

## ВІДГУК

офіційного опонента д.е.н., професора Мартина Андрія Геннадійовича на дисертаційну роботу **Четверікова Бориса Володимировича «Методологія використання даних ДЗЗ і георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення»**, що подається на здобуття наукового

ступеня доктора технічних наук за спеціальністю

05.24.04 – Кадастр та моніторинг земель

05 – Технічні науки

**Актуальність теми.** Сучасні тенденції глобалізації, урбанізації та інтенсифікації використання природних ресурсів спричиняють зростаючий тиск на земельні ресурси, зокрема на землі історико-культурного призначення. Ці території, які є невід'ємною частиною культурної спадщини та мають значну цінність для збереження ідентичності народів, усе частіше піддаються антропогенним та природним впливам, що загрожують їхній цілісності та довговічності. Забезпечення належного моніторингу, збереження та раціонального використання цих земель є критично важливим завданням у контексті сталого розвитку.

Актуальність дослідження методології використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення обумовлена потребою у сучасних методах, що забезпечують високу точність та регулярність спостереження за об'єктами культурної спадщини. ДЗЗ і георадар надають можливість безконтактного збору даних про поверхневі та підземні елементи об'єктів, що дозволяє своєчасно виявляти зміни та потенційні загрози без фізичного втручання у структуру об'єктів. Це має особливе значення для археологічних пам'яток, де порушення ґрунту може призвести до втрати важливої інформації.

В умовах стрімкого розвитку технологій ДЗЗ та георадарного знімання виникають нові можливості для ефективного моніторингу земель. Технології ДЗЗ дозволяють отримувати високоінформативні дані про стан поверхні землі, а георадарне знімання забезпечує детальну інформацію про структуру ґрунтів, підземні об'єкти та археологічні артефакти. Методологічне поєднання цих технологій сприяє точному моделюванню, плануванню заходів зі збереження, а також ефективному управлінню історико-культурними землями в умовах зростаючого тиску з боку урбанізації та кліматичних змін.

Одним із ключових викликів є відсутність чітко розробленої методології інтегрованого використання даних ДЗЗ і георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення. Існуючі методики здебільшого

фрагментарні та не враховують специфіку цих земель, таких як чутливість до фізичних і хімічних змін у ґрунтах, необхідність виявлення та картографування підземних об'єктів, що мають культурну або археологічну цінність, а також потребу у тривалому моніторингу стану територій для виявлення деградаційних процесів. Крім того, моніторинг цих земель вимагає високого рівня деталізації даних та інтеграції результатів різних типів зйомок у єдину інформаційну систему, що ускладнюється різноманітністю джерел даних та їх неоднорідністю.

Вивчення методів моніторингу земель історико-культурного призначення знаходиться на перетині кількох наукових напрямів: геоінформатики, кадастру, археології та екології. У міжнародному контексті існує активний інтерес до розвитку інноваційних методик збереження культурної спадщини з використанням сучасних геотехнологій. Наприклад, у межах програм ЮНЕСКО та інших ініціатив передбачено інтеграцію ДЗЗ і геофізичних методів для охорони культурних ландшафтів.

Україна, як держава з багатою історико-культурною спадщиною, особливо зацікавлена у впровадженні ефективних механізмів моніторингу земель цього типу. Водночас сучасна нормативно-правова та нормативно-технічна база, що регулює використання технологій моніторингу земель, потребує вдосконалення. Це створює запит на нові методологічні рішення, які поєднують високоточні технології з урахуванням місцевих умов та вимог.

Розробка методології інтегрованого використання даних ДЗЗ і георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення дозволить забезпечити точну ідентифікацію стану цих земель, у тому числі підземних об'єктів. Це сприятиме своєчасному виявленню змін та потенційних загроз без фізичного втручання у структуру об'єктів, що має особливе значення для археологічних пам'яток. Підвищиться ефективність управління земельними ресурсами, спрямованими на збереження культурної спадщини, а також інтеграція сучасних технологій моніторингу у систему земельного кадастру України.

Отже, актуальність теми дослідження визначається нагальною потребою у вдосконаленні методологічних засад моніторингу земель історико-культурного призначення із застосуванням інноваційних технологій ДЗЗ та георадарного знімання, що забезпечить ефективне збереження та раціональне використання цих цінних ресурсів.

**Наукове значення отриманих результатів, їх новизна.** Наукова значущість отриманих результатів полягає в розробці інноваційної методології моніторингу земель історико-культурного призначення, заснованої на інтеграції технологій

дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та георадарного знімання. Запропонована методика забезпечує комплексний і безконтактний аналіз стану цих територій, що дозволяє з більшою точністю виявляти зміни та потенційні загрози для об'єктів культурної спадщини.

У дисертаційній роботі вперше сформульовано методологічні принципи та розроблено інформаційно-технологічні моделі моніторингу земель історико-культурного значення з використанням ДЗЗ та георадару. Продемонстровано ефективність синергетичного підходу до інтеграції цих методів, що дозволило створити концептуальну модель моніторингу таких територій. Запропоновано математичну модель для комбінування даних радіолокації та георадарного знімання, а також розроблено програмне забезпечення, яке інтегрує тривимірні моделі як поверхневих, так і підземних елементів, забезпечуючи точне окреслення історичних меж об'єктів.

Крім того, удосконалено моделі застосування супутникової інтерферометрії в поєднанні з георадаром, що підвищує точність і деталізацію отримуваних даних. Розроблено методику обробки різнорідних даних для комплексного аналізу об'єктів культурної спадщини, яка враховує специфіку різних джерел інформації та забезпечує їх ефективну інтеграцію.

Новизна дослідження полягає у впровадженні синергетичного підходу до моніторингу земель історико-культурного призначення, який поєднує передові технології ДЗЗ та георадарного знімання. Це не лише підвищує точність і ефективність моніторингу, але й розширює можливості аналізу та управління такими землями, сприяючи збереженню та раціональному використанню об'єктів культурної спадщини.

**Практичне значення результатів роботи.** Результати дослідження мають значний практичний потенціал для державних органів та місцевих адміністрацій, відповідальних за управління та контроль стану об'єктів культурної спадщини, а також для науково-дослідних інституцій. Вони формують основу для розробки нормативно-правових актів і стандартів систематичного моніторингу історичних об'єктів та земель, сприяючи ефективному управлінню та збереженню культурного надбання. Ефективність розроблених методик підтверджена їх апробацією на реальних об'єктах, зокрема на територіях «Львівської цитаделі» та «Древнього Звенигорода». Запропоновані моделі, методи та технології значно оптимізують вирішення прикладних завдань у сфері моніторингу та збереження історико-культурної спадщини. Комплексний підхід дозволяє з високою точністю визначати межі об'єктів, аналізувати підземні структури та

відстежувати вертикальні зміщення земної поверхні, що забезпечує збереження історичних пам'яток у їх автентичному стані.

Особливо вагомим є внесок дослідження у сферу кадастрового обліку земель історико-культурного призначення. Інтеграція технологій дистанційного зондування Землі та георадарного знімання підвищує точність і деталізацію кадастрових даних, що є критично важливим для юридичного визначення меж об'єктів культурної спадщини та забезпечення їх правового захисту. Це дозволяє створювати високоточні кадастрові карти, які відображають як поверхневі, так і підземні елементи, сприяючи більш ефективному управлінню земельними ресурсами та плануванню територій. Застосування запропонованих рішень у кадастровому обліку забезпечує точне визначення юридичних меж історико-культурних об'єктів, що мінімізує ризики земельних спорів та незаконного будівництва; моніторинг змін земельних ділянок у режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на потенційні загрози та запобігати негативним наслідкам; оптимізацію процесів управління земельними ресурсами, враховуючи культурну цінність та фізичні характеристики об'єктів. Таким чином, результати дослідження сприяють вдосконаленню кадастрового обліку, підвищенню ефективності державного контролю та збереженню культурної спадщини для майбутніх поколінь.

Отримані результати активно впроваджуються у навчальний процес підготовки магістрів за програмою «Геоінформаційні системи і технології» у Національному університеті «Львівська політехніка». Це сприяє формуванню висококваліфікованих фахівців у галузі геоінформаційних технологій, які здатні застосовувати сучасні методи моніторингу та кадастрового обліку в практичній діяльності.

**Відповідність паспорту спеціальності.** Дисертаційна робота Четверікова Б.В. є завершеним науковим дослідженням, яке повністю відповідає вимогам спеціальності 05.24.04 – «Кадастр та моніторинг земель». Основний акцент роботи зроблено на вдосконаленні системи топографо-геодезичного та картографічного забезпечення для вирішення завдань кадастру та моніторингу земельних ресурсів. У дослідженні інтегровано сучасні технології, такі як дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), GPS-вимірювання, цифрова фотограмметрія та геоінформаційні системи (ГІС), що забезпечує високу точність, оперативність та ефективність отриманих результатів.

Використання передових методів і технологій дозволило досягти значного підвищення якості топографо-геодезичних та картографічних даних, необхідних для сучасного кадастрового обліку та моніторингу земель. Дослідження

демонструє глибоке розуміння автором специфіки спеціальності «Кадастр та моніторинг земель» та відповідає актуальним потребам галузі у впровадженні інноваційних рішень для управління земельними ресурсами.

Таким чином, дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 05.24.04, оскільки вона спрямована на розв'язання актуальних науково-технічних проблем у сфері кадастру та моніторингу земель із застосуванням сучасних геодезичних та інформаційних технологій..

### **Оцінка змісту та оформлення дисертаційної роботи, її завершеність**

Дисертаційна робота Четверікова Б.В. складається із анотації, вступу, п'яти розділів основної частини, загальних висновків, списку літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 312 сторінок машинописного тексту, 103 рисунків, 14 таблиць, 35 сторінок - 293 позиції списку літературних джерел і 5 додатків на 12 сторінках.

Вступ дисертаційної роботи окреслює важливість обраної тематики, формулює мету дослідження, розглядає зв'язок роботи з науковими завданнями, аналізує стан вивчення проблеми, деталізує об'єкт і предмет дослідження, підкреслює наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, а також надає інформацію щодо апробації й публікації напрацювань.

Перший розділ роботи «Аналіз застосування дистанційних та неінвазивних методів досліджень у вивченні земель історико-культурного призначення» присвячений аналізу використання дистанційних і неінвазивних методів для дослідження земель історико-культурного призначення. Встановлено необхідність вдосконалення обліку об'єктів культурної спадщини, враховуючи відсутність єдиної системи даних і нормативні розбіжності. Оглянуто застосування супутникового зондування, аерознімання, лідарного сканування та георадарного дослідження для моніторингу змін поверхні, підземних структур та створення тривимірних моделей об'єктів.

Другий розділ «Теоретичні положення визначення вертикальних зміщень землі та підземних аномалій» зосереджений на методології виявлення вертикальних зміщень і підземних аномалій через радіолокаційне й георадарне зондування. Розглянуто різні хвильові процеси, включаючи радіохвилі та електромагнітні імпульси, що дозволяють оцінювати геодинамічні процеси без прямого втручання. Використання технологій InSAR і GPR забезпечує виявлення змін рельєфу та структур підземних об'єктів, що актуально для досліджень історико-культурних територій. Запропоновано комбінований підхід із застосуванням вагових коефіцієнтів для об'єднання даних із різних джерел.

Третій розділ «Використання даних дистанційного зондування Землі та георадару для моніторингу земель історико-культурного призначення» присвячений застосуванню даних ДЗЗ і георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення. Цей підхід дозволяє ідентифікувати підземні структури, вертикальні зміщення та інші аномалії, важливі для збереження культурних об'єктів. Комплексний моніторинг культурних пам'яток проведено на таких локаціях, як «Львівська цитадель» і Звенигородське городище, що підтвердило його ефективність для збереження і реставрації.

Четвертий розділ «Застосування даних, отриманих з БПЛА, для побудови і аналізу цифрових моделей поверхні об'єктів історико-культурної спадщини» аналізує можливості застосування даних БПЛА для побудови цифрових моделей поверхні об'єктів культурної спадщини. Зокрема, дослідження на території заповідника "Древній Звенигород" показало, що технології аерознімання та лідарного сканування забезпечують високоточне відтворення рельєфу, сприяючи збереженню та ефективному управлінню об'єктами.

У п'ятому розділі «Розробка програмного забезпечення для напівавтоматичного визначення областей інтересу та створення загальної 3D-моделі об'єктів історико-культурної спадщини» описано розробку програмного модуля для напівавтоматичного визначення зон інтересу та створення тривимірних моделей об'єктів культурної спадщини. Модуль 3DDEM&RADAR дозволяє виділяти AOI, будувати комплексну 3D-модель і формувати охоронні зони. Тестування модуля на реальних даних підтвердило його ефективність у виділенні підземних структур

**Повнота викладення матеріалів дисертації у публікаціях.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 41 науковій праці, серед яких: 6 статей у наукових періодичних виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science; 7 статей у спеціалізованих виданнях України, які також входять до міжнародних наукометричних баз; 5 статей у фахових українських виданнях; 1 монографія; 1 стаття в інших українських виданнях; 5 публікацій у матеріалах конференцій, що включені до бази Scopus; та 16 публікацій у збірниках матеріалів конференцій.

#### **Недоліки та зауваження до змісту дисертації:**

1. У розділі 1 здобувач здійснює досить ґрунтовний та якісний аналіз застосування дистанційних та неінвазивних методів досліджень у вивченні земель історико-культурного призначення, проте цей аналіз мав би більш завершений характер, якби була запропонована інтегрована технічна модель або

алгоритм, який об'єднує різні методи дослідження в єдину систему. Це може включати створення геоінформаційної платформи, що дозволяє інтегрувати дані з картометричних, геофізичних, фотограмметричних та геодезичних методів. Автоматизація обробки даних може бути досягнута шляхом застосування методів машинного навчання та штучного інтелекту для автоматизованого опрацювання великих обсягів даних, виявлення та класифікації археологічних об'єктів. Така інтегрована технічна модель сприятиме комплексному підходу до моніторингу земель історико-культурного призначення, підвищить ефективність досліджень та створить основу для стандартизації методик у цій галузі.

2. У підрозділі 2.2 «Методи інтерферометричного визначення вертикальних зміщень за даними радіолокаційного знімання та їх аналіз», здобувач рекомендує використання інтерферометричного методу малих базових ліній (SBAS) для визначення вертикальних зміщень у ландшафтних дослідженнях, аргументуючи це меншою кількістю необхідних космічних знімків та скороченим часом обробки даних. Хоча метод SBAS дійсно є ефективним для великих територій з повільними деформаціями, він може мати обмеження щодо точності та просторової розрізненості в умовах складних деформаційних полів та урбанізованих територій. Альтернативно, метод інтерферометрії постійних розсіювачів (PS-InSAR) забезпечує високу точність вимірювань (до 2-4 мм) та стійкий до тимчасової декореляції, що є критичним для моніторингу об'єктів культурної спадщини в міських умовах. Вибір між SBAS та PS-InSAR повинен базуватися на детальному аналізі характеру деформацій, геометрії місцевості та доступності даних. Можливо, доцільно розглянути комбінований підхід, що поєднує переваги обох методів, або застосування адаптивних алгоритмів, які враховують специфіку досліджуваної території. Крім того, в розділі недостатньо розглянуто вплив атмосферних ефектів та помилок цифрових моделей рельєфу на результати інтерферометричних вимірювань. Відомо, що атмосферна неоднорідність може суттєво спотворювати фазові вимірювання, особливо на великих відстанях між супутниками та земною поверхнею. Використання методів корекції атмосферних впливів та високоточної ЦМР є необхідним для підвищення достовірності результатів. Отже, рекомендується більш глибоке дослідження умов застосування різних інтерферометричних методів та розробка комплексних стратегій, що враховують всі потенційні джерела похибок.

3. У розділі 3 «Використання даних ДЗЗ і георадару для моніторингу земель історико-культурного призначення» здобувачем детально описано використання даних дистанційного зондування Землі та георадарних досліджень для моніторингу земель історико-культурного призначення, зокрема виявлення аномалій та підземних структур. Проте недостатньо розкрито питання

використання цих даних для розроблення технічної документації із землеустрою щодо встановлення меж режимоутворюючих об'єктів. Також варто було б доповнити розділ чітким алгоритмом внесення отриманих даних до Державного земельного кадастру. Без стандартизованої процедури інтеграції даних неможливо забезпечити їхню юридичну чинність та використання у прийнятті управлінських рішень. Тому необхідно розробити детальний алгоритм, який би включав етапи обробки, перевірки, стандартизації та офіційного внесення даних до кадастру. Це сприятиме не лише підвищенню ефективності моніторингу, але й забезпечить актуальність та точність кадастрової інформації, що є критично важливим для збереження та раціонального використання земель історико-культурного призначення.

5. У розділі 4 здобувач акцентує увагу на перевагах використання лідарного знімання та аерознімання з БПЛА для створення високоточного цифрового моделювання об'єктів історико-культурної спадщини. Однак варто було б більш глибоко висвітлити питання економічної доцільності та практичних обмежень застосування цих технологій у широкомасштабному моніторингу. Зокрема, відсутній аналіз вартості проведення лідарного знімання порівняно з традиційними методами, а також обговорення доступності обладнання та необхідних ресурсів для його експлуатації. Крім того, не розглядаються потенційні проблеми, пов'язані з експлуатацією БПЛА в різних погодних умовах, густо заселених або урбанізованих територіях, де можуть існувати законодавчі або технічні обмеження, в тому числі в умовах воєнного часу. Для забезпечення ефективного та стійкого впровадження цих технологій необхідно провести комплексний аналіз їх економічної та практичної доцільності, включаючи оцінку витрат, потенційних ризиків та розробку рекомендацій щодо оптимального використання ресурсів. Також важливо розробити стандартизовані протоколи та методики обробки даних, що забезпечать їх сумісність та інтеграцію з існуючими системами управління земельними ресурсами та охорони культурної спадщини.

6. Здобувач продемонстрував глибокі знання та інноваційний підхід у розробці програмного модуля 3DDEM&RADAR, що значно спрощує процес напівавтоматичного визначення ділянок досліджень та створення загальної 3D-моделі об'єктів історико-культурної спадщини (розділ 5). Інтуїтивний інтерфейс та поетапний алгоритм дій свідчать про високий рівень опрацювання та практичну цінність розробки. Проте варто звернути увагу на вибір мови програмування Visual Basic для реалізації модуля. Незважаючи на те, що Visual Basic забезпечує сумісність з операційною системою Microsoft Windows, його обмежені можливості в обробці складних геопросторових даних та інтеграції з сучасними геоінформаційними системами можуть стати перешкодою для



подальшого розвитку програми. Використання більш сучасних мов програмування, таких як Python або C#, які мають широкий спектр бібліотек та інструментів для роботи з геоданими (наприклад, GDAL, PyProj, GeoPandas), могло б значно розширити функціональність модуля та підвищити його продуктивність. Рекомендується розглянути можливість перенесення модуля на таку платформу, що сприятиме його масштабованості та інтеграції з існуючими системами управління геопросторовими даними.

*Наведені зауваження і побажання, не є суттєвими і не зменшують позитивного враження від дисертаційної роботи, яка представляє собою цілісне і завершене наукове дослідження.*

### **Висновок про відповідність дисертації вимогам Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук**

Беручи до уваги актуальність, наукову новизну та практичну значущість одержаних результатів, їхню обґрунтованість і надійність, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Четверікова Бориса Володимировича «Методологія використання даних ДЗЗ і георадарного знімання для моніторингу земель історико-культурного призначення» є самостійним, завершеним дослідженням. У роботі успішно вирішено важливу науково-прикладну задачу, пов'язану з обґрунтуванням методологічних засад застосування даних дистанційного зондування Землі і георадарного знімання для ефективного моніторингу земель історико-культурного призначення.

На підставі викладеного, Четверіков Б.В. заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.04 – Кадастр та моніторинг земель, 05 – Технічні науки.

Офіційний опонент,  
доктор економічних наук, професор,  
член-кореспондент НААН України,  
завідувач кафедри землевпорядного проектування  
Національного університету біоресурсів  
і природокористування України



Андрій МАРТИН

