

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ**



ЧЕТВЕРІКОВ БОРИС ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 528.4+528.8

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

Спеціальність 05.24.04 - кадастр та моніторинг земель

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

КИЇВ – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фотограмметрії та геоінформатики Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
ГЛОТОВ Володимир Миколайович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
МОН України, професор кафедри фотограмметрії
та геоінформатики.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор,
ЛЯЩЕНКО Анатолій Антонович,
Київський національний університет будівництва і
архітектури МОН України, професор кафедри
геоінформатики і фотограмметрії;

доктор технічних наук, професор,
ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій Іванович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка МОН України, завідувач кафедри
геоінформатики ННІ «Інститут геології»;

доктор економічних наук, професор,
МАРТИН Андрій Геннадійович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України МОН України,
завідувач кафедри землевпорядного проектування.

Захист відбудеться «18» грудня 2024р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.09 в Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, Київ-37, пр. Повітряних Сил, 31, ауд. 319.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, пр. Повітряних Сил, 31.

Реферат розісланий « 16 » листопада 2024 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.056.09



д.т.н., проф. А.Анненков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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.

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, сейморозвідка, георадарна зйомка та ін. Дослідження 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 зберіглася, 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 непрямую 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.

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.

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 ОКС, 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 ЦМР і георадарного знімання 3DDEM&RADAR

Об'єктом дослідження є об'єкти історико-культурної спадщини та землі історико-культурного призначення, а **предметом 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. 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 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-проектних 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-проектної та землепорядної документації щодо визначення та встановлення меж території ОІКС, 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).

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.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, висновки і рекомендації, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Особистий внесок автора полягає у здійсненні теоретичних та експериментальних досліджень, виведенні основних формул, опрацюванні виконаних вимірювань, формулюванні основних положень та висновків. Наукові результати, представлені у дисертаційній роботі, є результатом самостійних напрацювань автора.

Із наукових праць, опублікованих у співавторстві у дисертації використано лише власні розробки, а саме: Chetverikov B. & Babiy L. (2016) [14] – 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; Четверіков Б., Михайлюк В. & Согор А. (2017) [15] – постановка

завдання, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, створення ЦММ історичних об'єктів Сирецького району в м.Києві станом на 1944 рік; Четверіков Б.В., Бондар К.М., Хоменко Р.В., Діденко С.В. & Шейхет М.Г. (2017) [6] – постановка завдання, сформовано технологічну схему міждисциплінарних досліджень та висновки. Побудовано плани братських поховань часів Другої світової війни на основі інтерпретаційних можливостей архівних аероматеріалів; Chetverikov B., Lompas O., Protsyk M. & Teteruk D. (2019) [7] – виконано постановку завдання, запропоновано методику визначення похибок ортотрансформування космічних зображень, сформовано основні положення та висновки; Chetverikov B.V., Babiy L.V., Protsyk M.T. & Shkiv T.J. (2019) [8] – запропоновано методику побудови ЦМР за синтезованими даними, отриманими за БПЛА і космічних знімальних систем, сформовано постановку завдання та висновки; Trevoho I., Chetverikov B., Babiy L. & Malanchuk M. (2020) [1] – виконано дослідження вертикальних зміщень земного покриву методом супутникової радіолокаційної інтерферометрії, здійснено постановку завдання, сформовано основні положення та висновки; Chetverikov B., Hlotov V. & Bakula K. (2024) [9] – виконано побудову програмного модуля та його апробацію на прикладі об'єкта історико-культурної спадщини «Львівська цитадель»; Четверіков Б. В., Хінціцький О. В. & Калинич І. (2021) [10] – 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; Четверіков Б. В., Ванчура Р. Б. & Смолій К. Б. (2022) [11] – постановка завдання, сформовано основні положення та висновки. Виконано експериментальні дослідження з визначення планового положення інфраструктури зруйнованого Звенигородського замку; Четверіков Б., Бабій Л., Кузик З., Заяць І. & Процик М. (2022) [12] – виконано дослідження цифрових моделей рельєфу нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини, сформовано основні положення та висновки; Chetverikov, B., Babiy, L., Oryński, S. & Różycki, S. (2024) [5] – запропоновано методику визначення охоронних зон земель історико-культурного призначення за допомогою даних радіолокаційної інтерферометрії, сформовано основні положення та висновки; Chetverikov B., Różycki S., Malitskyu A. & Babiy L. (2024) [3] – запропоновано методику застосування ортофотопланів, створених за аерознімками з БПЛА для моніторингу земель історико-культурного призначення, сформовано основні положення та висновки; Четверіков Б. В. & Процик М. Т. (2023) [18] – виконано та описано розробку макету програмного модуля для опрацювання геопросторових даних об'єктів історико-культурної спадщини; Четверіков Б. В., Шейхет М. Г. & Грицюк Т. Ю. (2021) [19] – запропоновано різні технологічні схеми досліджень різноманітних об'єктів історико-культурної спадщини, сформовано основні висновки.

Наукові положення і результати, що 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, 2023рр.); 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 2024г.

Структура та 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, зазначено зв'язок роботи з науковими планами, з'ясовано стан дослідження проблеми, на розв'язання якої спрямовується науковий пошук, об'єкт і предмет дослідження, розкрито наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, подано інформацію щодо апробації та публікації результатів дослідження.

Перший розділ дисертації «Аналіз застосування дистанційних та неінвазивних методів досліджень у вивченні земель історико-культурного призначення» зосереджений на вивченні використання сучасних дистанційних та неінвазивних методів для дослідження земель, що мають історико-культурне

значення. Відповідно до Конституції України та Закону “Про охорону культурної спадщини”, держава несе відповідальність за охорону культурної спадщини, яка охоплює понад 170 тисяч об’єктів. Однак сучасна система обліку цих об’єктів має ряд проблем, серед яких відсутність єдиної уніфікованої системи обліку та відсутність національної інфраструктури даних про нерухомі об’єкти культурної спадщини.

Встановлено, що відповідно до пункту «г» статті 150 Земельного кодексу України, **землі історико-культурного призначення віднесені до категорії особливо цінних**, що підкреслює їхнє культурне, історичне та наукове значення. Виявлено проблеми правової невизначеності та неузгодженості між Земельним кодексом та Законом України "Про охорону культурної спадщини", зокрема щодо включення охоронних зон до складу земель історико-культурного призначення. Проаналізовано широкий спектр об’єктів, що належать до цієї категорії земель: від історико-культурних заповідників і меморіальних парків до археологічних пам’яток і об’єктів народного зодчества. Підкреслено важливість цих територій для національної ідентичності, наукових досліджень, туризму та культурного виховання. Наголошено на необхідності вдосконалення законодавчої бази та ефективного управління цими землями, зокрема через інтеграцію сучасних технологій моніторингу та міжнародної співпраці, для забезпечення їхнього збереження і сталого розвитку в інтересах суспільства та майбутніх поколінь.

Окреслено роль моніторингу в систематичному спостереженні та оцінці стану земель, на яких розташовані об’єкти історичного, археологічного та культурного значення. Проаналізовано використання сучасних технологій, таких як дистанційне зондування Землі, геоінформаційні системи та безпілотні літальні апарати, що дозволяють ефективно виявляти зміни у землекористуванні, контролювати незаконну діяльність та прогнозувати природні загрози. Підкреслено важливість правового забезпечення моніторингу, зокрема дотримання законодавчих норм та внесення інформації до Державного земельного кадастру. Зазначено роль наукових досліджень, археологічних експедицій та міжнародної співпраці у вдосконаленні моніторингових практик. Акцентовано на необхідності залучення місцевих громад та громадськості до процесу моніторингу для підвищення ефективності збереження культурної спадщини та забезпечення її передачі майбутнім поколінням.

У розділі наголошено на використанні сучасних дистанційних і неінвазійних методів дослідження для моніторингу земель історико-культурного призначення. Супутникове оптико-електронне знімання дозволяє отримувати високоякісні зображення з високою просторовою розрізненістю для моніторингу ландшафтних змін, у тому числі пов’язаних з об’єктами культурної спадщини. Використання супутникових радіолокаційних даних є важливим для моніторингу змін рельєфу та морфології території, особливо у важкодоступних місцях. Технологія супутникового моніторингу дозволяє оперативно виявляти зміни та потенційні загрози.

Застосування аерозйомки, включаючи зйомку з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), розглядається як ефективний метод для отримання високодеталізованих знімків земель історико-культурного призначення. Аерозйомка дозволяє швидко і ефективно охоплювати великі території, що забезпечує можливість моніторингу змін у ландшафті та виявлення невидимих на поверхні землі структур, таких як фундаменти будівель. БПЛА, завдяки своїй маневреності та можливості працювати на низьких висотах, є важливим інструментом для дослідження важкодоступних або обмежених територій.

Лазерне сканування, зокрема наземне та авіаційне лідарне знімання, дозволяє створювати деталізовані 3D-моделі об'єктів культурної спадщини. Цей метод дозволяє виявляти зміни у рельєфі та аналізувати структуру об'єктів, які не можуть бути доступними для традиційних методів зйомки. Наземне лазерне сканування є корисним для документування складних архітектурних деталей та оцінки їхнього стану.

Георадарне знімання, яке використовує електромагнітні хвилі для виявлення об'єктів під поверхнею землі, також відіграє важливу роль у дослідженні земель культурного призначення. Воно дозволяє виявляти підземні структури, залишки будівель, а також аналізувати структуру ґрунту. Георадарне знімання особливо ефективно для визначення меж археологічних об'єктів та оцінки їхнього стану без руйнування поверхні.

У другому розділі дисертації «Теоретичні положення визначення вертикальних зміщень землі та підземних аномалій» розглядаються теоретичні засади та методологічні аспекти визначення вертикальних зміщень земної поверхні і виявлення підземних аномалій з використанням радіолокаційного та георадарного знімання. Цей розділ є ключовим для розуміння основних принципів, на яких базуються сучасні дистанційні методи дослідження, що дозволяють оцінювати геодинамічні процеси без безпосереднього втручання в середовище.

Підходи до визначення вертикальних зміщень та підземних аномалій базуються на використанні різних типів хвильових процесів, таких як радіохвилі, високочастотні електромагнітні імпульси, а також методи інтерферометрії та георадарного знімання. Кожен із цих методів має свої унікальні можливості та обмеження, і їх використання дозволяє отримувати широкий спектр інформації про підземні структури та динамічні процеси, що відбуваються на земній поверхні.

Методи радіолокаційного та георадарного знімання базуються на фізичних принципах взаємодії електромагнітних хвиль з об'єктами, розташованими в різноманітному середовищі. Радіолокаційні системи, що використовуються для супутникового зондування, оперують у діапазоні радіохвиль, які відбиваються від поверхні землі, дозволяючи оцінювати зміни рельєфу та горизонтальні і вертикальні зміщення. При цьому враховується ефект Доплера, який дозволяє оцінювати зміни частоти сигналу, викликані рухом об'єкта.

Георадарне знімання (GPR) базується на високочастотних електромагнітних імпульсах, що випромінюються антеною і проникають у ґрунт, взаємодіючи з

різними підземними структурами. Кожна з цих хвиль, відбиваючись від меж поділу середовищ з різною діелектричною проникністю, повертається до приймача, що дозволяє отримати інформацію про глибину та характер підземних об'єктів.

Основними фізичними явищами, що лежать в основі обох методів, є відбиття, розсіювання, заломлення та поглинання електромагнітних хвиль. Кожен із цих процесів дозволяє отримувати корисну інформацію про стан поверхні землі або про підземні об'єкти, наявні аномалії та їх властивості.

Одним із основних методів визначення вертикальних зміщень є диференційована радіолокаційна інтерферометрія (DInSAR), яка базується на аналізі двох або більше радіолокаційних знімків, отриманих у різні періоди часу. Метод дозволяє вимірювати зміни висоти поверхні землі, порівнюючи зміни фази сигналу між знімками.

Також використовуються такі методи, як інтерферометрія з синтезованою апертурою (InSAR) і її модифікації, зокрема методи інтерферометрії постійних розсіювачів (PSInSAR) та інтерферометрії малих базових ліній (SBAS). Кожен із цих підходів має свої переваги і дозволяє ефективно виявляти зміни в рельєфі, що особливо важливо при моніторингу деформацій земної поверхні в історико-культурних зонах.

Визначення аномалій в ґрунті за допомогою георадару передбачає аналіз відбитих сигналів та їх змін у часі й просторі. Важливими аспектами є амплітудний, частотний та поляризаційний аналізи сигналів, які дозволяють виявити аномалії, що можуть вказувати на наявність підземних об'єктів, тріщин, порожнин або змін у складі ґрунту. Георадарне знімання забезпечує високу деталізацію на невеликих глибинах, що робить цей метод ефективним для досліджень археологічних пам'яток, комунікаційних мереж, а також для виявлення зон з підвищеним ризиком геологічних процесів.

Для отримання більш повної картини вертикальних зміщень та аномалій застосовується комбінований підхід, що включає математичне об'єднання даних, отриманих з радіолокаційного та георадарного знімання. Зокрема, використовуються методи вагового поєднання, які дозволяють оптимально комбінувати дані з різних джерел для отримання максимально точної інформації про стан досліджуваних об'єктів. Наприклад, результати георадарного знімання можуть бути використані для уточнення інтерферометричних даних, що отримані з супутникового зондування, завдяки врахуванню локальних аномалій та особливостей середовища.

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

$$R = \alpha \cdot C_i + \beta \cdot C_g, \quad (1)$$

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.

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

1. Комбінація даних (2):

$$R = D_{InSAR} + D_{GPR}. \quad (2)$$

Запропонована формула використана в практичній роботі при створенні програмного модуля в п'ятому розділі дисертаційної роботи. Всі решта формули запропоновані на теоретичному рівні.

2. Використання вагових коефіцієнтів (3):

$$R = w \times D_{InSAR} + k \times D_{GPR} + I. \quad (3)$$

3. Об'єднання через функцію активації (4):

$$R = \sigma(D_{InSAR} + D_{GPR}). \quad (4)$$

4. Мультимодальний аналіз (5):

$$R = g(INSAR_features, GPR_features), \quad (5)$$

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

5. Фільтрація та опрацювання даних (6):

$$R = f(D_{InSAR} + D_{GPR}). \quad (6)$$

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.

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 як в формулі (3), 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 налаштувати 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 покращити 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 опрацювання даних InSAR.

Розрахунок D_{GPR} (дані від георадару без додаткового опрацювання) 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 землі.

➤ *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 опрацювання 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.

У третьому розділі дисертації «Використання даних дистанційного зондування Землі та георадару для моніторингу земель історико-культурного призначення» описується використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і георадару для вивчення земель історико-культурного призначення.

Тема моніторингу земель історико-культурного призначення залишається актуальною протягом багатьох років. Незважаючи на значний внесок українських та зарубіжних вчених, комплексна концепція застосування декількох дистанційних методів у поєднанні з наземними неінвазивними дослідженнями для моніторингу таких земель досі не була запропонована.

Однією з основних проблем є недостатнє фінансування та технічне забезпечення сучасними технологіями та обладнанням, що ускладнює проведення регулярних інспекцій. Брак фахівців у галузі охорони культурної спадщини обмежує можливості для якісного моніторингу та оцінки стану об'єктів. Урбанізація та неконтрольована забудова призводять до порушення цілісності історико-культурних територій, що підкреслює необхідність вдосконалення законодавчої бази та посилення контролю.

Вирішення цих проблем можливе через впровадження сучасних технологій, таких як геоінформаційні системи, дистанційне зондування Землі та наземні неінвазивні методи. Залучення місцевих громад до процесу спостереження та охорони культурної спадщини також є важливим аспектом.

Вимоги до точності дослідження об'єктів історико-культурної спадщини є високими. Для архітектурних об'єктів необхідна геопросторова точність не менше 1-2 м, геометрична точність до ± 5 см, деталізація до ± 10 см. Для археологічних об'єктів геопросторова точність має бути до $\pm 0,5$ м, геометрична до $\pm 0,1$ м, деталізація до ± 5 см. Ландшафтні об'єкти вимагають геопросторової точності до ± 3 м, геометричної до $\pm 0,5$ м, деталізації до ± 10 см. Для братських поховань геопросторова точність повинна бути до $\pm 0,5$ м, геометрична до $\pm 0,1$ м, деталізація до ± 5 см.

Синергія декількох методів дозволяє підвищити точність досліджень. Наприклад, при дослідженні підземних об'єктів перехід від радіолокаційних досліджень з супутника Sentinel-1 (геопросторова точність 10-15 м) до аерознімання та георадарного дослідження забезпечує точне визначення характеристик об'єкта.

Для апробації теоретичних та практичних положень були обрані два об'єкти: ансамбль оборонних споруд "Львівська цитадель" у м.Львові та Звенигородське городище, що знаходиться за 20 кілометрів від м.Львова в селищі Звенигород. Перший об'єкт має збережену інфраструктуру та відомі вірогідні місця масових поховань часів Другої світової війни. Другий об'єкт фактично зруйнований, але археологічні дослідження попередніх дослідників віднайшли місця історичної кладки та інші артефакти.

Точність вертикальних зміщень, виміряних за допомогою супутникової радіолокаційної інтерферометрії, залежить від довжини хвилі, базової лінії між супутниками, моделей топографії та шумів. Для досліджень використовувалися дані з супутника Sentinel-1 з просторовим розрізненням 5x20 м.

Для дослідження ансамблю оборонних споруд "Львівська цитадель" методом радіолокаційної інтерферометрії, опрацювання даних проводилося з використанням програмного забезпечення ENVI SARscape та методу SBAS. Використовувалися 36 архівів радіолокаційних знімків з періодичністю в один місяць з січня 2020 по грудень 2022 року. Після побудови інтерферограм було визначено екстремуми вертикальних зміщень на території "Цитаделі" за трирічний період (рис.1).



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

Було виявлено 24 точки максимальних вертикальних зміщень з діапазоном від 17 до 36 см. Чотири точки потрапляють у місця можливих братських поховань з просіданням 17-19 см. П'ять точок з просіданням 18-22 см знаходяться на забудованій території. Решта 15 точок з просіданням 20-36 см розташовані навколо максиміліанських веж на незабудованій території (рис2).

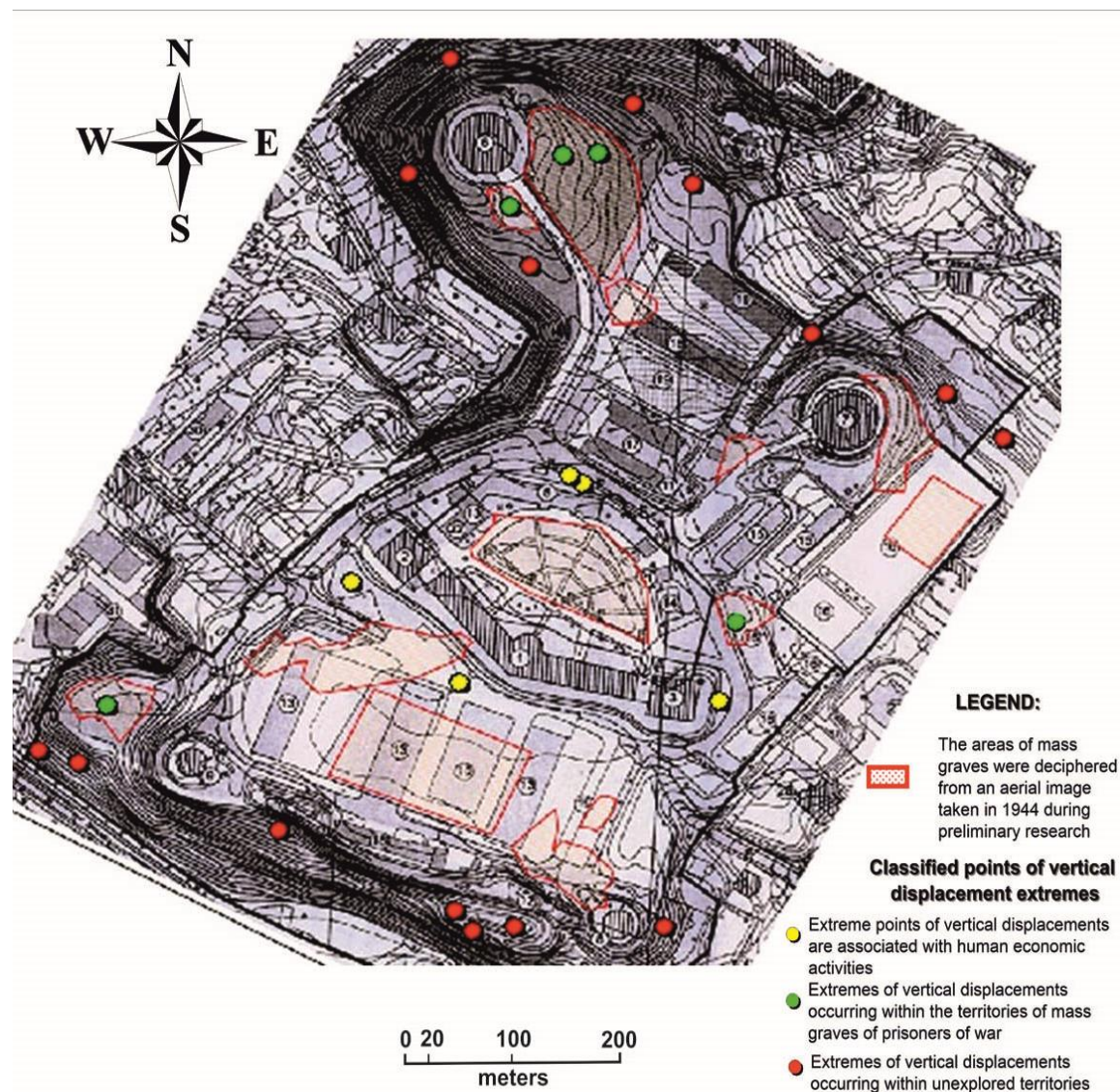


Рисунок 2 - Топографічний план з позначеними полігональними об'єктами можливих братських поховань (рожеве тло оконтурено червоними лініями) з нанесеними точками найбільших вертикальних зміщень

Аналіз показав, що найбільші вертикальні зміщення спостерігаються на незабудованій залісненій території схилів. Це може свідчити про наявність підземних ходів між максиміліанськими вежами, які з часом просідають. З'єднавши точки максимальних зміщень, було отримано можливу мережу підземних ходів, які виходять за встановлені межі об'єкта історико-культурної спадщини (рис.3). Це вказує на необхідність уточнення меж об'єкта та відповідних земель історико-культурного призначення.

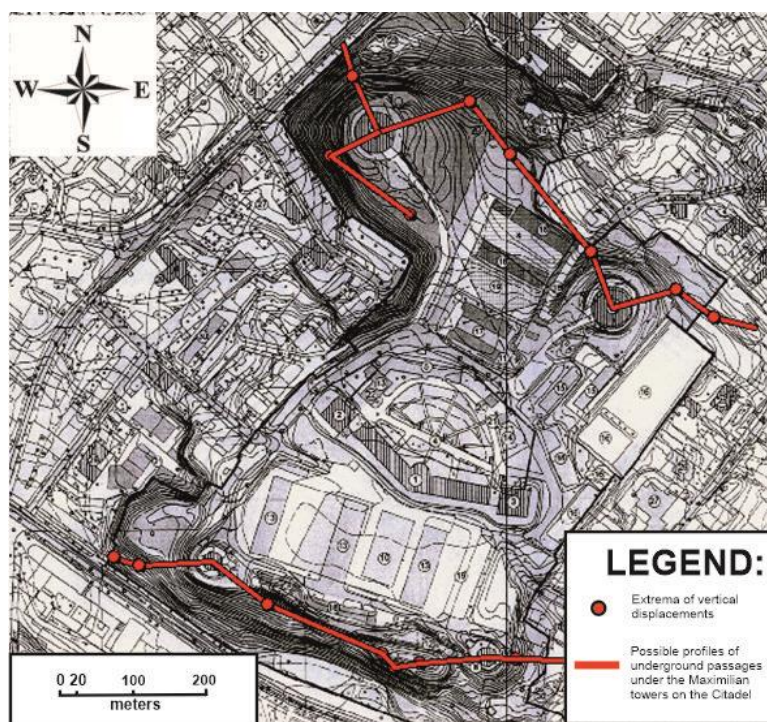


Рисунок 3 - Топографічний план з нанесеними можливими профілями підземних ходів між максиміліанськими вежами на Цитаделі, що виходять за встановлені межі об'єкта історико-культурної спадщини

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. 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. 4 подано карту максимальних вертикальних зміщень земного покриття на території Цитаделі за 2020-2022 роки.

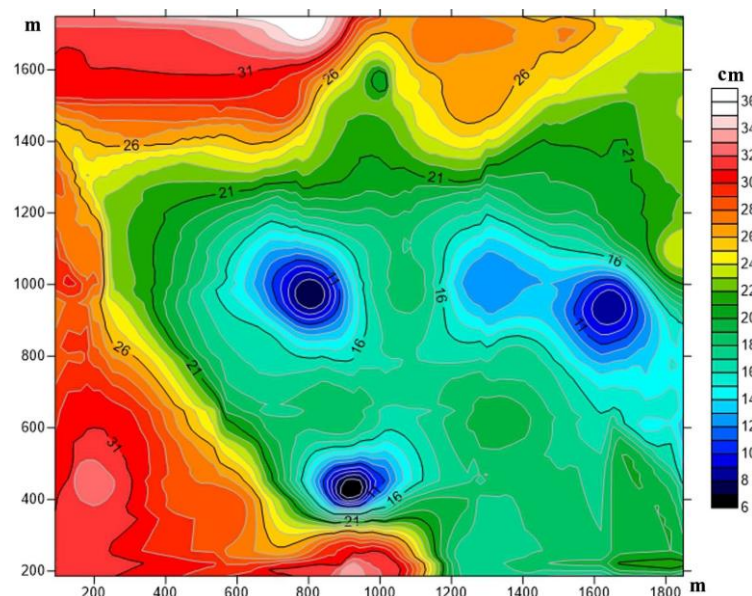


Рисунок 4 - Карта вертикальних зміщень, см

Для дослідження Звенигородського городища методом радіолокаційної інтерферометрії використовувалися дані радіолокаційного знімання з супутника Sentinel-1A за п'ятирічний період з 2018 по 2022 роки з періодичністю знімання кожні три місяці. Було створено інтерферограми з використанням перпендикулярної базової лінії довжиною 200 м та тимчасової базової лінії тривалістю 90 днів.

Виявлено, що вздовж профілю A1-A2 коливання вертикальних зміщень становило від -51 мм до +11 мм, вздовж профілю B1-B2 від -67 мм до +19 мм, вздовж профілю C1-C2 від -59 мм до +14 мм. (рис.5).

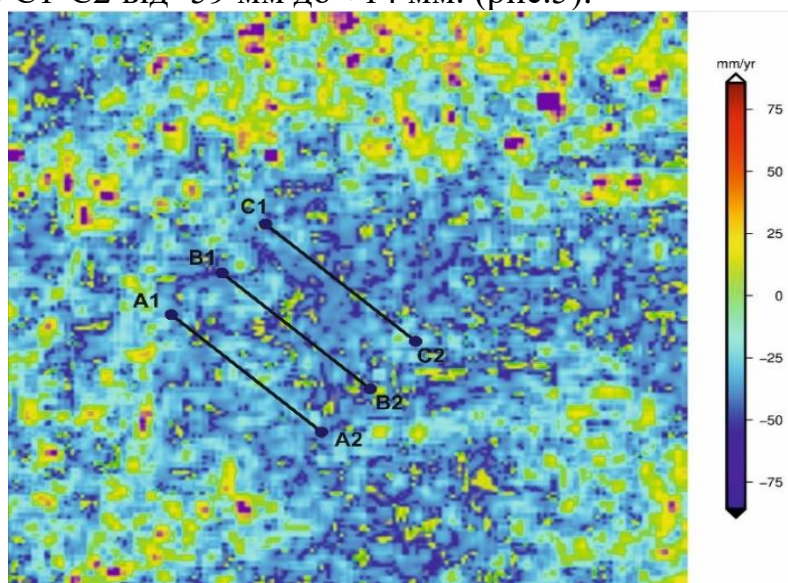


Рисунок 5 - Середня швидкість LoS з кінця березня 2018 року по жовтень 2022 року, розподіл точок вибірки та профільних ліній

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.6).

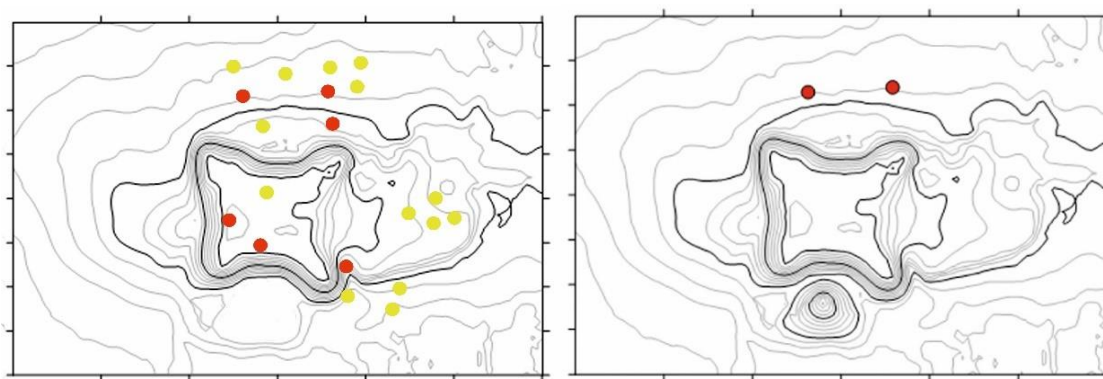


Рисунок 6 - Пріоритетні точки для досліджень різного пріоритету, визначені за архівними картографічними матеріалами (зліва) та екстремуми вертикальних зміщень, що співпали з пріоритетними точками, позначені для подальших георадарних досліджень (справа)

Після визначення можливих точок інтересу за допомогою радіолокаційної інтерферометрії були проведені георадарні дослідження за допомогою системи UTSI GV3_1 з частотою антени 400 МГц.

Дослідження ансамблю оборонних споруд Цитадель георадарним методом, проводилися на двох ділянках: тенісний корт (АОІ 1) та ділянка за східною максиміліанською вежею (АОІ 2). На ділянці АОІ 1 на глибині близько 0,3 м виявлено підземний об'єкт розміром 20x3 м, який йде по діагоналі через тенісний корт. На глибині близько 0,7 м виявлено додаткові особливості в межах об'єкта (рис.7).

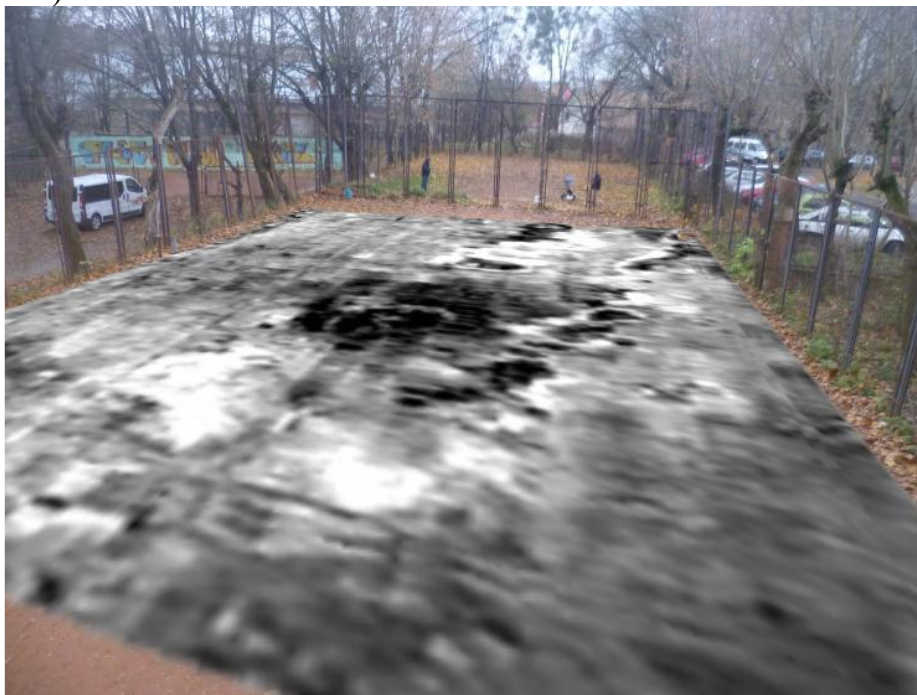


Рисунок 7 - Ділянка дослідження АОІ 1 - накладення інтервалів за георадаром

Цей об'єкт чітко співпадає з площадкою збуреного ґрунту, інтерпретованою на аерознімку 1944 року та точкою екстремуму вертикальних зміщень з радіолокаційних досліджень. Краї об'єкту особливо чітко визначені найближче до південно-західного кута тенісного корту і йдуть за межі досліджуваної ділянки в північно-західний кут ділянки АОІ 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 ($t = 14.38\text{ns}$) чіткість боків зменшується, а додаткові особливості виявляються в середині основного об'єкту. Це є, можливо, відбиття від об'єктів, що знаходяться в межах АОІ, 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 ($t=15.63\text{ns}$) на відміну від південної сторони, де воно залишається чітким на глибині близько 0,93 м ($t=18.44\text{ns}$), об'єкт зовсім не видно на глибинах понад 1,1 м ($t=22.1\text{ns}$) (рис.8).

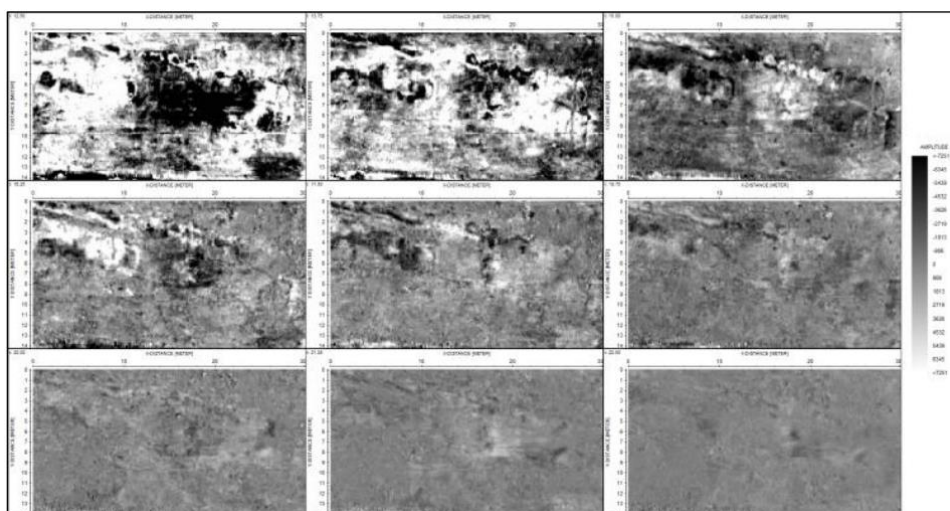


Рисунок 8 - Ділянка дослідження АОІ 1 – часові інтервали, визначені георадаром

На ділянці АОІ 2 виявлено прямокутний об'єкт шириною близько 2,5 м, перші відбиття якого з'являються на глибині близько 0,5 м.

Рисунок 9 показує інтервал об'єкту на глибині близько 0,78 м ($t=15,63\text{ns}$). Прямокутний об'єкт можна побачити нижче по центру зображення. Ґрунт за межами огорожі 1944 року знаходиться з правої сторони.

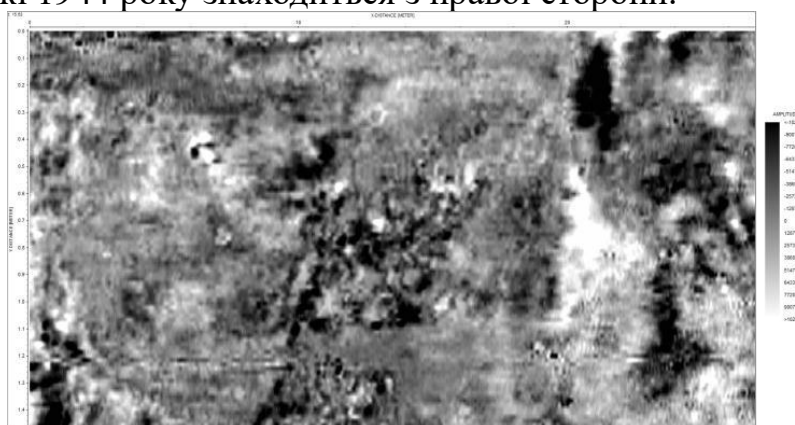


Рисунок 9 - Ділянка дослідження АОІ 2 – сканограма георадару при $t=15,63\text{ns}$

В таблиці 1 подано інформацію про точність вимірювань, похибки георадарного знімання Львівської цитаделі.

Таблиця 1.

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

Георадарні дослідження Звенигородського городища проводилися на двох ділянках, які показали найбільше вертикальне зміщення за даними радіолокаційної інтерферометрії. Виявлено гіперболічні відбиття на глибинах

від 0,16 до 1,2 м, які можуть свідчити про рештки фундаменту будівель, похованих під ґрунтом.

Траєкторія на рисунках 10 і 11 має довжину 40 метрів і відображає рефлектор іншого контрасту. Якщо об'єднати рисунки 10 і 11, обидві траєкторії демонструють різне положення гіперболічного відбиття. Траєкторія 1 (рис.10) 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.11) гіперболічний рисунок видно на глибинах приблизно 0,16 та 0,33 метра.

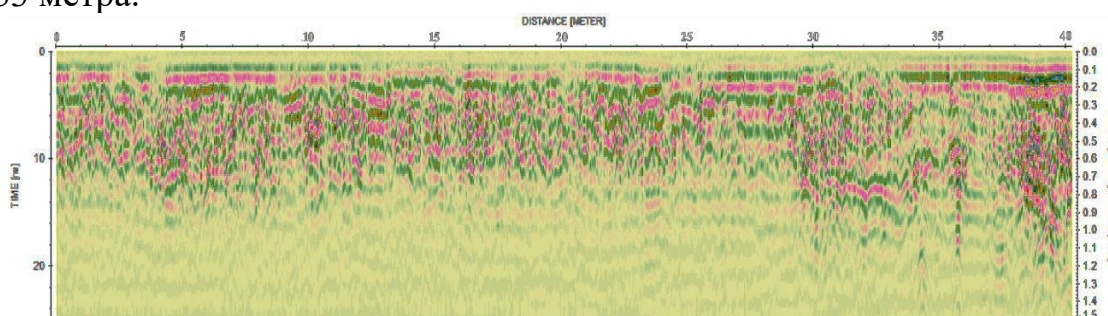


Рисунок 10 – Траєкторія 1

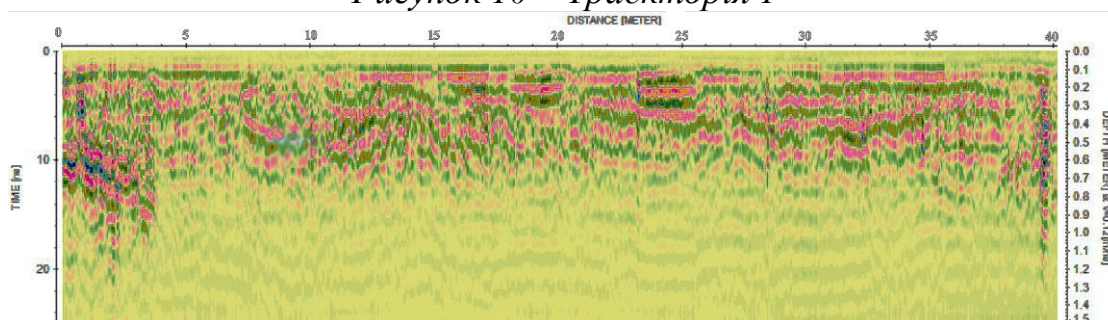


Рисунок 11 - Траєкторія 2

В таблиці 2 подано інформацію про точність вимірювань, похибки георадарного знімання Звенигородського городища.

Таблиця 2.

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

З аналізу таблиць 1 і 2 бачимо, що похибка глибини коливається від 3 до 9 сантиметрів, що дає підстави вважати точними визначення глибин залягання артефактів.

У четвертому розділі «Застосування даних, отриманих з БПЛА, для побудови і аналізу цифрових моделей поверхні об'єктів історико-культурної спадщини» розглядається використання даних, отриманих за допомогою БПЛА, для створення та аналізу цифрових моделей поверхні об'єктів

історико-культурної спадщини. Цей підхід дозволяє з високою точністю відтворювати рельєф і структури цих об'єктів, що сприяє їх збереженню, моніторингу та ефективному управлінню.

У сучасних умовах розвиток технологій безпілотних літальних апаратів відкриває нові можливості для дослідження та моніторингу об'єктів історико-культурної спадщини, а від так і земель історико-культурного призначення. Використання даних, отриманих з БПЛА, дозволяє створювати високоточні цифрові моделі поверхні (ЦМП), що є критично важливими для збереження та управління такими об'єктами.

У рамках дисертаційної роботи було проведено аерознімальні роботи та повітряне лазерне сканування території історико-культурного заповідника "Древній Звенигород". Для виконання знімальних робіт використовувалися квадрокоптери DJI Matrice 300 RTK та DJI Matrice 350 RTK. В якості знімальної камери застосовано DJI Zenmuse P1, яка має високі фотограмметричні характеристики та забезпечує просторову розрізненість до 1,82 см/піксель при висоті польоту 145 метрів.

Метою аерознімання було створення ортофотоплану в масштабі 1:2000. Для забезпечення необхідної точності було встановлено поздовжнє перекриття знімків 60% та поперечне 40%. Над територією площею 26,8 га, отримано 458 знімків.

Після опрацювання даних в програмному забезпеченні DJI Terra створено щільну хмару точок та отримано ортофотоплан заповідника. Оцінка точності побудованого ортофотоплану за 10 контрольними точками показала середні квадратичні похибки: $m_x = 0,056$ см, $m_y = 0,050$ см, $m_z = 0,115$ см, що відповідає вимогам для масштабу 1:2000 (рис.12).

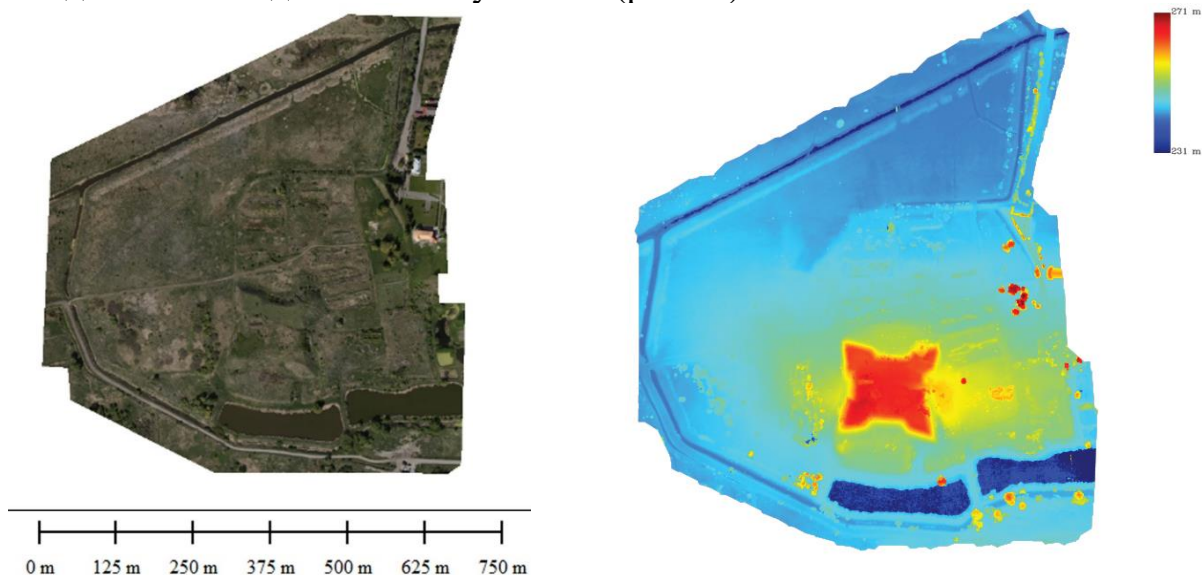


Рисунок 12 – Створені ортофотоплан та ЦМП історико-культурного заповідника «Древній Звенигород»

Паралельно було проведено повітряне лазерне сканування з використанням двох різних сканерів: DJI Zenmuse L2 та CHCNAV Alpha Air 450. Сканування виконувалося на висоті 60 метрів над поверхнею землі з середньою швидкістю

польоту 4,45 м/с, частотою імпульсу 240 кГц та швидкістю сканування 720 кГц. Територія заповідника була покрита 14 маршрутами з перекриттям смуг до 50% для забезпечення високої щільності точок.

Опрацювання даних лідарного сканування здійснювалося в програмному середовищі Terra Scan. Для підвищення точності використовувалися три опорні точки, визначені за допомогою ГНСС-знімання. Середня різниця висот між контрольними точками та моделлю склала 0 м, а середнє абсолютне відхилення – 0,0067 м. Стандартне відхилення висот становило 0,0091 м, що свідчить про високу точність лідарних даних.

Порівняння цифрових моделей поверхні, отриманих за даними аерознімання та лідарного сканування, показало наступне:

- ЦМП, побудована за даними аерознімання, містила більше хибних точок, особливо в районах з густою рослинністю та водними об'єктами.
- ЦМП, отримані з лідарних даних двох різних сканерів, були більш точними та мали менше спотворень. Висотні показники об'єктів на обох моделях були на одному рівні, з незначними відхиленнями, що можна пояснити різними погодними умовами під час сканування.
- Аналіз профілів ЦМП показав, що лідарні дані забезпечують більш плавні та точні контури рельєфу, тоді як аерознімання дає спотворення висот, особливо в зонах з високими деревами.
- 3D-моделювання підтвердило, що лідарні дані дозволяють отримати більш детальні та точні моделі об'єктів, що є важливим для подальших досліджень та збереження історико-культурної спадщини.

Для аналізу, побудовано 2 профілі на ЦМП, що мають напрями: Південний Захід – Північний Схід, Північний Захід- Південний Схід (рис.13).

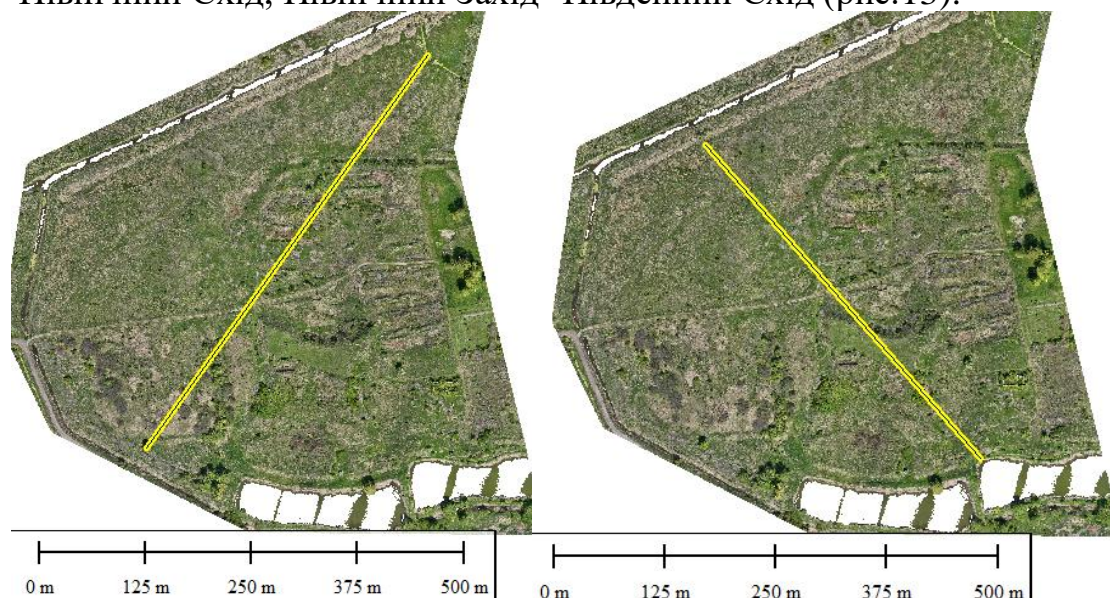


Рисунок 13 - Побудовані два профіля на ЦМП

З цих профілів, отримані показники для ЦМП побудованої за даними аерознімання (рис.14), за даними з лідара CHCNAV Alpha Air 450 (рис.15) і за даними з лідара DJI Zenmuse L2 (рис.16).

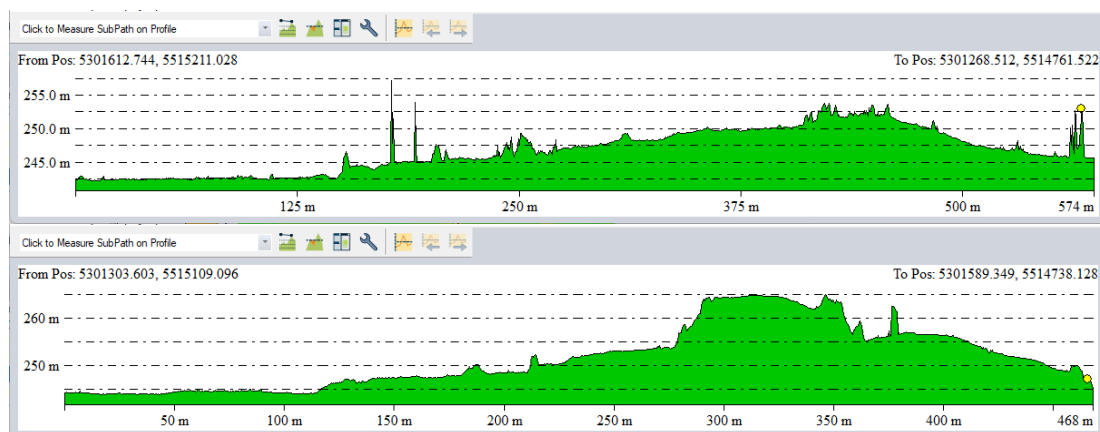


Рисунок 14 - Профілі побудовані за даними аерознімання

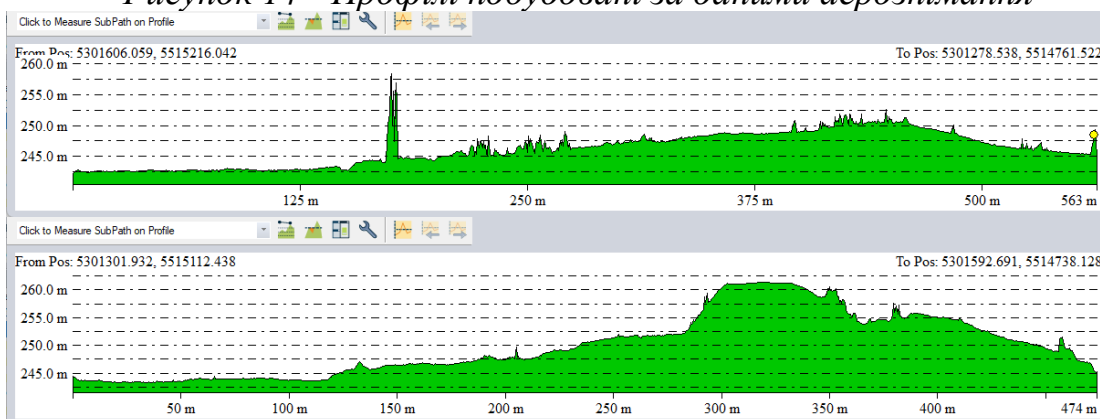


Рисунок 15 - Профілі побудовані за даними лідара CHCNAV Alpha Air 450

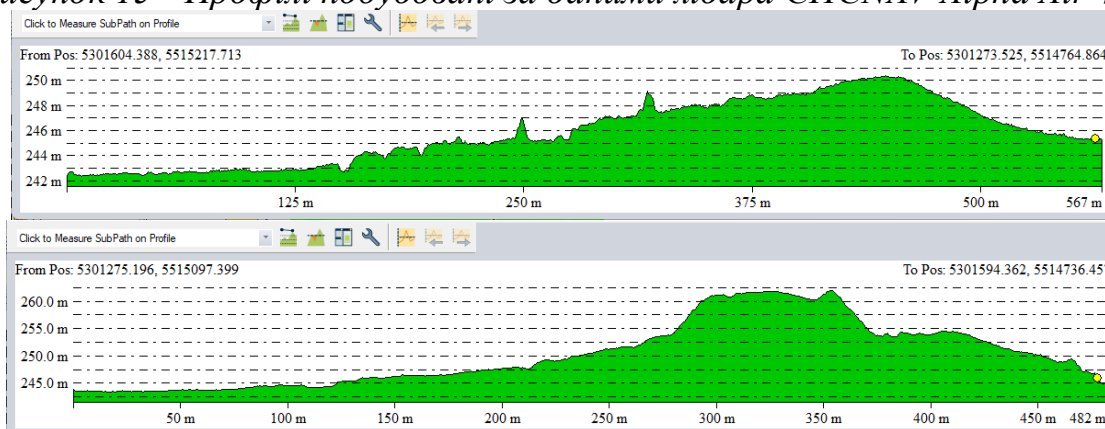


Рисунок 16 - Профілі побудовані за даними лідара DJI Zenmuse L2

Порівняльний аналіз моделей, отриманих з різних сканерів, виявив незначні відмінності, що можуть бути обумовлені технічними характеристиками обладнання та умовами знімання. Проте, загалом, результати з різних систем є співставними та підтверджують високу якість отриманих даних.

В результаті проведених досліджень, що подані в розділах 3 і 4 було розроблено концептуальну модель використання даних дистанційного зондування Землі та георадару для вивчення земель історико-культурного призначення (рис.17).

Розроблена модель дозволяє ефективно інтегрувати дані різних джерел та методів дослідження, що забезпечує комплексний підхід до вивчення та моніторингу земель історико-культурного призначення (рис.18).



Рисунок 17 - Детальна концептуальна модель використання даних ДЗЗ і георадару для вивчення земель історико-культурного призначення

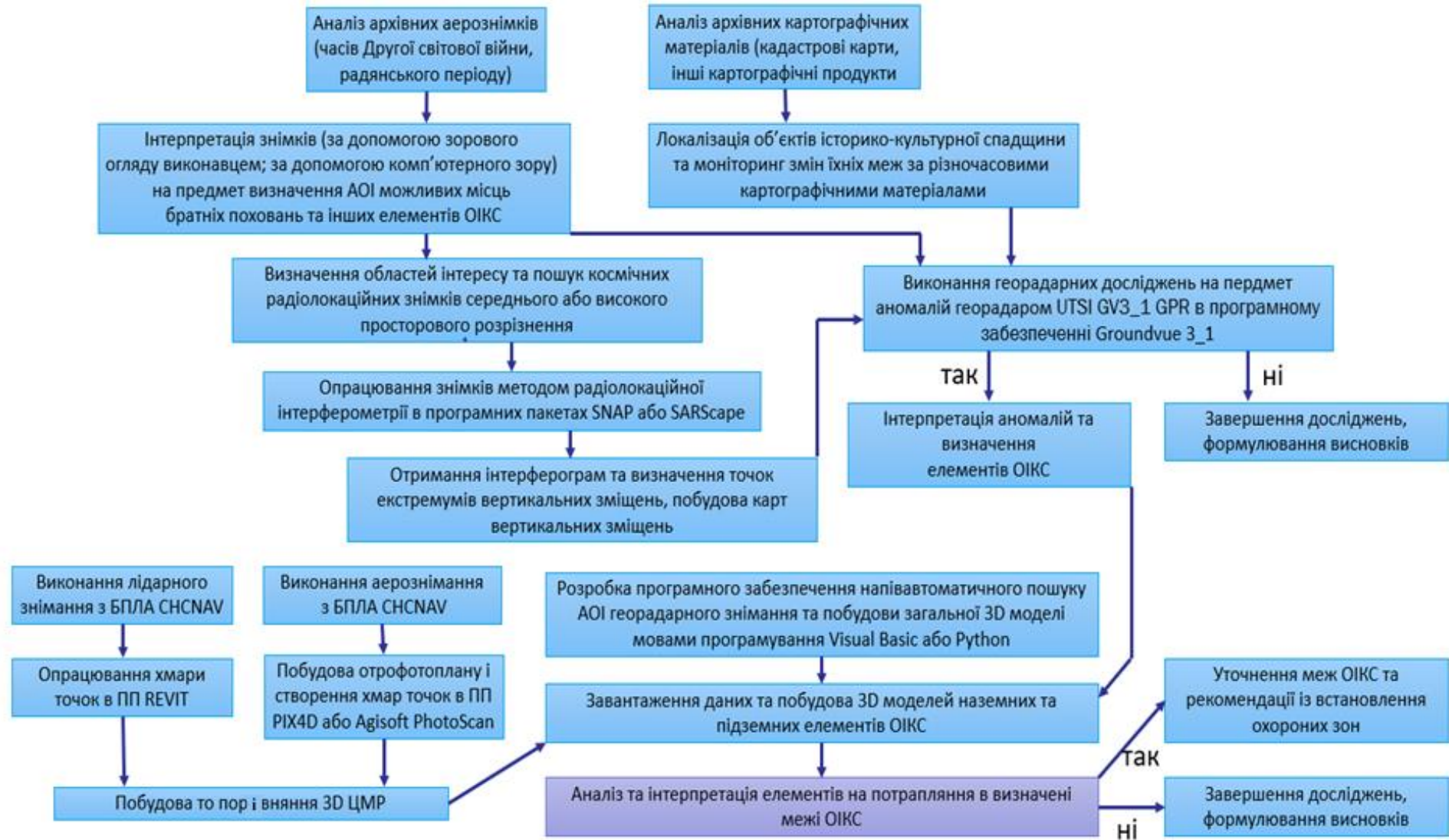


Рисунок 18 - Технологічна схема реалізації концептуальної моделі використання даних ДЗЗ і георадару для вивчення земель історико-культурного призначення

П'ятий розділ “Розробка програмного забезпечення для напівавтоматичного визначення областей інтересу та створення загальної 3D-моделі об'єктів історико-культурної спадщини» присвячений створенню програмного інструменту для часткової автоматизації визначення ключових зон та формування комплексної 3D-моделі об'єктів історико-культурної спадщини.

Розробка програмного забезпечення для напівавтоматичного визначення областей інтересу та створення загальної 3D-моделі об'єктів історико-культурної спадщини є складним та важливим завданням у сфері збереження та дослідження культурної спадщини. Застосування сучасних методів опрацювання геопросторових даних дозволяє автоматизувати рутинні процеси, оптимізувати робочі потоки та підвищити точність результатів.

Однією з основних задач даного розділу є розробка алгоритмів для опрацювання георадарних даних та цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з метою напівавтоматичного виділення областей інтересу (АОІ) та побудови тривимірної моделі об'єкта, а також корегування меж об'єктів історико-культурної спадщини використовуючи завантаженні геопросторові дані.

Розроблена технологічна схема створення модуля з запропонованою назвою 3DDEM&RADAR (рис.19). Технологічна схема включає розробку трьох основних блоків модуля: визначення ділянок з інтерферограм; побудова загальної 3D ЦМР; уточнення меж об'єктів історико-культурної спадщини.

Для інтерактивного відображення та аналізу отриманих результатів було створено спеціалізований користувацький інтерфейс, який забезпечує можливість візуалізації моделі в режимі реального часу, взаємодії з нею, вибору різних шарів інформації, а також проведення додаткових вимірювань та аналізу. Інтерфейс дозволяє користувачам працювати з моделлю безпосередньо, що спрощує процес дослідження та прийняття рішень щодо подальших дій.

Тестування програмного забезпечення проводилося на реальних даних Львівської цитаделі. Це дозволило перевірити ефективність програмного модуля, його здатність до точного визначення АОІ та побудови 3D-моделей, а також оцінити зручність користування інтерфейсом. За результатами тестування підтверджено здатність програмного забезпечення до точної сегментації та класифікації підземних структур, а також можливість уточнення меж об'єкта історико-культурної спадщини.

Серед основних результатів роботи модуля слід відзначити:

- ✓ Автоматизацію процесу виділення областей інтересу, що дозволило скоротити час аналізу даних на 60% у порівнянні з ручними методами (рис.20).

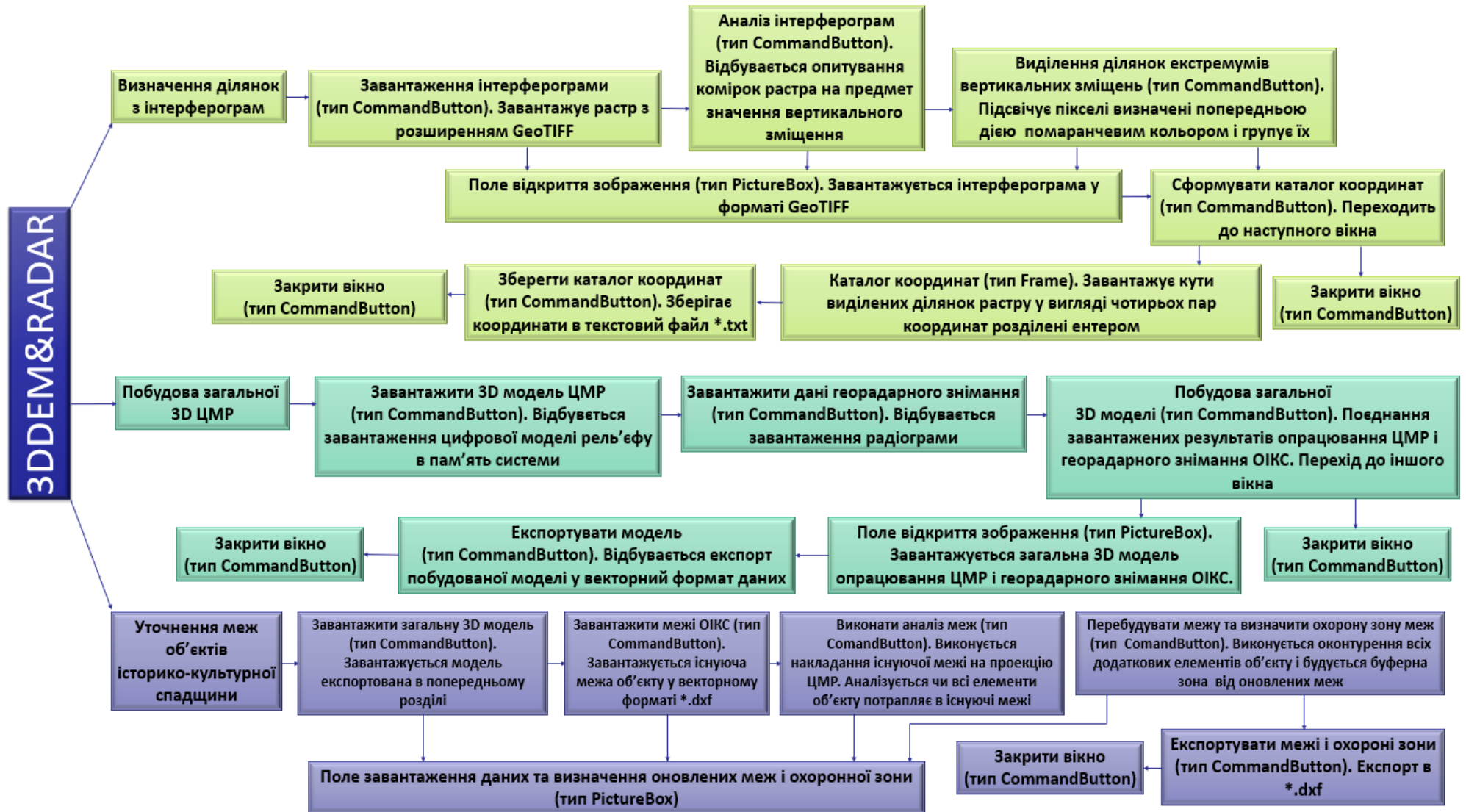
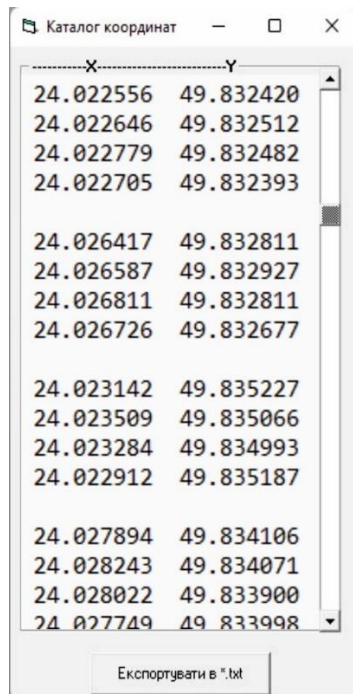
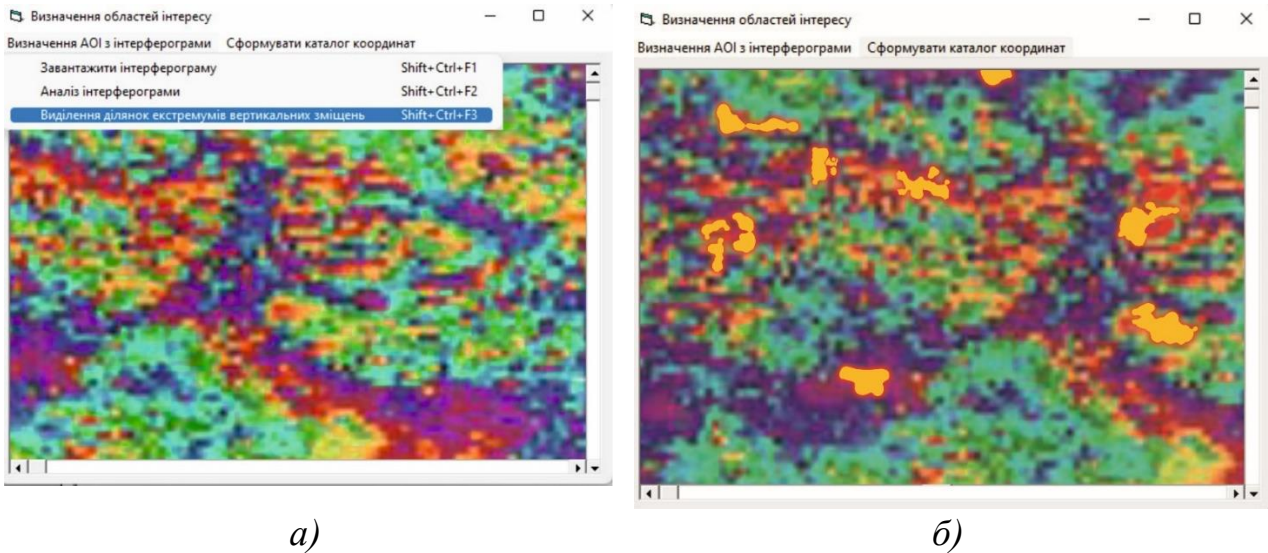


Рисунок 19 - Технологічна схема створення модуля 3DDEM&RADAR



в)

Рисунок 20 – Результати виконання блоку модуля «Визначення ділянок з інтерферограм»: а) виділення ділянок екстремумів вертикальних зміщень, б) виділення полігонів максимальних зміщень з інтерферограми, в) завантаження координат чотирьох кутів виділених АОІ

- ✓ Успішну побудову загальної 3D-моделі, яка включає як наземні, так і підземні елементи об'єкта, що дозволяє більш детально вивчати структуру об'єкта (рис.21).

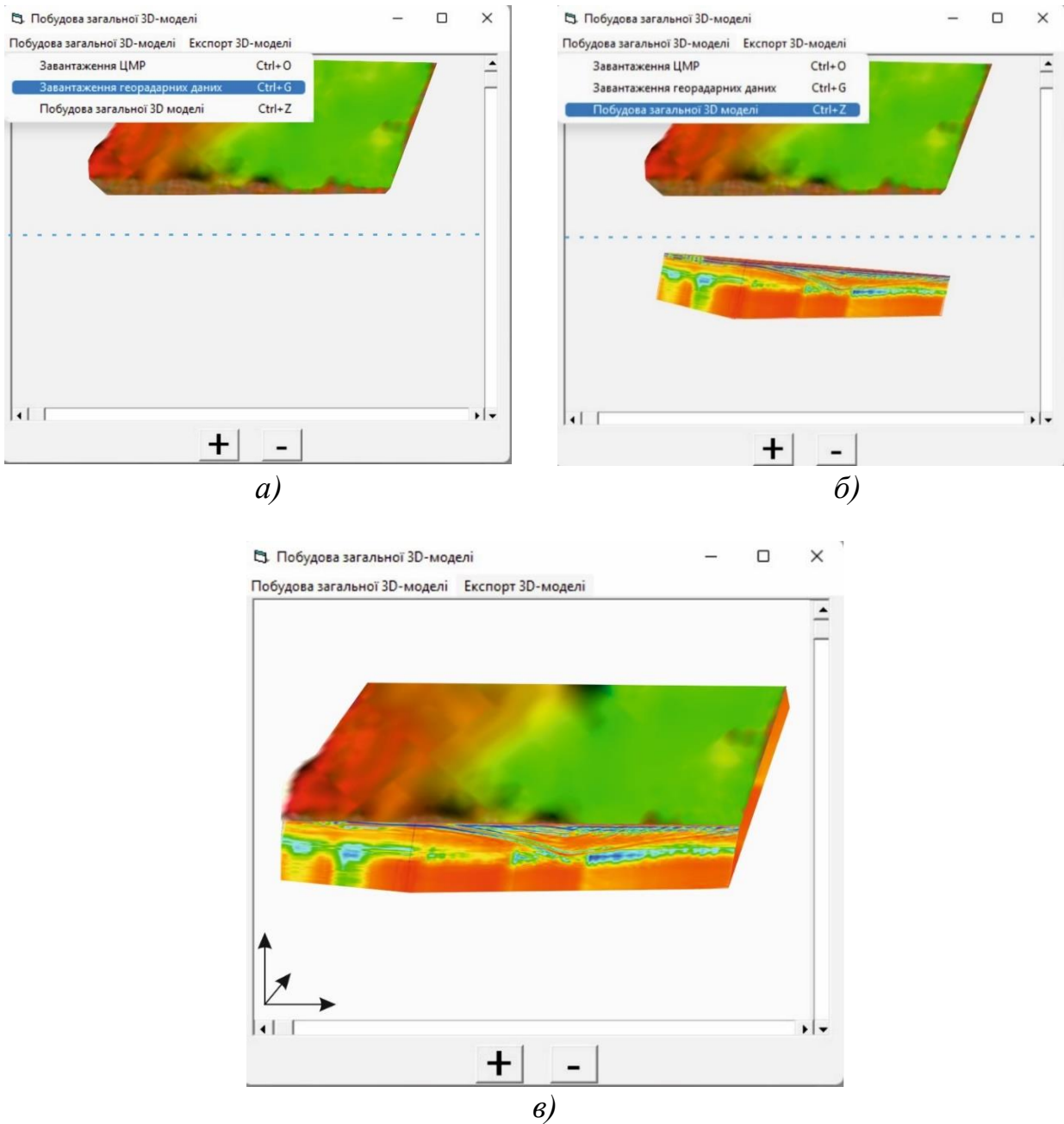
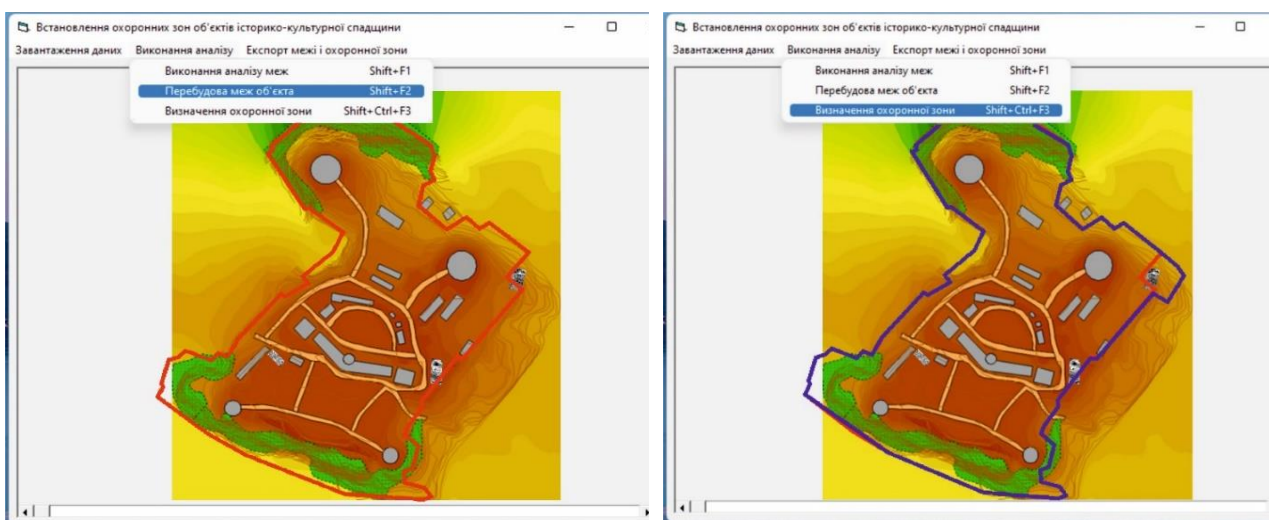


Рисунок 21 - Результати виконання блоку модуля «Побудова загальної 3D ЦМР»: а) виконання команди «Завантаження георадарних даних»; б) виконання команди «Побудова загальної 3D-моделі»; в) виконання команди «Експорт 3D-моделі»

- ✓ Можливість експорту меж і охоронних зон у формат *DXF* для подальшого використання в ГІС або САD-програмах, що сприяє інтеграції розробленого модуля у робочі процеси фахівців (рис.22).



а)

б)



в)

Рисунок 22 - Результати виконання блоку модуля «Уточнення меж об'єктів історико-культурної спадщини»: а) виконання команди «Перевбудова меж об'єкта»; б) Виконання команди «Визначення охоронної зони»; в) вікно з результатом роботи програмного модуля

Реалізація програмного модуля також передбачала інтеграцію алгоритмів для уточнення меж об'єктів історико-культурної спадщини. Це дозволяє враховувати нововиявлені підземні елементи об'єктів та відповідним чином коригувати межі охоронних зон. Буферні зони, створені автоматично на основі нових меж, відповідають стандартам захисту культурної спадщини.

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 (ОКС) 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 модель 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 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. **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. **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)
 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. 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)
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 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 георадарного знімання. Інноваційні технології у плануванні територій : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 5-7 жовтня 2023 р., Одеса, 35–39.

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-модельовання 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 10x3 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 методика 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.