapiou A. (2022). A Review of Artificial Intelligence and Remote Sensing for Archaeological Research. *Remote Sensing.*, 14(23):6000. <https://doi.org/10.3390/rs14236000>
80. Aicardi, I., Chiabrando, F., Lingua, A. M. & Noardo, F. (2018). Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 257–266.
81. Aristipini P., Colao F., Fantoni R., Fiorani L., & Palucci A. (2005). Compact scanning lidar fluorosensor for cultural heritage diagnostics, *Proc. SPIE 5850, Advanced Laser Technologies*, (7 June 2005). <https://doi.org/10.1117/12.633546>
82. Arnadi Murtiyoso & Pierre Grussenmeyer (2017). Documentation of heritage buildings using close-range UAV images: dense matching issues, comparison and case studies. *The Photogrammetric Record*, 2017, 32 (159), 206-229. [10.1111/phor.12197](https://doi.org/10.1111/phor.12197).hal-02089612
83. Arrigoni, M., Colesanti C., Ferretti A., Perissin D., Prati C., & Rocca F. (2004). Identification of the location phase screen of ERS-ENVISAT permanent scatterers, *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, 550, 181 – 186.
84. Asieieva A. & Kulakovska, I. (2019). Analysis of technology selection problems for software development . *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (37), 10-18. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2019-37-2>

85. ASTM D6432-11 (2011). Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.
86. Aslan G., Fomelis M., Raucoules D., De Michele M., Bernardie S., & Cakir Z. (2020). Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) technique in the French alps. *Remote Sens*, 12 (8), <https://doi.org/10.3390/RS12081305>
87. Austin Hill & Yorke Rowan (2018). Droning on in the Badia: UAVs and Site Documentation at Wadi al-Qattafi, Near Eastern Archaeology 80, 22 (Nov 2018), 114–123. <https://doi.org/10.5615/neareastarch.80.2.0114>
88. Azarafza M., Asghari-Kaljahi E. & Akgun H. (2017). Numerical modeling of discontinuous rock slopes utilizing the 3DDGM (three-dimensional discontinuity geometrical modeling) method. *Bull Eng Geol Environ*, 76(3), 989–1007. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0879-1>
89. Azzola, P., Cardaci, A., Mirabella Roberti, G., & Nannei, V. M. (2019). UAV photogrammetry for cultural heritage preservation modeling and mapping venetian walls of Bergamo, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W9, 45–50, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-45-2019>.
90. Ballerini G., Bracci S., Pantani L., & Tiano P. (2001). Lidar remote sensing of stone cultural heritage: detection of protective treatments. *Optical Engineering*, 40, 8, 1579–1583. doi:10.1117/1.1385508.
91. Bamler R. (2000). Interferometric stereo radargrammetry: Absolute height determination from ERS-ENVISAT interferograms. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2, 742 – 745.
92. Barilaro, D., Branca, C., Gresta, S., Imposa, S., Leone, A. & Majolino, D. (2007). Case study. Ground penetrating radar (G.P.R.) surveys applied to the research of crypts in San Sebastiano’s church in Catania (Sicily). *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 73—76. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.10.003>.

93. Barone P.M., Ruffell A., Tsokas G.N. & Rizzo, E. (2019). Geophysical Surveys for Archaeology and Cultural Heritage Preservation. *Heritage*, 2, 2814-2817. <https://doi.org/10.3390/heritage2040174>
94. Basile V., Carrozzo M.T., Negri S., Nuzzo L., Quarta T., et al. (2000). A groundpenetrating radar survey for archaeological investigations in an urban area (Lecce, Italy). *J. Appl. Geophys.* 44, 15–32. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00070-1).
95. Basson U. (2000). Imaging of active fault zone in the Dead Sea Rift: Evrona Fault Zone as a case study. Thesis submitted for the degree of Ph.D., Tel-Aviv University, Raymond & Beverly Sackler, Faculty of Exact Sciences, Department of Geophysics&Planetary Sciences, 196 p.
96. Boehm J. (2014). File-centric Organization of large LiDAR Point Clouds in a Big Data context. In Proceedings of the IQmulus First Workshop on Processing Large Geospatial Data, Cardiff, UK, 8 July 2014, 69–76.
97. Bolognesi M., Furini A., Russo V., Pellegrinelli A. & Russo P. (2014). Accuracy of cultural heritage 3D models by RPAS and terrestrial photogrammetry, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5, 113–119, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-113-2014>, 2014.
98. Bondar, K. M., Khomenko, R. V., Chernov, A. P. & Kuksa, N. V. (2020). Results of the ground penetrating radar survey in the church of St. Elias — Bohdan Khmelnytsky burial vault in Subotiv. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(3), 175–194. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204709>
99. Bucci G. (2018). Remote Sensing and Geo-Archaeological Data: Inland Water Studies for the Conservation of Underwater Cultural Heritage in the Ferrara District, Italy. *Remote Sensing*, 10(3), 380. <https://doi.org/10.3390/rs10030380>
100. Buyer A., Aichinger S. & Schubert W. (2020) Applying photogrammetry and semi-automated joint mapping for rock mass characterization. *Eng. Geol*, 264:105332. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105332>
101. Camaiti, M., Benvenuti, M., Costagliola, P., Di Benedetto, F. & Moretti, S. (2017). Hyperspectral Sensors for the Characterization of Cultural Heritage

- Surfaces. In: Masini, N., Soldovieri, F. (eds) *Sensing the Past. Geotechnologies and the Environment*, vol 16. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50518-3_13
102. Cao T., Xiao A.C., Wu L. & Mao L.G. (2017) Automatic fracture detection based on terrestrial laser scanning data: A new method and case study. *Comput Geosci* 106:209–216. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.04.003>
 103. Carlotta Ferrara & Pier Matteo Barone (2015). Detecting Moisture Damage in Archaeology and Cultural Heritage: a Brief Introduction. *International Journal of Archaeology*, 3, 1-1, 57-61. doi: 10.11648/j.ija.s.2015030101.17
 104. Catapano I., Ludeno G., Soldovieri F., Tosti F. & Padeletti, G. (2018). Structural assessment via ground penetrating radar at the Consoli Palace of Gubbio (Italy). *Remote Sens.* 10, 45. <https://doi.org/10.3390/rs10010045>.
 105. Cassidy N. J. & Millington T. M. (2009). The application of finite-difference time-domain modelling for the assessment of GPR in magnetically lossy materials. *Journal of Applied Geophysics*, 67, 296-308.
 106. Chan T., Lichti D., Belton D., Klingseisen B. & Helmholz P. (2016). Survey Accuracy Analysis of a Hand-held Mobile LiDAR Device for Cultural Heritage Documentation. *Journal of Bionanoscience*, 10 (3), 153-165.
 107. Chee Wei, Ong and Siew Chin, Cheong and Majid, Zulkepli & Setan, Halim (2010). 3D documentation and preservation of historical monument using terrestrial laser scanning. *Geoinformation Science Journal*, 10 (1). pp. 73-90.
 108. Chen F., Guo H., Ma P., Lin H., Wang C., et al., (2017a). Radar interferometry offers new insights into threats to the Angkor site. *Sci. Adv.*, 3, e1601284 <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601284>.
 109. Chen, C. W. & Zebker H. A. (2000). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, *Journal of the Optical Society of America A (Optics, Image Science and Vision)*, 17 (3), 401 – 14.
 110. Chen W.F., Gong H.L., Chen B.B., Liu K.S., Gao M. & Zhou C.F. (2017). Spatiotemporal evolution of land subsidence around a subway using InSAR time-series and the entropy method. *GISci. Remote Sens*, 54, 78–94.

111. Chen J.Y., Huang H.W., Zhou M.L. & Chaiyasarn K. (2021). Towards semi-automatic discontinuity characterization in rock tunnel faces using 3D point clouds. *Eng Geol.* 291:106232. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106232>
112. Chen J.Y., Huang H.W., Cohn A.G., Zhang D.M. & Zhou M.L. (2022). Machine learning-based classification of rock discontinuity trace: SMOTE oversampling integrated with GBT ensemble learning. *Int J Min Sci Technol* 32(2):309–322. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.08.004>
113. Chernov, A., Dziubacki, D., Cogoni, M. & Bădescu, A. (2018). First conclusions about results of GPR investigations in the Church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Kłodzko, Poland. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 7(1), 123—128. <https://doi.org/10.5194/gi-7-123-2018>.
114. Chetverikov B. & Babiy L. (2016). Determination of boundaries of ancient burial places using the archived aerial and cartographic materials. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(31), 111-114.
115. Chetverikov B., Lompas O., Protsyk M. & Teteruk D. (2019) Estimation accuracy of orthotransformation of space images applying satellite Pleiades-1 for GNSS surveying. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 89, 36-43
116. Chetverikov B.V., Babiy L.V., Protsyk M.T. & Ilkiv T.J. (2019). Error estimation of DEM of orthotransformation of aerial images obtained from UAVs on the mountainous local site in the village Shidnytsya. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 90, 65-73.
117. Chetverikov B., Różycki S., Malitskyy A. & Babiy L. (2024). Application of Orthophoto Maps Created from UAV Aerial Images for Monitoring Historical and Cultural Heritage Lands. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 6(2), 144–163. <https://doi.org/10.30564/jees.v6i2.6360>
118. Chetverikov B.V., Babiy L.V., Protsyk M.T. & Ilkiv T.J. (2019). Error estimation of DEM of orthotransformation of aerial images obtained from UAVs on the mountainous local site in the village Shidnytsya. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 90, 65-73.

119. Chetverikov, B., Hlotov, V. & Bakula, K. (2024). Clarification of the Boundaries of Lands of Historical and Cultural Heritage and Determination of Their Protection Zones by Remote Sensing Methods. *Land*, 13(7), 923. <https://doi.org/10.3390/land13070923>
120. Chetverikov B., Hlotov V. & Bakula K. (2024). Development of a Software Module for Studying Historical and Cultural Heritage Objects Using Non-Invasive Research Data. *Heritage*, 7, 4131–4148. <https://doi.org/10.3390/heritage7080194>
121. Chirico P., DeWitt J. & Bergstresser S. (2020). Evaluating Elevation Change Thresholds between Structure-from-Motion DEMs Derived from Historical Aerial Photos and 3DEP LiDAR Data. *Remote Sensing*, 12(10), 1625. <https://doi.org/10.3390/rs12101625>
122. Cigna F., Osmanoglu B., Cabral-Cano E., Dixon T.H., Ávila-Olivera J.A., Garduño-Monroy V.H., DeMets C., Wdowinski S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sens. Environ*, 117, 146–161.
123. Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C. & Rocca F. (2003a). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (7), 1685 – 701.
124. Crosetto M., Arnaud A., Duro J., Biescas E. & Agudo M. (2003). Deformation monitoring using remotely sensed radar interferometric data, Proc., 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini.
125. Cuenca-García C., Risbøl O., Bates C.R., Stamnes A.A., Skoglund F., Ødegård Ø., Viberg A., Koivisto S., Fuglsang M., Gabler M., et al. (2020). Sensing Archaeology in the North: The Use of Non-Destructive Geophysical and Remote Sensing Methods in Archaeology in Scandinavian and North Atlantic Territories. *Remote Sens.*, 12, 3102. <https://doi.org/10.3390/rs12183102>

126. Culshaw M., Donnelly L. & McCann D. (2004). Location of buried mineshafts and adits using reconnaissance geophysical methods. In: Hack, R., Azzam, R., Charlier, R. (Eds.), *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
127. Daniels D. J. (2004). Ground penetrating radar, London, Institution of Electrical Engineers.
128. Danese M., Sileo M. & Masini N. (2018). Geophysical methods and spatial information for the analysis of decaying frescoes. *Surv. Geophys.* 20, 1149–1166. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9484-0>.
129. David Lognoli, Gioia Lamenti, Luca Pantani, Daniele Tirelli & Luisa Tomaselli (1999). Lidar remote sensing of stone cultural heritage: detection and characterization of biodeteriogens, Proc. SPIE 3868, *Remote Sensing for Earth Science, Ocean, and Sea Ice Applications*, (17 December 1999). doi:10.1117/12.373120
130. Davis J. L. & Annan A. P. (1989). Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical prospecting*, 37, 531-551.
131. Deibe D., Amor M., Doallo R. (2020). Big Data Geospatial Processing for Massive Aerial LiDAR Datasets. *Remote Sensing*, 12(4), 719. <https://doi.org/10.3390/rs12040719>
132. Deibe D., Amor M., Doallo R., Miranda D. & Cordero M. (2017). GVLiDAR: An Interactive Web-based Visualization Framework to Support Geospatial Measures on Lidar Data. *Int. J. Remote Sens.*, 38, 827–849
133. Diofantos Hadjimitsis , Athos Agapiou , Dimitrios Alexakis & Apostolos Sarris (2013) Exploring natural and anthropogenic risk for cultural heritage in Cyprus using remote sensing and GIS, *International Journal of Digital Earth*, 6:2, 115-142, DOI: 10.1080/17538947.2011.602119
134. Drews T., Miernik G., Anders K., Hofle B., Profe J., Emmerich A. & Bechstadt T. (2018). Validation of fracture data recognition in rock masses by automated plane detection in 3D point cloud. *Int J Rock Mech Min Sci*, 109:19–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.023>

135. El-Baz, F., Robinson, C.A. & Al-Saud, T. (2006). Radar Images and Geoarchaeology of the Eastern Sahara. In: Wiseman, J., El-Baz, F. (Eds.), *Remote Sensing in Archaeology. Interdisciplinary Contributions To Archaeology*. Springer, New York, NY.
136. Elfadaly A., Attia W., Qelichi M.M. et al. (2018). Management of Cultural Heritage Sites Using Remote Sensing Indices and Spatial Analysis Techniques. *Surv Geophys*, 39, 1347–1377. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9489-8>
137. Fagandini R., Federici B., Ferrando I., Gagliolo S., Pagliari D., Passoni D., Pinto L., Rossi L. & Sguerso D. (2017) Evaluation of the laser response of Leica Nova MultiStation MS60 for 3D modelling and structural monitoring. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2017*, 93– 104
138. Ferretti A., Novali F., Bürgmann R., Hilley G. & Prati C. (2004). InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in the San Francisco Bay Area, *Eos*, 85 (34), 317-324.
139. Fornaro G. & Monti Guarnieri A. (2001). Minimum Mean Square Error Space-Varying Filtering Of Interferometric SAR Data, *IEEE Trans. GARS*, 39.
140. Fu X.D., Sheng Q., Zhang Y.H. & Chen J. (2015). Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass. *Int J Rock Mech Min Sci*, 80:155–170. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.017>
141. Fulong Chen, Huadong Guo, Peifeng Ma, Hui Lin, Cheng Wang, Natarajan Ishwaran & Peou Hang (2017). Radar interferometry offers new insights into threats to the Angkor site. *Journal Article*, Science Advances. [10.1126/sciadv.1601284](https://doi.org/10.1126/sciadv.1601284)
142. Galdon J.M., Rey J., Martínez J. & Hidalgo M.C. (2017). Application of geophysical prospecting techniques to evaluate geological-mining heritage: the Sinapismo mine (La Carolina, Southern Spain). *Eng. Geol.* 218, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.012>.

143. Gdulová K., Marešová J. & Moudrý V. (2020). Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment. *Remote Sens. Environ*, 241.
144. Germanese, D., Pascali, M.A., Berton, A., Leone, G.R., Moroni, D., Jalil, B., Tampucci, M., & Benassi, A. (2019). Architectural Heritage: 3D Documentation and Structural Monitoring Using UAV.
145. Geological Survey of Canada, Report of activities, Paper 77-1B, 117-124.
146. Giorgio De Nunzio (2018). A software tool for the semi-automatic segmentation of architectural 3D models with semantic annotation and Web fruition. *ACTA IMEKO*. 7. 64. 10.21014/acta_imeko.v7i3.592.
147. Giovanna Cecchi, Luca Pantani, Valentina Raimondi, Daniele Tirelli, Luisa Tomaselli, Gioia Lamenti, Marco Bosco & Piero Tiano (1996). Fluorescence lidar technique for the monitoring of biodeteriogens in cultural heritage studies. *Proc. SPIE 2960, Remote Sensing for Geography, Geology, Land Planning, and Cultural Heritage*, (31 December 1996). doi: 10.1117/12.262463
148. Gizzi F.B. & Leucci G. (2018). Global Research Patterns on Ground Penetrating Radar (GPR). *Surv. Geophys.*, 39, 1039–1068. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9475-1>.
149. González Izard S., Sánchez Torres R., Alonso Plaza Ó., Juanes Méndez J.A. & García-Peñalvo F.J. (2020). Nextmed: Automatic Imaging Segmentation, 3D Reconstruction, and 3D Model Visualization Platform Using Augmented and Virtual Reality. *Sensors*, 20(10), 2962. <https://doi.org/10.3390/s20102962>
150. Grasmueck M., Weger R. & Horstmeyer H. (2005). Full-resolution 3D GPR imaging. *Geophysics*, 70, 12-19.
151. Green A.S., Orengo H.A., Alam A., Garcia-Molsosa A., Green L.M., Conesa F., Ranjan A., Singh R.N., Petrie C.A. (2019). Re-Discovering Ancient Landscapes: Archaeological Survey of Mound Features from Historical Maps in Northwest India and Implications for Investigating the Large-Scale Distribution of Cultural Heritage Sites in South Asia. *Remote Sens.*, 11, 2089. <https://doi.org/10.3390/rs11182089>

152. Grégoire C., Halleux L. & Lukas V. (2003). GPR abilities for the detection and characterisation of open fractures in a salt mine. *Near Surface Geophysics*, 3, 139 – 147.
153. Hadjimitsis D.G., Agapjou A., Themistocleous K., Cuca B., Nisantzi A., Lasaponara R., Nole G., Tucci B., Masini N., et al. (2016). Athena: center of excellence in Cyprus in the field of remote sensing for cultural heritage in the areas of archaeology and cultural heritage. *In: GEOBIA 2016 : Solutions and Synergies.*, 14 September 2016 - 16 September 2016, University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC) .
154. Hamrouche R., Klysz G., Balayssac J.P., et al. (2009). Numerical modeling of ground-penetrating radar (GPR) for the investigation of jointing defects in brick masonry structures. *Non-Destr Test Civ Eng NDTCE*, 9.
155. Hlotov V., Hunina A. & Siejka Z. (2017). Accuracy Investigation of Creating Orthophotomaps Based on Images Obtained by Applying Trimble-UX5 UAV" *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 103, 1, 106-118. <https://doi.org/10.1515/rgg-2017-0009>
156. Höhle J. (2013)/ Oblique aerial images and their use in cultural heritage documentation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W2, 349–354, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-349-2013>, 2013.
157. Hopkinson, C., Hayashi, M. & Peddle, D. (2009). Comparing alpine watershed attributes from LiDAR, Photogrammetric, and Contour-based Digital Elevation Models. *Hydrol. Process.*, 23: 451-463. <https://doi.org/10.1002/hyp.7155>
158. Howison R.A., Piersma T., Kentie R., Hooijmeijer J. & Olf H. (2018) Quantifying landscape-level land-use intensity patterns through radar-based remote sensing. *J Appl Ecol.*, 55, 1276–1287. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13077>
159. Huber F., Schulz S. & Steinhage V. (2024). Deep Interpolation of Remote Sensing Land Surface Temperature Data with Partial Convolutions. *Sensors*, 24(5), 1604. <https://doi.org/10.3390/s24051604>

160. Huntley J. M. (2001). Three-dimensional noise-immune phase unwrapping algorithm, *Applied Optics*, 40 (23), 3901 – 8.
161. Jeffrey J. Daniels, (1989). Fundamentals of Ground Penetrating Radar. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings: 62-142. <https://doi.org/10.4133/1.2921864>
162. Jo Y.H. & Hong S. (2019). Three-Dimensional Digital Documentation of Cultural Heritage Site Based on the Convergence of Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 53. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020053>
163. Jong-Sen Lee, Konstantinos P. Papathanassiou, Thomas L. (1998). Ainsworth & Mitchell R. Grunes and Andreas Reigber. A new technique for noise filtering of sar interferometric phase images. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5), 1456-1465.
164. Kampes B. M. (2005). Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry, Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
165. Kang Y., Zhao C., Zhang Q., Lu Z., Li B. (2017). Application of InSAR Techniques to an Analysis of the Guanling Landslide. *Remote Sens.*, 9, 1046.
166. Kang J.Y., Fu X.D., Sheng Q., Chen J., Wu K. & Wang X. (2024). A precise modeling method of three-dimensional discrete fracture network based on rectangular joint model. *Int J Numer Anal Methods Geomech.* <https://doi.org/10.1002/nag.3700>
167. Kanun, E., Alptekin, A. & Yakar, M. (2021). Cultural heritage modelling using UAV photogrammetric methods: a case study of Kanlıdivane archeological site. *Advanced UAV*, 1(1), 24-33
168. Kelly C. (2005). Using Ground Penetrating Radar for In-Seam Crack Detection in Potash. *CSEG RECORDER*, 9, 183 – 194.
169. Khelifi A., Ciccone G., Altaweel M., Basmaji T., Ghazal M. (2021). Autonomous Service Drones for Multimodal Detection and Monitoring of Archaeological Sites. *Appl. Sci.*, 11, 10424. <https://doi.org/10.3390/app112110424>

170. Kira K., Chiba F., Makino Y. et al. (2023). Stature estimation by semi-automatic measurements of 3D CT images of the femur. *Int J Legal Med*, 137, 359–377. <https://doi.org/10.1007/s00414-022-02921-y>
171. Kluiving S. J. & Guttmann-Bond E. B. (Eds.). (2012). *Landscape Archaeology between Art and Science: From a Multi- to an Interdisciplinary Approach*. Amsterdam University Press. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt6wp79m>
172. Konstantinos Fasoulis, Panagiotis Triantafyllidis, Panagiotis Hadjidoukas & Christoforos Pappas (2023). Characterizing land deformations in Western Greece with satellite remote sensing observations and in situ ground monitoring. *Proc. SPIE 12734, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XIV*, 127341E (19 October 2023); <https://doi.org/10.1117/12.2680232>
173. Kostyanchuk A., Chetverikov B. & Trevoho I. (2021). Methods of creation an Atlas of National Parks and protected areas of Ukraine. *GeoTerrace-2021 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 4–6 жовтня 2021 р., Львів, Україна*.
174. Kovanič Ľ., Topitzer B., Peťovský P., Blišťan P., Gergel'ová M.B. & Blišťanová M. (2023). Review of Photogrammetric and Lidar Applications of UAV. *Applied Sciences*, 13(11), 6732. <https://doi.org/10.3390/app13116732>
175. Kyriacos Themistocleous, Chris Danezis, Evangelos Mendonidis & Efstathia Lymperopoulou (2017). Monitoring ground deformation of cultural heritage sites using UAVs and geodetic techniques: the case study of Choirokoitia, JPI PROTHEGO project. *Proc. SPIE 10428, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VIII*, 104280Q (5 October 2017); doi:10.1117/12.2279478
176. Kuçak R. A., Kiliç F. & Kisa A. (2016). Analysis of Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetry Data for Documentation of Historical Artifacts. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42W1, 155–158. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W1-155-2016.

177. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S. & Shelestov A. (2017). Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 14(5), 778–782.
178. Kvartiuk, V., & Martyn, A. (2023). Ukraine's Agricultural Land Sales Market during the Russian War against Ukraine. *German-Ukrainian Agricultural Policy Dialogue: Kyiv, Ukraine*.
179. Lane J.W., Buursink M.L., Haeni F.P. & Versteeg R.G. (2000). Evaluation of groundpenetrating radar to detect free-phase hydrocarbons in fractured rocks — results of numerical modeling and physical experiments. *Ground Water*, 38, 929–938.
180. Lasaponara R., Masini N., Rizzo E. & Orefici G. (2011). New discoveries in the Piramide Naranjada in Cahuachi (Peru) using satellite, Ground Probing Radar and magnetic investigations. *J. Archaeol. Sci.*, 38, 2031–2039. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.12.010>.
181. Lato M.J. & Voge M. (2012) Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *Int J Rock Mech Min Sci* 54:150–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.003>
182. Lazaridou Maria A. (2013). Cultural heritage and VHR satellite data. Proc. SPIE 8795, First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2013), 87950F (5 August 2013); doi:10.1117/12.2028090
183. Leucci G., Negri S. & Carrozzo M.T. (2003). Ground penetrating radar (GPR): an application for evaluating the state of maintenance of the building coating. *Ann Geophys.* 46(3).
184. Lee H. & Oh J. (2018). Establishing an ANN-based risk model for ground subsidence along railways. *Appl. Sci.*, 8, 1936.
185. Lei Luo et al. (2019). Airborne and spaceborne remote sensing for archaeological and cultural heritage applications: A review of the century (1907–2017). *Remote Sensing of Environment*, 232, 111280, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111280>.
186. Lin Q.W., Cheng Q.G., Xie Y., Zhang F.S., Li K., Wang Y.F. & Zhou Y.Y. (2020) Simulation of the fragmentation and propagation of jointed rock masses in

- rockslides: DEM modeling and physical experimental verification. *Landslides*, 18(3), 993–1009.
187. Liu X., Z Ji., Zhou H., Zhang Z., Tao P. et al. (2022). An object-oriented UAV 3D path planning method applied in cultural heritage documentation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*; Gottingen V-1-2022, 33-40. DOI:10.5194/isprs-annals-V-1-2022-33-2022
188. Liu C., Meng F., Zhu Z. & Zhou L. (2023). Object Detection of UAV Aerial Image based on YOLOv8. *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*, 5(3), 46-50. <https://doi.org/10.54097/fcis.v5i3.13852>
189. Lorenzo Palombi, Giovanna Cecchi, David Lognoli, Valentina Raimondi & Leonardo Masotti (2007). A fluorescence imaging lidar for the control of cultural heritage. *Proc. SPIE 6750, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing III*, 675002 (3 October 2007); doi: 10.1117/12.739680
190. Lyalko V. I., Filipovich V. E., Lischenko L. P., Pazynych N. V., Teremenko A. N. & Krylova A. B. (2015). Remote sensing monitoring of historical centre of Kyiv for reducing risks from disasters at world heritages properties, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2, 78, 2671-2675. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC301-04>
191. Luzi G., Montuori A., Bignami C., Crosetto M. & Stramondo S. (2014). Radar Interferometry for Cultural Heritage Monitoring. 11th International Conference on Non-Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage (ART-2014), Madrid (Spain). <https://doi.org/10.5281/zenodo.242256>
192. Luís Pádua et al. (2018). UAS-based photogrammetry of cultural heritage sites: a case study addressing Chapel of Espírito Santo and photogrammetric software comparison. In *Proceedings of the International Conference on Geoinformatics and Data Analysis (ICGDA '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 72–76. <https://doi.org/10.1145/3220228.3220243>

193. Ma Z., Xia M., Lin H., Qian M. & Zhang Y. (2023). FENet: Feature enhancement network for land cover classification. *Int. J. Remote Sens.*, 44(5), 1702–1725.
194. Maiwald F., Komorowicz D., Munir I., Beck C. & Münster S. (2023). Semi-automatic Generation of Historical Urban 3D Models at a Larger Scale Using Structure-from-Motion, Neural Rendering and Historical Maps. In: Münster, S., Pattee, A., Kröber, C., Niebling, F. (eds) *Research and Education in Urban History in the Age of Digital Libraries. UHDL 2023. Communications in Computer and Information Science*, 1853. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38871-2_7
195. Mantey S. & Tagoe N. D. (2019). Digital Preservation of Cultural Heritage Sites using Unmanned Aerial Vehicle - A Case Study. *Ghana Journal of Technology*, 4, 1, 23 - 30.
196. Martinho E. & Dionísio A. (2014). Main geophysical techniques used for non-destructive evaluation in cultural built heritage: a review. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11, 5, 053001, <https://doi.org/10.1088/1742-2132/11/5/053001>
197. Martínez-Carricondo P., Carvajal-Ramírez F., Yero-Paneque L. et al. (2021). Combination of HBIM and UAV photogrammetry for modelling and documentation of forgotten heritage. Case study: Isabel II dam in Níjar (Almería, Spain). *Herit Sci* .,9, 95 <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00571-8>
198. Martyn A., Hunko. L., Moroz Y.YR (2022). Formation of the Nature Protection Regime of Near-Water Ecosystems Using GIS-modeling (on the Example of the Hydrological Sanctuary “Shulyatsky bog”), 2022, 1, 1, 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580135>
199. Massonnet D. & Feigl K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36(4), 441– 500, doi:[10.1029/97RG03139](https://doi.org/10.1029/97RG03139).
200. Maté-González M.Á., Di Pietra V. & Piras M. (2022). Evaluation of Different LiDAR Technologies for the Documentation of Forgotten Cultural Heritage under Forest Environments. *Sensors*, 22, 6314. <https://doi.org/10.3390/s22166314>

201. Max van der Schriek & Willem Beex (2017). The application of LiDAR-based DEMs on WWII conflict sites in the Netherlands. *Journal of Conflict Archaeology*, 12:2, 94-114, DOI: 10.1080/15740773.2017.1440960
202. Mauro Caprioli, Francesco Mancini, Francesco Mazzone, Mario Scarano & Rosamaria Trizzino (2015). UAV Surveys for Representing and Document the Cultural Heritage, Le Vie dei Mercanti _ XIII Forum Internazionale di Studi - HERITAGE and TECHNOLOGY Mind Knowledge Experience, 476–483, Aversa-Capri, Italy, 11-13 June, 2015
203. Micheletti N. (2016). Remote sensing methods for the investigation of the evolution and dynamics of Alpine landscapes Originally published at : Thesis, University of Lausanne Posted at the University of Lausanne Open Archive <http://serval.unil.ch>
204. Moise C., Dana Negula I., Mihalache C.E., Lazar A.M., Dedulescu A.L., Rustoiu G.T., Inel I.C. & Badea A. (2021). Remote Sensing for Cultural Heritage Assessment and Monitoring: The Case Study of Alba Iulia. *Sustainability*, 13, 1406. <https://doi.org/10.3390/su13031406>
205. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I. & Papathanassiou K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. In *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1, 1, 6-43. doi: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
206. Muhammad Arsalan-Ul-Haque (2017). Land Cover Classification using Sentinel-1 Radar Mission Interferometry. *Aalto university school of electrical engineering*. 11-69
207. Moise C., Lazar A.-M., Mihalache C. E., Dedulescu L. A., Dana Negula I. F., Badea A., Poenaru V. D., Moise R. & Ortan, A. R. (2020). Geomatics technologies in the framework of multidisciplinary project for integrated management of cultural heritage sites. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2020, 1477–1484, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1477-2020>.

208. Miri S. Mohsen (2016). Evaluation of LIDAR and Photogrammetric Elevation Data for Feature-based Forest Analyses. <http://dx.doi.org/10.17169/refubium-17690>
209. Mishra V. N., Prasad R., Kumar P., Gupta D. K. & Srivastava P. K. (2017). Dual-polarimetric C-band SAR data for land use/land cover classification by incorporating textural information. *Environ. Earth Sci.* 76, 1–16.
210. Mukherjee S., Joshi P. K., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R. D. & Mukhopadhyay A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *Int J Appl Earth Obs Geoinf.*, 21, 205-217.
211. Nappo N., Mavrouli O., van Westen C., Gambillara R. & Michetti A. M. (2020). Semi-automatic road damage detection in landslide areas using UAV-based 3D models, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-5910, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5910>.
212. Neubauer W., Eder-Hinterleitner A., Seren S. & Melichar P. (2002). Georadar in the Roman Civil town Carnuntum, Austria. An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeol. Prospect.* 9, 135–156. <https://doi.org/10.1002/arp.183>
213. Noszczyk T. & Gawronek P. (2020). Remote Sensing and GIS for Environmental Analysis and Cultural Heritage. *Remote Sensing.*, 12(23), 3960. <https://doi.org/10.3390/rs12233960>
214. Olhoeft G. R. (1998). Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. *Proceedings of GPR*, 177-182.
215. Orlando L., Pezone A. & Colucci A. (2010). Modeling and testing of high frequency GPR data for evaluation of structural deformation. *NDT&E International*, 43, 216–230.
216. Ortega-Ramírez J., Mano M., Villa Alvarado L.A., Medellín Martínez D., Rivero-Chong, R., et al. (2021). High-resolution 3-D GPR applied in the diagnostic of the detachment and cracks in pre-Hispanic mural paintings at “Templo Rojo”, Cacaxtla, Tlaxcala, Mexico. *J. Cult. Herit.* 50, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.06.008>.

217. Panisova J., Murín I., Pašteka R., Haličková J., Brunčák P., Pohánka V., Papčo J., & Milo P. (2016). Geophysical fingerprints of shallow cultural structures from microgravity and GPR measurements in the Church of St. George, Svätý Jur, Slovakia. *Journal of Applied Geophysics*, 127, 102—111. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.02.009>.
218. Paoloni S., Mercuri F., Orazi N., Caruso G., & Zammit U. (2020). Photothermal approach for cultural heritage research. *Journal of Applied Physics*, 128, 180904 <https://doi.org/10.1063/5.0023432>
219. Passah A. & Kandar D. (2023). A lightweight deep learning model for classification of synthetic aperture radar images. *Ecol. Inf.*, 77, 102228.
220. Pepe A., Bonano M., Zhao Q., Yang T. & Wang H. (2016). The Use of C-/X-Band Time-Gapped SAR Data and Geotechnical Models for the Study of Shanghai's Ocean-Reclaimed Lands through the SBAS-DInSAR Technique. *Remote Sens.*, 8, 911.
221. Pereira Á., Cabaleiro M., Conde B. & Sánchez-Rodríguez A. (2021). Automatic Identification and Geometrical Modeling of Steel Rivets of Historical Structures from Lidar Data. *Remote Sensing.*; 13(11), 2108. <https://doi.org/10.3390/rs13112108>
222. Perez-Gracia V., Santos-Assunção S., Caselles O., Clapes J. & Sossa V. (2019). Combining ground penetrating radar and seismic surveys in the assessment of cultural heritage buildings: The study of roofs, columns, and ground of the gothic church Santa Maria del Mar, in Barcelona (Spain). *Struct Control Health Monit.*, 26, e2327. <https://doi.org/10.1002/stc.23271016/j.cpc.2016.08.020>.
223. Pérez-Gracia V. & Solla M. (2015). Inspection procedures for effective GPR surveying of buildings. In: *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar. Switzerland: Springer International Publishing*, 97-123.
224. Pérez-Gracia V., González-Drigo R. & Sala R. (2012), Ground-penetrating radar resolution in cultural heritage applications. *Near Surface Geophysics*, 10, 77-87. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2011015>

225. Piekielek N. (2019). A semi-automated workflow for processing historic aerial photography. *Abstracts of the ICA*, 1, 299. doi:10.5194/ica-abs-1-299-2019.
226. Pieraccini M. & Miccinesi L. (2019). Ground-Based Radar Interferometry: a bibliographic review. *Remote Sens.*, 11, 1029. <https://doi.org/10.3390/rs11091029>.
227. Pipan M., Baradello L., Forte E., Prizzon A. & Finetti I. (1999). 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: a case history from an archaeological site. *J. Appl. Geophys.*, 41, 271–292. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00047-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00047-0)
228. Raimondi V., Conti C., Lognoli D. & Palombi L. (2013). Latest advancements in fluorescence hyperspectral lidar imaging of the cultural heritage. *Proc. SPIE 9065, Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies 2013*, 90650Y (28 November 2013). doi: 10.1117/12.2052995
229. Raimondi Valentina, Lognoli David & Palombi Lorenzo. (2014). A fluorescence lidar combining spectral, lifetime and imaging capabilities for the remote sensing of cultural heritage assets. *Proc. SPIE 9245, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications V*, 92450K. doi: 10.1117/12.2067388
230. Raimondi Valentina et al. (2015). An integrated multi-medial approach to cultural heritage conservation and documentation: from remotely sensed lidar imaging to historical archive data. *Proc. SPIE 9644, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications*, VI, 96440C. doi: 10.1117/12.2195737
231. Ramos M. M. & Remondino F. (2015). Data fusion in Cultural Heritage – A Review, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W7, 359–363, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-359-2015>.
232. Rea J. & Knight R. (1995). The use of Ground Penetrating Radar for aquifer characterization: an example from southwestern British Columbia. *Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Orlando, Florida, 279-288.
233. Reda Yaagoubi & Yehia Miky (2018). Developing a combined Light Detecting And Ranging (LiDAR) and Building Information Modeling (BIM) approach for

- documentation and deformation assessment of Historical Buildings. *MATEC Web Conf.*, 149, 02011. DOI: 10.1051/matecconf/201814902011
234. Remondino F. & Rizzi A. (2010). Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites—techniques, problems, and examples. *Appl Geomat*, 2, 85–100. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0025-x>
235. Richter M., Zech S., Meissner S.A. & Naef I. (2020). Semi-automatic Software-based 3D-Angular Measurement For Weight-Bearing CT (WBCT) is 97% Faster than Measurement by Hand and Provides Similar Angles. *Foot & Ankle Orthopaedics*, 5(4). doi:10.1177/2473011420S00404
236. Rodríguez-Gonzálvez P., Jiménez Fernández-Palacios B., Muñoz-Nieto Á.L., Arias-Sanchez P. & Gonzalez-Aguilera D. (2017). Mobile LiDAR System: New Possibilities for the Documentation and Dissemination of Large Cultural Heritage Sites. *Remote Sensing.*, 9(3), 189. <https://doi.org/10.3390/rs9030189>
237. Roman A., Ursu T.-M., Farcaş S., Lazarescu V.-A. & Opreanu C.H. (2017). An integrated airborne laser scanning approach to forest management and cultural heritage issues: a case study at Porolissum, Romania. *Ann. For. Res.*, 60(1), 127-143.
238. Rosen P. A. et al. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. In *Proceedings of the IEEE*, 88, 3, 333-382. doi: 10.1109/5.838084.
239. Ruman Banerjee & Prashant K. (2013). Srivastava, Reconstruction of contested landscape: Detecting land cover transformation hosting cultural heritage sites from Central India using remote sensing, *Land Use Policy*, 34, 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.03.005>.
240. Rüther H., Held C., Bhurtha R., Schröder R., & Wessels S. (2011). Challenges in Heritage Documentation with Terrestrial Laser Scanning.
241. Rubinowicz P. & Czyska K. (2015). Study of City Landscape Heritage Using Lidar Data and 3d-City Models. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL7, 1395–1402, 2015. doi:10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1395-2015.

242. Saatchi S. (2019). SAR Methods for Mapping and Monitoring Forest Biomass." SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. Eds. Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., Cherrington, E. NASA. doi:10.25966/hbm1-ej07
243. Santos-Assunção S., Pérez-Gracia M.V., Caselles O., Clapes J. & Salinas V. (2014). Assessment of complex masonry structures with GPR compared to other non-destructive testing studies. *Remote Sens (Basel)*, 6(9), 8220-8237.
244. Selma Kadioglu, Yusuf Kagan Kadioglu, Ilaria Catapano & Francesco Soldovieri. (2013). Ground penetrating radar and microwave tomography for the safety management of a cultural heritage site: Miletos Ilyas Bey Mosque (Turkey). *Journal of Geophysics and Engineering*, 10, 6, 064007. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/10/6/064007>
245. Shao Z. et al. (2020). BRRNet: A fully convolutional neural network for automatic building extraction from high-resolution remote sensing images. *Remote Sens.*, 12(6), 1050.
246. Sircar S., Randell C., Power D.T., Youden J., Gill E.W. & Han, P. (2002). Lateral Ground Movement Estimation from Space borne Radar by Differential Interferometry. *Environmental Science, Mathematics*, 1-6
247. Sittler B. (2007). The potential of Lidar in assessing elements of cultural heritage hidden under forests. *New Developments and Challenges in Remote Sensing*, Z. Bochenek (ed.). 539-548
248. Smen N. Madsen & Howard A. Zebker. *Imaging Radar Interferometry. Manual of Remote Sensing*. 65p.
249. Suh Ji Won & Ouimet W. (2023). Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 89, 1, 37-46(10). <https://doi.org/10.14358/PERS.22-00063R2>
250. Sun F., He N., Li R. et al. (2024). GD-PAN: a multiscale fusion architecture applied to object detection in UAV aerial images. *Multimedia Systems*, 30, 143. <https://doi.org/10.1007/s00530-024-01342-8>
251. Tamort A., Kharroubi A., Hajji R. & Billen R. (2024). 3D change detection for semi-automatic update of buildings in 3D city models, *Int. Arch. Photogramm.*

- Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-4/W9-2024, 349–355, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-349-2024>.
252. Tang P., Chen F., Zhu X. & Zhou W. (2016). Monitoring Cultural Heritage Sites with Advanced Multi-Temporal InSAR Technique: The Case Study of the Summer Palace. *Remote Sensing.*, 8(5), 432. <https://doi.org/10.3390/rs8050432>
253. Tapete D., Fanti R., Cecchi R., Petrangeli P. & Casagli N. (2012). Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites, *Journal of Geophysics and Engineering*, 9, 4, 10–25, <https://doi.org/10.1088/1742-2132/9/4/S10>
254. Tapete D. & Cigna F. (2012). Site-Specific Analysis of Deformation Patterns on Archaeological Heritage by Satellite Radar Interferometry. *MRS Online Proceedings Library*, 1374, 283–295. <https://doi.org/10.1557/opl.2012.1397>
255. Tapete D. & Cigna F. (2019). COSMO-SkyMed SAR for Detection and Monitoring of Archaeological and Cultural Heritage Sites. *Remote Sensing.*, 11(11), 1326. <https://doi.org/10.3390/rs11111326>
256. Tempa K. & Aryal K.R. (2022). Semi-automatic classification for rapid delineation of the geohazard-prone areas using Sentinel-2 satellite imagery. *SN Appl. Sci.*, 4, 141. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05028-6>
257. Tessitore S., Fernández-Merodo J.A. et al. (2016). Comparison of water-level, extensometric, DInSAR and simulation data for quantification of subsidence in Murcia City (SE Spain). *Hydrogeol. J.*, 24, 727–747.
258. Tianpeng Xie, Jingguo Zhu, Chenghao Jiang, Yan Jiang, Wenju Guo, Chunxiao Wang & Ruqing Liu. (2019). Situation and prospect of light and miniature UAV-borne LiDAR," Proc. SPIE 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, 1132210. doi:10.1117/12.2548426
259. Themistocleous K., & Ioannides M. (2005). The use of satellite remote sensing for the management of cultural heritage sites in Cyprus. *Sociology, Environmental Science, Mathematics*, 1-6
260. Themistocleous K. (2020). The Use of UAVs for Cultural Heritage and Archaeology. In: , et al. Remote Sensing for Archaeology and Cultural

- Landscapes. *Springer Remote Sensing/Photogrammetry*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10979-0_14
261. Themistocleous Kyriacos, Mettas Christodoulos, Evagorou Evagoras, Hadjimitsis & Diofantos G. (2019). The use of UAVs and photogrammetry for the documentation of cultural heritage monuments: the case study of the churches in Cyprus. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications*, X., 11156. 10.1117/12.2533056
 262. Trevoho I., Chetverikov B., Babiy L. & Malanchuk M. (2020). Monitoring of displacements and deformations of the earth's surface near the Stebnyk city using radar images of Sentinel-1. *Geodesy and Cartography*, 69, 1, 85-96. DOI: 10.24425/gac.2020.131079
 263. Tsypko V. (2024). Theoretical principles of studying the historical and cultural heritage of small towns of Ukraine. *Bulletin of the Kyiv National Linguistic University. History, economy, philosophy series*, 176-189. 10.32589/2412-9321.29.2024.301911.
 264. Trier Ø. D., Reksten J. H. & Løseth K. (2021). Automated mapping of cultural heritage in Norway from airborne lidar data using faster R-CNN. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95. doi:10.1016/j.jag.2020.102241.
 265. Turner D., Lucieer A. & Wallace L. (2013). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 52, 2738–2745.
 266. Tripathi A. & Kumar S. (2018). Effect of Phase Filtering on Interferometry based Displacement Analysis of Cultural Heritage Sites. *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*. Gorakhpur, India, 1-5, doi: 10.1109/UPCON.2018.8597027.
 267. Tzouvaras M., Kouhartsiouk D., Agapiou A., Danezis C. & Hadjimitsis D.G. (2019). The Use of Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) Images and Open-Source Software for Cultural Heritage: An Example from Paphos Area in Cyprus

- for Mapping Landscape Changes after a 5.6 Magnitude Earthquake. *Remote Sensing.*, 11(15), 1766. <https://doi.org/10.3390/rs11151766>
268. Uglitskih E., Vyzhva S. & Ivanik O. (2020). Vertical displacement monitoring of Zakarpattia region territory based on radar interferometry data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 4(91), 94-99. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.13>
269. Ulvi A. (2020). Importance of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the documentation of cultural heritage . *Turkish Journal of Engineering* , 4 (3) , 104-112. DOI: 10.31127/tuje.637050
270. Urbanová P., Jurda M., Vojtíšek T. & Krajsa J. (2017). Using drone-mounted cameras for on-site body documentation: 3D mapping and active survey. *Forensic Sci. Int.*, 281, 52-62. 10.1016/j.forsciint.2017.10.027
271. Vacca G., Deidda M., Dessi A., & Marras M. (2012). Laser Scanner Survey to Cultural Heritage Conservation and Restoration. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39B5, 589–594. doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-589-2012.
272. Vandendaele B., Martin-Ducup O., Fournier R.A., Pelletier G. & Lejeune P. (2022). Mobile Laser Scanning for Estimating Tree Structural Attributes in a Temperate Hardwood Forest. *Remote Sensing*, 14(18), 4522. <https://doi.org/10.3390/rs14184522>
273. Vincenzo Barrile, Vincenzo Gelsomino & Giuliana Bilotta. (2017). UAV and Computer Vision in 3D Modeling of Cultural Heritage in Southern Italy, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 225, 1, 012196. <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012196>
274. Warren C., Giannopoulos A., & Giannakis I. (2016). GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163—170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2016.05.030>
275. Wen C., Matsumoto M., Sawada M. et al. (2023). Seg2Link: an efficient and versatile solution for semi-automatic cell segmentation in 3D image stacks. *Sci Rep.*, 13, 7109. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34232-6>

276. Wojciechowska G. (2019). Case Studies on the Use of UAV's for Documentation of Cultural Heritage. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, 31, 1, 65-73. <https://doi.org/10.2478/apcrs-2019-0005>
277. Xiao W., Mills J., Guidi G., Rodríguez-Gonzálvez P., Gonizzi Barsanti S. & González-Aguilera D. (2018). Geoinformatics for the conservation and promotion of cultural heritage in support of the UN Sustainable Development Goals. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 389–406. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.01.001.
278. Xie F., Wu C., Lai W. & Sham J. (2018). Correction of multi-frequency GPR wave velocity with distorted hyperbolic reflections from GPR surveys of underground utilities. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 76, 76-91.
279. Yamada S., Ito H., Matsumasa H., Ii S., Otani T. et al. (2024) Automatic assessment of disproportionately enlarged subarachnoid-space hydrocephalus from 3D MRI using two deep learning models. *Front. Aging Neurosci.*, 16, 1362637. doi: 10.3389/fnagi.2024.1362637
280. Yazici B.V. & Tunc Gormus E. (2020). Investigating persistent scatterer InSAR (PSInSAR) technique efficiency for landslides mapping: A case study in Artvin dam area, in Turkey. *Geocarto Int.*, 1–19.
281. Yuan Li, Long Zhao, Yiping Chen, Na Zhang, Hongchao Fan & Zhenxin Zhang 3D LiDAR and multi-technology collaboration for preservation of built heritage in China: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (IF 7.672), DOI:10.1016/j.jag.2022.103156
282. Yuan Y., Lin L., Zhou Z. G., Jiang H. & Liu Q. (2023). Bridging optical and SAR satellite image time series via contrastive feature extraction for crop classification. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.*, 195, 222–232
283. Zapłata R., Stereńczak K. & Puszczka B. (2016). LiDAR i dziedzictwo kulturowe – zagadnienia wprowadzające. *Raport. Narodowy Instytut Dziedzictwa*, 11, 239-255

284. Zhang G., Roslan S.N.A.b., Wang C. et al. (2023). Research on land cover classification of multi-source remote sensing data based on improved U-net network. *Sci Rep.*, 13, 16275. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43317-1>
285. Zhou W., Chen F. & Guo H. (2015). Differential Radar Interferometry for Structural and Ground Deformation Monitoring: A New Tool for the Conservation and Sustainability of Cultural Heritage Sites. *Sustainability*, 7(2), 1712-1729. <https://doi.org/10.3390/su7021712>
286. Zhou L., Zhao S., Wan Z., Liu Y., Wang Y. & Zuo X. (2024). MFEFNet: A Multi-Scale Feature Information Extraction and Fusion Network for Multi-Scale Object Detection in UAV Aerial Images. *Drones*, 8(5), 186. <https://doi.org/10.3390/drones8050186>
287. Zhou X., Li W. & Arundel S.T. (2019). A spatio-contextual probabilistic model for extracting linear features in hilly terrains from high-resolution DEM data. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 33, 666–686.
288. Zohreh Alijani, Julien Meloche, Alexander McLaren, John Lindsay, Alexandre Roy & Aaron Berg (2022). A comparison of three surface roughness characterization techniques: photogrammetry, pin profiler, and smartphone-based LiDAR. *International Journal of Digital Earth*, 15:1, 2422-2439, DOI: 10.1080/17538947.2022.2160842
289. Zorteza M. (2012). Semi-automatic detection of cultural heritage in lidar data. *Proceedings of the 4th GEOBIA*, May 7-9, 2012 - Rio de Janeiro – Brazil, 123-128
290. Земельний кодекс України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>
291. Закон України «Про охорону культурної спадщини». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text>
292. Землі історико-культурного призначення та їх правове регулювання https://wiki.legalaid.gov.ua/index.php/Землі_історико-культурного_призначення_та_їх_правове_регулювання

293. Моніторинг земель: призначення та завдання.

https://wiki.legalaid.gov.ua/index.php/Моніторинг_земель:_призначення_та_завдання

ДОДАТКИ

Додаток А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Trevoho, I., Chetverikov, B., Babiy, L. & Malanchuk, M. (2020). Monitoring of displacements and deformations of the earth's surface near the Stebnyk city using radar images of Sentinel-1. *Geodesy and Cartography*, 69.(1.), 85–96. <https://doi.org/10.24425/gac.2020.131079> (Web of Science)
2. Ievsiukov, T., Chetverikov, B., Openko, I., Kovalchuk, I., Shevchenko, O., Stepchuk, Y., Tykhenko, R. & Makarov, O. (2022). Topographic and geodetic support for the development of the GIS register of Polish burials – case study on Baikove cemetery in Kyiv. *Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*, 11, 398–405. (Web of Science)
3. Chetverikov B., Różycki S., Malitskyy A. & Babiy L. (2024). Application of Orthophoto Maps Created from UAV Aerial Images for Monitoring Historical and Cultural Heritage Lands. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 6(2), 144–163. <https://doi.org/10.30564/jees.v6i2.6360> (Scopus)
4. Chetverikov, B., Hlotov, V. & Bakula, K. (2024). Clarification of the Boundaries of Lands of Historical and Cultural Heritage and Determination of Their Protection Zones by Remote Sensing Methods. *Land*, 13(7), 923. <https://doi.org/10.3390/land13070923> (Scopus, Q1, Web of Science)
5. Chetverikov, B., Babiy, L., Oryński, S. & Różycki, S. (2024). Methods for Designating Protective Zones of Historical and Cultural Purpose Using Non-Invasive Methods—Two Case Studies for Ukraine and Poland. *Remote Sensing*, 16(13), 2330. <https://doi.org/10.3390/rs16132330> (Scopus, Q1, Web of Science)
6. Четверіков Б.В., Бондар К.М., Хоменко Р.В., Діденко С.В. & Шейхет М.Г. (2017). Визначення розташування історичних об'єктів за допомогою фотограмметричного методу та методів наземних неруйнівних досліджень.

- Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 85, 94-103. (Index Copernicus, Google Scholar)
7. Chetverikov B., Lompas O., Protsyk M. & Teteruk D. (2019) Estimation accuracy of orthotransformation of space images applying satellite Pleiades-1 for GNSS surveying. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 89, 36-43 (Index Copernicus, Google Scholar)
 8. Chetverikov B.V., Babiy L.V., Protsyk M.T. & Ilkiv T.J. (2019). Error estimation of DEM of orthotransformation of aerial images obtained from UAVs on the mountainous local site in the village Shidnytsya. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 90, 65-73. (Index Copernicus, Google Scholar)
 9. Четверіков Б. & Кілару В. (2020). Визначення історичних меж «Старого юдейського кладовища» у м.Львові за допомогою картографічного методу та архівних аерознімків. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, II(40), 72-77. (Index Copernicus, Google Scholar)
 10. Четверіков Б. В., Хінціцький О. В. & Калинич І. Методика картографування об'єктів історико-культурної спадщини засобами ГІС-технологій з використанням архівних картографічних та аероматеріалів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(41), 97–103. (Index Copernicus, Google Scholar)
 11. Четверіков Б. В., Ванчура Р. Б. & Смолій К. Б. (2022). Методика визначення планового положення інфраструктури зруйнованого Звенигородського замку. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(43), 71–77. (Index Copernicus, Google Scholar)
 12. Четверіков Б., Бабій Л., Кузик З., Заяць І. & Процик М. (2022). Дослідження цифрових моделей рельєфу нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини, створених за різні роки. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 96, 65–76. (Index Copernicus, Google Scholar)

13. Четверіков Б. (2023). Застосування методів радіолокаційної інтерферометрії та георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК*, 1(45). (Index Copernicus, Google Scholar)
14. Chetverikov B. & Babiy L. (2016). Determination of boundaries of ancient burial places using the archived aerial and cartographic materials. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(31), 111-114. (Google Scholar)
15. Четверіков Б., Михайлюк В. & Согор А. (2017). Технологія створення цифрової моделі місцевості на прикладі Сирецького району м.Києва з використанням архівних даних. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(33), 116-119. (Google Scholar)
16. Четверіков Б. (2017). Методика визначення перенесення меж Нового єврейського кладовища у Львові за допомогою геоінформаційних систем. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, II(34), 98-101. (Google Scholar)
17. Четверіков Б. (2018). Методика визначення меж зруйнованого старого некрополя у м.Броди за допомогою ГІС-технологій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(35), 169-172. (Google Scholar)
18. Четверіков Б. (2019). Методика визначення фундаментів зруйнованих будівель за архівними аерознімками для відновлення об'єктів історико-культурної спадщини. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(37), 100-105. (Google Scholar)
19. Четверіков Б. В., Шейхет М. Г. & Грицюк Т. Ю. (2021). Визначення меж некрополів і меморіалів дистанційними та наземними неінвазивними методами: колективна монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 128с.
20. Четверіков Б. В. (2021). Визначення історичної території юдейського кладовища в м. Бердичів у контексті сучасної містозабудови засобами ГІС-технологій. *Простір в історичних дослідженнях*, №2, 118–123.

Наукові праці, які зсвідчують апробацію матеріалів дисертації

21. Kostyanchuk A., Chetverikov B. & Trevoho I. (2021). Methods of creation an Atlas of National Parks and protected areas of Ukraine. GeoTerrace-2021: міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 4–6 жовтня 2021 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus).
22. Chetverikov B. (2022). Research of the DEM of the Zvenyhorod hillfort for priority areas for the analysis of vertical displacements. GeoTerrace-2022 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 3–5 жовтня 2022 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus).
23. Chetverikov B., Babiy L., Kuzyk Z. & Zaiats I. Comparison of 3D models of mass graves created on the basis of aerial survey data in 1944 and 2015. GeoTerrace-2022 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 3–5 жовтня 2022 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus)
24. Chetverikov B. & Trevoho I. (2023). The application of web mapping for the research and documentation of historical and cultural heritage objects. GeoTerrace-2023 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 2–4 жовтня 2023 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus)
25. Chetverikov B. & Protsyk M. (2023). Analysis of vertical ground displacements of the Lviv Citadel territory based on radar survey data. GeoTerrace-2023 : міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 2–4 жовтня 2023 р., Львів, Україна. (SciVerse Scopus)
26. Четверіков Б. В. (2016). Створення цифрової моделі місцевості концтабору Stalag-328 (Цитадель) за допомогою ГІС-технологій. Матеріали III Міжнародної наукової конференції. Пам'ятки Тустані в контексті освоєння Карпат у доісторичну добу та в середньовіччі; проблеми їх збереження та використання, 179–180.
27. Четверіков Б. В. (2016). Визначення розташування історичних об'єктів за допомогою фотограмметричного методу та методів наземних неруйнівних

- досліджень. Матеріали тез XXI Міжнародної науково-технічної конференції "Геофорум-2016", 41–42.
28. Четверіков Б. В. (2016). Визначення місць масових поховань у Бабиному Яру за архівними картографічними та аероматеріалами. Збірник тез доповідей. Друга Міжнародна науково-технічна конференція «Геопростір-2016», 15–16.
29. Четверіков Б. В. (2016). Визначення ансамблю братніх могил району Білогорща (м. Львів) неруйнівними методами. GeoTerrace-2016 : міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених (15-17 грудня 2016 р., Львів), 126–129.
30. Четверіков Б. В. (2017). Аналіз сучасного стану стародавніх кладовищ м. Львова на основі картографічних матеріалів та даних ДЗЗ. Екогеофорум 2017. Актуальні проблеми та інновації : міжнародна науково-практична конференція (22-25 березня 2017 р., Івано-Франківськ), 316–317.
31. Четверіков Б. В. & Бондар К. М. (2017). Визначення меж масових розстрілів і поховань часів Другої світової війни фотограмметричним та геофізичними методами. Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку : матеріали восьмої міжнародної науково-технічної конференції, 14-16 вересня 2017 р., Львів, Східниця, Україна, 60–63.
32. Четверіков Б. & Марко О. (2017). Методика створення WEB-карти об'єктів історико-культурної спадщини м. Львова GeoTerrace-2017: міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, 14-16 грудня 2017, Львів, Україна, 125–129.
33. Chetverikov B., Babiy L., Protsyk M. & Ilkiv T. (2019). Error estimation of orthotransformation of aerial images obtained from UAVs on the mountainous local site in the village Shidnytsya. Environmental engineering, photogrammetry, geoinformatics. Modern technologies and development perspectives : the 9th International scientific-technical conference, 17–20 September 2019, Lublin, Poland, 50–51.
34. Четверіков Б. В. (2020) Методика створення ГІС концентраційних таборів

- нацистської Німеччини періоду 1941–1944 років. Геофорум-2020: матеріали 25-ої Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, Брюховичі, Яворів, 1–3 квітня 2020 р.), 17–20.
35. Четверіков Б. В., Тревого І. С. & Грицюк Т. (2021). Визначення меж концентраційних таборів в Україні за допомогою ГІС-технологій та аналіз збереження їх територій в порівнянні з європейським досвідом. Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції, 28-30 жовтня 2021 р., Ужгород, 97–101.
36. Зборщик В. І. & Четверіков Б. В. (2022). 3D моделювання архітектурних об'єктів історико-культурної спадщини за допомогою мобільного додатку. Геофорум-2022 : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6–8 квітня 2022 р., Львів, Яворів, Брюховичі, 8–10.
37. Chetverikov B., Różycki S., Babiy L. & Malitskyu A. (2023). Application of Orthophotomaps Created from UAV Aerial Images for Monitoring Historical and Cultural Heritage Sites. Współczesne technologie geoinformacyjne w modelowaniu przestrzeni: I Kongres geoinformacyjny (X Ogólnopolskie sympozjum geoinformacyjne) Kraków, 25–27 października 2023 : streszczenia referatów, 154–155.
38. Четверіков Б. & Бабій Л. (2023). Методика визначення охоронних зон земель історико-культурного призначення за допомогою даних радіолокаційної інтерферометрії. Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку: тези доповідей Х Міжнародної науково-технічної конференції, Львів, 8–10 листопада 2023 р., 6.
39. Четверіков Б. В. (2023). Дослідження об'єктів історикокультурної спадщини фотограмметричним та геофізичним методами. Геофорум-2023: матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 19–21 квітня 2023 р., Львів, Брюховичі, Україна, 7–10.
40. Четверіков Б. В., Маліцький А. В. & Тревого І. С. (2023). Застосування ортофотопланів, створених за аерофотознімками з БПЛА для моніторингу

земель історико-культурного призначення. Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції, 26-28 жовтня 2023 р., Ужгород, 80–84.

41. Четверіков Б. В. & Тревого І. С. (2023). Методика комплексного дослідження об'єктів історико-культурної спадщини за даними ДЗЗ і герорадарного знімання // Інноваційні технології у плануванні територій : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 5-7 жовтня 2023 р., Одеса, 35–39.

Додаток Б

Відомості про апробацію результатів дисертації

Міжнародні науково-технічні конференції

1. III Міжнародна наукова конференція «Пам'ятки Густані в контексті освоєння Карпат у доісторичну добу та в середньовіччі; проблеми їх збереження та використання» (Львів, 2016). Доповідь: «Створення цифрової моделі місцевості концтабору Stalag-328 (Цитадель) за допомогою ГІС-технологій».
2. Міжнародних науково-технічних конференціях "Геофорум" (2016, 2020, 2022, 2023, 2024). Доповіді: «Визначення розташування історичних об'єктів за допомогою фотограмметричного методу та методів наземних неруйнівних досліджень», «Методика створення ГІС концентраційних таборів нацистської Німеччини періоду 1941–1944 років», «Методика створення інформаційно-довідкової ГІС Стрийського парку у Львові», «3D моделювання архітектурних об'єктів історико-культурної спадщини за допомогою мобільного додатку», «Розробка макету WEB-ГІС польських поховань Личаківського цвинтаря у м. Львові», «Дослідження об'єктів історикокультурної спадщини фотограмметричним та геофізичним методами», «Застосування дистанційних методів для дослідження об'єктів історико-культурної спадщини».
3. Друга Міжнародна науково-технічна конференція «Геопростір-2016» (Київ, 2016р). Доповідь: «Визначення місць масових поховань у Бабиному яру за архівними картографічними та аероматеріалами».
4. Міжнародних науково-технічних конференціях молодих вчених GeoTerrace (Львів, 2016, 2017, 2021, 2022, 2023 рр.). Доповіді: «Визначення ансамблю братніх могил району Білогорща (м. Львів) неруйнівними методами», «Методика створення WEB-карти об'єктів історико-культурної спадщини м. Львова», «Determination of quantitative indicators of earthquake destruction by different time space images», «Methods of creation an Atlas of National Parks and protected areas of Ukraine», «Analysis of vertical ground displacements of the Lviv Citadel territory based on radar survey data», «The application of Web mapping for the research and documentation of historical and cultural heritage objects».
5. Міжнародна науково-практична конференція «Екогеофорум 2017. Актуальні проблеми та інновації» (Івано-Франківськ, 2017 р.). Доповідь: «Аналіз сучасного стану стародавніх кладовищ м.Львова на основі картографічних матеріалів та даних ДЗЗ».

6. XVIII міжнародна науково-технічна конференція «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку» (Львів-Східниця, 2017р.). Доповідь: «Визначення меж масових розстрілів і поховань часів Другої світової війни фотограмметричним та геофізичними методами».
7. Міжнародних науково-практичних конференціях «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні» (Ужгород-Мукачево, Синеvir, 2018, 2021, 2023 рр.). Доповіді: «Оцінка точності ортотрансформування космічного знімка отриманого із супутника Pleiades-1 за допомогою ГНСС знімання для території смт. Східниця», «Визначення меж концентраційних таборів в Україні за допомогою ГІС-технологій та аналіз збереження їх територій в порівнянні з європейським досвідом», «Застосування ортофотопланів, створених за аерофотознімками з БПЛА для моніторингу земель історико-культурного призначення».
8. The 9th International scientific-technical conference «Environmental engineering, photogrammetry, geoinformatics. Modern technologies and development perspectives» (Lublin, Poland, 2019). Доповідь: «Error estimation of orthotransformation of aerial images obtained from UAVs on the mountainous local site in the village Shidnytsya»
9. Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні технології у плануванні територій» (Одеса, 2020, 2023рр.). Доповіді: «Оцінка проекту побудови меморіального центру "Бабин Яр" у м.Києві за різночасовими картографічними матеріалами», «Методика комплексного дослідження об'єктів історико-культурної спадщини за даними ДЗЗ і герорадарного знімання».
10. I Kongres geoinformacyjny (X Ogólnopolskie sympozjum geoinformacyjne) Kraków, 25–27 października 2023. Доповідь: . «Application of Orthophotomaps Created from UAV Aerial Images for Monitoring Historical and Cultural Heritage Sites».
11. X Міжнародна науково-технічна конференція «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку», Львів, 8–10 листопада 2023 р. Доповідь: «Методика визначення охоронних зон земель історико-культурного призначення за допомогою даних радіолокаційної інтерферометрії».
12. IV Akademia Kartografii I Geoinformatyki “Modelowanie Czasoprzestrzenne” Włocław 22-24 maja 2024r. Доповідь: Wykorzystanie archiwalnych zdjęć lotniczych do modelowania przeszłych form pokrycia terenu.

Додаток В

Таблиця 1

Перелік космічних радіолокаційних знімків, отриманих з супутника Sentinel-1, що були використані при дослідженні Ансамблю оборонних споруд «Львівська цитадель»

№	НАЗВА ЗНІМКА
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20200121T161828_20200121T161856_030901_038BFA_EB45.SAFE
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20200221T161018_20200221T161046_031353_039BBB_7B50.SAFE
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20200321T161828_20200321T161856_031776_03AA60_2DEA.SAFE
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20200421T161020_20200421T161047_032228_03BA56_C3B9.SAFE
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20200520T161830_20200520T161858_032651_03C81D_7D47.SAFE
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20200620T161023_20200620T161050_033103_03D5BD_5FD7.SAFE
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20200719T161834_20200719T161902_033526_03E28C_11AE.SAFE
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20200819T161026_20200819T161053_033978_03F169_35AF.SAFE
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20200921T043701_20200921T043728_034452_04021B_BBE0.SAFE
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20201018T161028_20201018T161055_034853_041030_9E3D.SAFE
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20201120T043701_20201120T043728_035327_04207F_E382.SAFE
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20201222T161836_20201222T161904_035801_0430E1_FCAC.SAFE
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20210119T043658_20210119T043725_036202_043ED8_9AD7.SAFE
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20210220T161833_20210220T161901_036676_044F5B_3935.SAFE
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20210320T043657_20210320T043724_037077_045D4C_EEE6.SAFE
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20210421T161835_20210421T161903_037551_046DB4_DAA4.SAFE
17	S1A_IW_SLC__1SDV_20210519T043659_20210519T043726_037952_047AB2_C4B7.SAFE
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20210620T161838_20210620T161906_038426_0488CD_5809.SAFE
19	S1A_IW_SLC__1SDV_20210721T161031_20210721T161058_038878_049671_C9D0.SAFE
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20210819T161841_20210819T161909_039301_04A41E_57F5.SAFE
21	S1A_IW_SLC__1SDV_20210919T161034_20210919T161101_039753_04B395_990C.SAFE
22	S1A_IW_SLC__1SDV_20211022T043705_20211022T043732_040227_04C3F1_DEB4.SAFE
23	S1A_IW_SLC__1SDV_20211118T161034_20211118T161101_040628_04D1E5_37AF.SAFE
24	S1A_IW_SLC__1SDV_20211221T043703_20211221T043730_041102_04E217_CAAD.SAFE
25	S1A_IW_SLC__1SDV_20220122T161840_20220122T161908_041576_04F1F5_1B42.SAFE
26	S1A_IW_SLC__1SDV_20220219T043701_20220219T043728_041977_04FFCC_1F3C.SAFE
27	S1A_IW_SLC__1SDV_20220318T161030_20220318T161057_042378_050D7D_574E.SAFE
28	S1A_IW_SLC__1SDV_20220420T043702_20220420T043729_042852_051D6B_A2BF.SAFE
29	S1A_IW_SLC__1SDV_20220522T161842_20220522T161910_043326_052C83_F87C.SAFE
30	S1A_IW_SLC__1SDV_20220619T043706_20220619T043733_043727_053872_FABF.SAFE
31	S1A_IW_SLC__1SDV_20220721T161846_20220721T161914_044201_05468F_55EB.SAFE
32	S1A_IW_SLC__1SDV_20220821T161039_20220821T161106_044653_0554A9_3E86.SAFE
33	S1A_IW_SLC__1SDV_20220919T161848_20220919T161916_045076_0562EC_51AF.SAFE
34	S1A_IW_SLC__1SDV_20221020T161040_20221020T161107_045528_05716B_CB15.SAFE
35	S1A_IW_SLC__1SDV_20221122T043711_20221122T043738_046002_058159_A369.SAFE
36	S1A_IW_SLC__1SDV_20221219T161038_20221219T161105_046403_058F14_E6D3.SAFE

Додаток Г

Таблиця 1

Перелік космічних радіолокаційних знімків, отриманих з супутника Sentinel-1, що були використані при дослідженні історико-культурного заповідника «Древній Звенигород»

№	НАЗВА ЗНІМКА
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20180319T042829_20180319T042856_021079_024357_36C6.SAFE
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20180619T161010_20180619T161037_022428_026DD2_5E38.SAFE
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20180920T043648_20180920T043715_023777_0297E3_D7A6.SAFE
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20181221T161823_20181221T161851_025126_02C644_943D.SAFE
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20190319T043645_20190319T043712_026402_02F456_F2C1.SAFE
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20190619T161825_20190619T161853_027751_0321ED_7F15.SAFE
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20190922T042837_20190922T042904_029129_034E7D_7234.SAFE
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20191220T043653_20191220T043720_030427_037B76_7460.SAFE
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20200321T161828_20200321T161856_031776_03AA60_2DEA.SAFE
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20200620T161023_20200620T161050_033103_03D5BD_5FD7.SAFE
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20200921T043701_20200921T043728_034452_04021B_BBE0.SAFE
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20201222T161836_20201222T161904_035801_0430E1_FCAC.SAFE
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20210320T043657_20210320T043724_037077_045D4C_EEE6.SAFE
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20210620T161838_20210620T161906_038426_0488CD_5809.SAFE
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20210919T161034_20210919T161101_039753_04B395_990C.SAFE
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20211221T043703_20211221T043730_041102_04E217_CAAD.SAFE
17	S1A_IW_SLC__1SDV_20220318T161030_20220318T161057_042378_050D7D_574E.SAFE
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20220619T043706_20220619T043733_043727_053872_FABF.SAFE
19	S1A_IW_SLC__1SDV_20220919T161848_20220919T161916_045076_0562EC_51AF.SAFE
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20221219T161038_20221219T161105_046403_058F14_E6D3.SAFE

Додаток Д



ДРЕВНІЙ ЗВЕНИГОРОД

КОМУНАЛЬНИЙ ЗАКЛАД ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСНОЇ РАДИ
«АДМІНІСТРАЦІЯ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО ЗАПОВІДНИКА
«ДРЕВНІЙ ЗВЕНИГОРОД»

Код ЄДРПОУ 43851105
79008, Львівська область,
м. Львів, вул. В. Винниченка, 18
тел. +380675935934
drevnij.zvenyhorod@gmail.com

10.07.2024 № 07-09

**Докторанту кафедри фотограмметрії та геоінформатики
Інституту геодезії НУ "Львівська політехніка",
к.т.н. Четверікову Б.В.**

Шановний Борисе Володимировичу,

Керівництво історико-культурного заповідника "Древній Звенигород" дякує Вам за проведені дослідження на території нашого об'єкта з метою його збереження та розвитку. Надані Вами матеріали аерознімальних робіт та повітряного лідарного сканування з БПЛА у вигляді ортофотоплану масштабу 1:2000 та цифрових моделей поверхні з їхньою 3Д реконструкцією використовуються науковими співробітниками при дослідженнях нашого заповідника. Сподіваємось на подальшу співпрацю у проведенні масштабних наземних неінвазивних досліджень у вигляді георадарного знімання та інших методів.

З повагою

в.о. директора



Мар'яна Гой