

АНОТАЦІЯ

Яковенко М. С. Технології комбінування геодезичних та інклінометричних методів моніторингу деформацій будівель і споруд. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 – «Геодезія та землеустрій» (19 – «Архітектура і будівництво»). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ. – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу з розробки та впровадження технології комбінування геодезичних та інклінометричних методів моніторингу деформацій будівель і споруд в складних інженерно-геологічних умовах. Розроблену технологію адаптовано до умов воєнного часу, що обумовлено *гострою необхідністю масових досліджень* пошкоджених будівель і споруд в рамках комплексної попередньої оцінки їх технічного стану. За даними моніторингу створено уточнених геометричних цифрових двійників, які будуть задіяні на наступному етапі для проведення чисельного моделювання напружено-деформованого стану з метою контролю технічного стану і розробки відповідних рекомендацій по відновленню.

У першому розділі проаналізовано сучасні підходи до деформаційного моніторингу, фактори деформування будівель і споруд, розглянуто вітчизняний та зарубіжний досвід організації систем моніторингу, нормативну базу в Україні та концепцію цифрового двійника. Показано, що окремі геодезичні чи геотехнічні методи не забезпечують повноцінного контролю системи «огородження котловану – ґрунтовий масив – оточуюча забудова», а тому необхідним є розроблення технології комбінування методів моніторингу з інтеграцією даних у єдине деформаційне поле. Сформульовано наукову і практичну постановку задач, обґрунтовано мету та задачі дослідження.

У другому розділі теоретично обґрунтовано інтегрований підхід до

спостережень у системі «огородження котловану – ґрунтовий масив – оточуюча забудова». Розроблено технологічну схему комбінування геодезичних та інклінометричних методів моніторингу деформацій будівель і споруд. Запропоновано та описано методики: моніторингу горизонтальних деформацій огородження котловану за допомогою прямих багаторазових лінійно-кутових засічок; моніторингу вертикальних переміщень фундаментів за даними геометричного нівелювання; контролю тріщин за допомогою контактних тріщиномірів; інклінометричного моніторингу зсувних процесів із визначенням активної площини ковзання та її еволюції в часі.

Розроблено схему єдиної просторово-часової інтеграції даних, введено матрицю кореляцій комбінованого моніторингу, обґрунтовано підхід до поєднання просторових і часових апроксимацій деформаційних процесів для прогнозування. Особливу увагу приділено методиці формування геометричної цифрової тіні та геометричного цифрового двійника як основи для подальшої цифрової трансформації систем моніторингу.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень. На експериментальному полігоні в м. Києві (2014–2019 рр.) виконано комбінований моніторинг деформацій у зоні впливу від розробки глибокого котловану на схилі Кловського яру. Встановлено, що фактичні деформації огородження (горизонтальні до 65 мм та осідання фундаментів до 39 мм) перевищили розрахункові значення, але завдяки систематичному моніторингу та коригуванню проектних рішень вдалося запобігти аварійним ситуаціям для будівель оточуючої забудови. Зафіксовано поетапний характер розвитку деформацій: спочатку – огородження котловану, далі – зсувні процеси в ґрунтовому масиві (інклінометричні свердловини), потім – осідання фундаментів і розкриття тріщин у будівлях.

Після 2022 року розроблену технологію адаптовано до умов воєнного часу для оцінки стану пошкоджених будівель, зокрема в м. Чернігів, де зафіксовано значні пошкодження монолітного залізобетонного каркасу від ракетних ударів. Запроваджено моніторинг нестабільних конструкцій, використано геодезичні

методи та цифровий геометричний двійник для аналізу деформацій і контролю небезпечних зон. Показано аналогію між деформаційними профілями вибухового впливу та деформаціями огороження котловану, що підтверджує релевантність напрацьованих раніше підходів. Розроблена методика цифрового двійника стала ефективним інструментом управління ризиками, полегшила прийняття рішень щодо консервації, підсилення або демонтажу конструкцій.

Розділ 3 демонструє еволюцію технологій від довоєнного відпрацювання технологій комбінування методів моніторингу в складних інженерно-геологічних умовах до їх адаптації для вирішення критичних задач воєнного часу. Отримані результати підтверджують універсальність і гнучкість запропонованої технології та її потенціал для міжнародного використання в системах управління ризиками в умовах техногенних і воєнних катастроф.

У додатку А наведено результати практичного та нормативного впровадження дисертаційних напрацювань. Сформульовано рекомендації й шляхи вирішення проблем, що виникають під час моніторингу деформацій у воєнних умовах. Показано використання теоретико-методичних положень дисертації під час розроблення ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 «Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд» та обґрунтовано створення стандарту організації України СОУ ДП НДІБК В.1.3-02495431-020:2025 «Особливості геодезичних досліджень при обстеженні пошкоджених будівель і споруд». Запропоновані підходи забезпечують уніфікацію геодезичних методик обстеження і моніторингу пошкоджених об'єктів та створюють практичне підґрунтя для формування сучасної національної нормативної бази й стійких систем контролю деформацій у воєнний та післявоєнний періоди.

Ключові слова: технології комбінування геодезичних та інклінометричних методів, моніторинг деформацій, геометричний цифровий двійник, будівлі та споруди, системний підхід.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у періодичних фахових журналах,

що проіндексовані у наукометричній БД SCOPUS (Q₃, Q₄):

1. Yakovenko, M., Nesterenko, O., Tytarenko, V., Bakulin, Y., Banakh, A., Vapnichna, V., Berchun, Y., Kaliukh, I. (2025). Application of geodetic methods to refine boundary conditions in digital twins of war-damaged multi-story buildings. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, 47–63. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003951>
2. Yakovenko, M., Nesterenko, O., Stelmakh, D., Babik, K., Zorin, Y., Ben, I., & Horkovchuk, I. (2026). Assessing the Technical Condition of a War-Damaged Residential Building in Ukraine Based on Integrated Geodetic and Photogrammetric Surveys. *Fachbeiträge begutachtet AVN*, (1), 3-14. <https://doi.org/10.14627/avn.2026.1.1>
3. L. Lobanov, D. Stelmakh, I. Shkurat, O. Shutkevych, V. Savitsky, R. Toldo, A. Alessi., M. Yakovenko, & I. Horkovchuk (2026). High-precision Verticality Assessment of the Kyiv TV Tower Using UAV-RTK Photogrammetry. *Fachbeiträge begutachtet AVN*, (1), 34-41. <https://doi.org/10.14627/avn.2026.1.4>

Доповіді на конференціях, матеріали яких проіндексовано

у наукометричній БД SCOPUS (Q₄):

4. Tytarenko, V., Shuminskiy, V., Dombrovskiy, Y., Sirenko, A., Yakovenko, M., & Kaliukh, I. (2020, December). An impact of dynamic loading on the slopes in the Carpathian region of Ukraine. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020»* (Vol. 2020, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205761>
5. Shokarev, V., Syvko, I., Shokarev, E., Shokarev, A., & Yakovenko, M. (2021, May). Railway retaining walls under dynamic loading in the Carpathians foothill. In *Geoinformatics* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-6). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521004>
6. Yakovenko, M., Zorin, Y., Ben, I. & Nesterenko, O. (2025, October). Dynamic impact of military actions on slopes in densely built urban areas with low stability. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»* (Vol.

2025, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. Режим доступу: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552030>

7. Yakovenko, M., Nesterenko, O., Berchun, Y. & Kaliukh, I. (2025, October). Monitoring of cracks formation in the existing dense development due to the new construction influence. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»* (Vol. 2025, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. Режим доступу: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552012>

8. Yakovenko, M., Nesterenko, O., Tytarenko, V., Kurash, S. & Kaliukh, I. (2025, October). The slope deformations monitoring in the conditions of dense urban development. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»* (Vol. 2025, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. Режим доступу: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552011>

*Статті, що входять до наукових періодичних фахових видань,
затверджених МОН України:*

9. Yakovenko, M., & Nesterenko, E. (2019). Огляд видів геодезичного моніторингу деформацій будівель і споруд в складних інженерно-геологічних умовах. *Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування*, (55), 341–350.

<https://doi.org/10.32347/2077-3455.2019.55.341-350>

10. Yakovenko, M., & Nesterenko, E. (2020). Аналіз методів геодезичного моніторингу деформацій інженерних споруд та зсувних процесів ґрунтових масивів. *Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування*, (56), 345–363.

<https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.56.345-363>

11. Ishchenko, Y., Slyusarenko, Y., Melashenko, Y., Yakovenko, M., & Ven, I. (2020). Геотехнічний моніторинг в умовах ущільненої міської забудови. *Наука та будівництво*, 25(3), 13-25.

<https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v25i3.2>

12. Яковенко, М., Нестеренко, О., Зорін, Є., & Бень, І. (2021). Моніторинг сезонного розкриття тріщин на прикладі Національного заповідника «Софія Київська». *Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування*, (61), 276–291.

<https://doi.org/10.32347/2077-3455.2021.61.276-291>

13. Яковенко, М. (2023). Щодо питань геодезичного обстеження будівель, що постраждали внаслідок воєнної агресії російської федерації. *Наука та будівництво*, 33(3-4). <https://doi.org/10.33644/10.33644/2313-6679-34-2022-4>
14. Лісений, О., Глуховський, В., Мар'єнков, М., Дубовик, С., Любченко, І., & Яковенко, М. (2023). Обстеження, оцінка технічного стану та умови відновлення житлового будинку на проспекті В. Лобановського, 6-а в м. Києві, пошкодженого внаслідок воєнних дій. *Наука та будівництво*, 33(3-4). <https://doi.org/10.33644/10.33644/2313-6679-34-2022-6>
15. Зорін, Є., Яковенко, М., & Бень, І. (2023). Геодезичний моніторинг часових змін деформованого стану під час відновлення будівлі/споруди, що постраждала від бойових дій внаслідок воєнної агресії рф // *Наука та будівництво*, № 36(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-6>
16. Яковенко, М., Мелашенко, Ю., Зорін, Є., & Бень, І. (2023). Багаторічний моніторинг деформацій будівель і споруд геодезичними методами. *Наука та будівництво*, 37(3). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-8>
17. Сергійчук, В., Яковенко, М., Нестеренко, О., Зорін, Є., & Бень, І. (2024). Геодезичне забезпечення комплексу робіт з обстеження будівель, що постраждали внаслідок військових дій на прикладі ЖК «Династія» в м. Києві. *Наука та будівництво*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-1>
18. Зеленко, Є., Яковенко, М., Зорін, Є., Нестеренко, О., & Бень, І. (2025). Граничні деформації геометричних параметрів зерносовищ (металевих силосів) та оцінка їх технічного стану на основі геодезичних обстежень. *Наука та будівництво*, 42(4). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2024-3>
19. Яковенко, М. (2025). Інклінометричні технології моніторингу зсувних процесів ґрунтових масивів. *Наука та будівництво*, 43(1). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2025-6>
20. Яковенко, М., Бень, І., & Зорін, Є. (2026). Геодезичні дослідження конструкцій фасадних систем дитячої лікарні «Охматдит», пошкодженої внаслідок ракетного удару. *Наука та будівництво*, 45(3). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2025-6>

Статті у наукових виданнях та матеріалах конференцій:

21. Яковенко М. (2019) Огляд видів геодезичного моніторингу деформацій будівель і споруд в складних інженерно-геологічних умовах. ВМС-2019 – International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2019" November 2019, Kyiv, Ukraine. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/394326647>
22. Яковенко М., (2020). Аналіз залежності сезонного розкриття тріщин в залежності від умов навколишнього середовища на прикладі Київського собору святої Софії. ВМС-2020 – International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2020", November 2020, Kyiv, с. 152-153
Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/394330315>
23. Яковенко, М. (2021). Просторова модель та розвиток деформацій в часі за результатами геодезичного моніторингу підпірної стіни. InterConf. (51) 962-972. <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/11725>
24. Яковенко, М. (2021). Геодезичний моніторинг деформацій конструкцій огороження котловану та перекриттів при розробці котловану методом «up down» // Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції III Науково-практична конференція. 2021, Київ. 55-56. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/394311243>
25. Зорін, Є., Яковенко, М. (2021). Геодезичний контроль стійкості фундаментів при будівництві та експлуатації висотної будівлі за індивідуальним проектом // Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції III Науково-практична конференція. 2021, Київ. 93-94. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/394310770>
26. Яковенко, М. (2021). Метод моніторингу змін ширини розкриття тріщин за допомогою деформометра лінійного розширення «SDM 50/500» на базі індикатора годинникового типу ИЧ-10. InterConf, (75), 303-313. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.09.2021.034>
27. Яковенко, М. (2023) Геодезичні методи контролю переміщень і деформацій при виконанні робіт з обстеження пошкоджених будівель. Всеукраїнська науково-практична конференція «Технічне обстеження

будівель і споруд із застосуванням прогресивних методів. Неруйнівний контроль у будівництві», Київ. Режим доступу:

<https://www.researchgate.net/publication/394324597>

28. Яковенко, М. (2024). Практичний досвід багаторічного моніторингу деформацій будівель і споруд інженерно-геодезичними методами // Міжнародний науково-технічний форум “Архітектура, Будівництво, Дизайн : Технологія, Енергетика, Менеджмент” 2024/10. Київ. 411-413. Режим доступу:

<https://www.researchgate.net/publication/394268215>

29. Yakovenko, M. (2025). Implementation of Digital Twins as a Method for Assessing Explosion Damage Based on Geodetic Data // International Conference “Synergy in Terra – 2025”. Режим доступу:

<https://www.researchgate.net/publication/394268342>

30. Yakovenko, M. (2025). Engineering and Geodetic Works during the Detailed Inspection of the Façade System of a Building Damaged as a Result of the Armed Aggression of the Russian Federation. BMC-2025 – International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2025" November 2025, Kyiv, Ukraine. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/398941424>

Державні будівельні норми України:

31. ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд. [Чинний від 01.04.2017]. Вид. офіц. - Київ: Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 38 с. Режим доступу:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65024

32. СОУ ДП НДІБК В.1.3-02495431-020:2025 Особливості геодезичних досліджень при обстеженні пошкоджених будівель і споруд /ДП НДІБК, 2025.

SUMMARY

Yakovenko, M. Technologies for combining geodetic and inclinometric methods for monitoring deformations of buildings and structures. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Philosophy Doctor of technical sciences in the specialty 193 – “Geodesy and Land Management”, field of knowledge 19 – “Architecture and Construction”. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2026.

In the dissertation, an urgent scientific and applied problem has been solved – the development and implementation of a technology for combining geodetic and inclinometric methods for monitoring deformations of buildings and structures under complex engineering and geological conditions. The proposed technology has been adapted to wartime conditions, driven by the urgent need for large-scale assessments of damaged buildings and structures as part of preliminary technical condition evaluations, which may also be used for estimating material losses in the future. Based on monitoring data, refined geometric digital twins of damaged structures are developed and further used for numerical modelling of their stress–strain state with the aim of controlling their technical condition and generating recommendations for restoration.

Chapter 1 analyzes modern approaches to deformation monitoring, the factors influencing structural deformation, domestic and international experience in organizing monitoring systems, the relevant Ukrainian regulatory framework, and the concept of the digital twin. It is shown that individual geodetic or geotechnical methods do not provide comprehensive control over the “excavation support – soil mass – surrounding buildings” system. Therefore, the development of a combined monitoring technology integrating data into a unified deformation field is essential. The scientific and practical problem is formulated, and the purpose and objectives of the study are substantiated.

Chapter 2 provides theoretical justification for an integrated observation

approach within the “excavation support – soil mass – surrounding development” system. A technological scheme for combining geodetic and inclinometric deformation monitoring methods is developed. The dissertation introduces and describes methodologies for: monitoring horizontal deformations of excavation support structures using repeated direct linear-angular intersections; monitoring vertical displacements of building foundations using geometric leveling; crack monitoring with contact crack gauges; and inclinometric monitoring of slope deformations with identification of the active slip plane and its temporal evolution.

A scheme of unified spatio-temporal integration of monitoring data has been developed; a correlation matrix for combined monitoring has been introduced; and an approach to combining spatial and temporal approximations of deformation processes for forecasting purposes is substantiated. Special attention is given to the methodology for constructing a geometric digital shadow and a geometric digital twin as a foundation for the future digital transformation of monitoring systems.

Chapter 3 presents the results of experimental research. At an experimental site in Kyiv (2014–2019), combined deformation monitoring was carried out in the impact zone of a deep excavation on the slope of the Klov ravine. It was established that actual deformations of the excavation support (horizontal up to 65 mm) and foundation settlements (up to 39 mm) exceeded the design values. However, systematic monitoring and timely adjustments to project decisions prevented hazardous situations for adjacent buildings. A staged deformation pattern was recorded: first, the excavation support; then, slope movements within the soil mass (inclinometer boreholes); followed by building foundation settlements and the formation of structural cracks.

After 2022, the developed technologies were adapted to wartime conditions for assessing the state of damaged buildings, particularly in the city of Chernihiv, where significant damage to the reinforced concrete frame was recorded due to missile strikes. Monitoring of unstable structural elements was introduced; geodetic methods and a geometric digital twin were used to analyze deformations and control hazardous zones. The similarity between deformation profiles caused by blast loads and those

observed in excavation support deformations demonstrated the relevance of previously developed approaches. The proposed methodology for constructing a digital twin proved to be an effective tool for risk management and for supporting decisions on conservation, strengthening, or dismantling of damaged structures.

Chapter 3 demonstrates the evolution of monitoring technologies – from pre-war development of combined monitoring techniques in complex engineering and geological conditions to their adaptation for solving critical wartime challenges. The obtained results confirm the universality and flexibility of the proposed technology and its potential for international application in risk management systems under conditions of technogenic and military catastrophes.

Appendix A presents the results of practical and normative implementation of the dissertation outcomes. Recommendations and solutions to challenges arising during deformation monitoring under wartime conditions are formulated. The application of theoretical and methodological results in the development of the national standard DSTU-N B V.1.2-17:2016 “Guidelines for scientific and technical monitoring of buildings and structures” is demonstrated, along with the substantiation for creating a new Organizational Standard SOU DP NDIBK B.1.3-02495431- 020:2025 “Specifics of geodetic investigations during the inspection of damaged buildings and structures.” The proposed approaches ensure the unification of geodetic methodologies for inspecting and monitoring damaged structures and create a practical basis for forming a modern national regulatory framework and resilient deformation control systems in wartime and post-war reconstruction periods.

Keywords: technologies for combining geodetic and inclinometric methods, deformation monitoring, geometric digital twin, buildings and structures, system approach.