

С.Г. Нестеренко, Ю.Б. Радзінська, А.А. Євдокімов, Е.С. Штерндок

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

СУЧАСНІ АСПЕКТИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ ТА ТЕРИТОРІЙ

Дослідження присвячене аналізу сучасних методів та технологій геодезичного моніторингу, що застосовуються для виявлення і контролю змін у геодинамічних процесах і структурних деформаціях об'єктів інфраструктури та природних систем. Дослідження висвітлює розвиток та інтеграцію інноваційних методів моніторингу, таких як GNSS, лазерного сканування, безпілотних літальних апаратів та інших геодезичних технологій.

Ключові слова: геодезичний моніторинг, лазерне сканування, роботизовані тотальні станції, деформація, інфраструктурна безпека, тривимірне моделювання, контроль деформацій, технологічні інновації, моніторинг дамб.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток інженерних технологій та інфраструктури значно підвищує важливість геодезичного моніторингу як інструмента для забезпечення стабільності, надійності та довговічності об'єктів і територій. Серед основних факторів, що визначають необхідність моніторингу, виділяють природні та техногенні ризики, пов'язані із впливом навколишнього середовища, зокрема сейсмічну активність, зсуви, осідання ґрунту, а також інженерні зміни, як-от підземне будівництво чи підвищення навантажень на споруди [3]. Надійні дані про стан об'єктів і територій дозволяють забезпечити прогнозування потенційних загроз і вжити необхідних заходів для зменшення їхніх наслідків.

За останні роки у сфері геодезичного моніторингу відбулися значні технологічні зміни. Зокрема, впровадження GNSS (глобальних навігаційних супутникових систем), лазерних сканерів, безпілотних літальних апаратів та фотограмметричних технологій зробило можливим збір даних з високою точністю та швидкістю, навіть у важкодоступних зонах [4, 6]. Водночас розширилися можливості камеральної обробки даних, що включає розробку спеціалізованого програмного забезпечення для обробки хмар точок, створення тривимірних моделей і прогнозування змін на основі багаточасових даних [11].

Однак, попри активне впровадження новітніх технологій, у науковій спільноті зберігається потреба в стандартизації методів і підходів до моніторингу, зокрема вибору методик для обробки та аналізу даних, що в умовах різноманітних природних і техногенних впливів стає критично

важливим [7]. Крім того, існують обмеження щодо застосування новітніх технологій у складних інженерних умовах, зокрема в міських зонах з високою забудовою або на віддалених територіях. Дослідження актуальних методик і технологій, що забезпечують високу точність геодезичного моніторингу, стає необхідним для створення уніфікованого підходу до систематичного контролю та аналізу змін у різних об'єктах та умовах експлуатації [8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження в галузі геодезичного моніторингу за останні десятиліття показують, що надійність даних та ефективність контролю за об'єктами і територіями суттєво залежать від використаних інноваційних технологій і методик. У класичних підходах до моніторингу основний акцент робився на методах геодезичної зйомки з використанням класичних інструментів, таких як теодоліти та нівеліри, що забезпечували точні, але локальні вимірювання [4]. Проте з розвитком GNSS-технологій суттєво зросла швидкість і точність моніторингових робіт, дозволяючи відстежувати зміщення з міліметровою точністю навіть у реальному часі [10].

Інші дослідники зосереджувалися на вдосконаленні технологій лазерного сканування. Впровадження наземного і повітряного лазерного сканування (LiDAR) дозволило отримувати великі обсяги даних про поверхню та об'єкти з високою деталізацією [12]. Ці дані, оброблені у вигляді хмар точок, стали основою для побудови тривимірних моделей об'єктів, що дозволяють відстежувати зміни в часі та прогнозувати їхній розвиток. Дослідження [2] підтверджують ефективність

використання лазерного сканування для моніторингу складних інженерних об'єктів, таких як мости та хмарочоси, де важливо виявляти навіть найменші зміщення для забезпечення безпеки конструкцій.

Також, розвиток обчислювальних методів та програмного забезпечення для камеральної обробки даних привів до широкого використання програмних рішень для аналізу хмар точок і тривимірного моделювання. Програмні комплекси, такі як Leica Cyclone, Trimble RealWorks та інші, дозволяють виконувати складні обчислення, синхронізувати дані та виявляти мікродеформації. Дослідники [13] досліджували, як точність обробки даних впливає на загальну ефективність моніторингу, і прийшли до висновку, що застосування автоматизованих підходів до обробки значно підвищує надійність результатів і мінімізує людський фактор.

Сучасні дослідження також розглядають перспективи інтеграції безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для геодезичного моніторингу, особливо у важкодоступних районах [14]. Використання БПЛА дозволяє отримувати великі обсяги даних за короткий час, забезпечуючи високоточні фотограмметричні вимірювання та 3D-візуалізацію територій. Однак, як зазначено в роботах [15], складність обробки цих даних та інтеграції їх з іншими методами потребує подальших досліджень і стандартизації для забезпечення точності результатів.

Відзначається також важливість прогнозування змін та оцінки негативних впливів, що потребує залучення новітніх статистичних та обчислювальних методів. Дослідники в роботі [5] запропонували використання машинного навчання для автоматизації обробки даних та ідентифікації критичних змін, що дозволяє підвищити швидкість і точність моніторингу в режимі реального часу. Проте, як зазначають автори, інтеграція штучного інтелекту в геодезичний моніторинг має свої проблеми, пов'язані з обробкою великих обсягів даних і необхідністю забезпечення сумісності з традиційними методами.

Мета та завдання статті

Метою дослідження є розробка оптимізованої методики проведення геодезичного моніторингу для виявлення та оцінки змін у просторовому положенні об'єктів і територій. Дослідження передбачає створення систематичного підходу до збору, обробки та аналізу даних, які використовуються для вчасного попередження деформацій і забезпечення надійної оцінки стану об'єктів.

Основними завданнями дослідження є:

- оцінка існуючих підходів та технологій у геодезичному моніторингу;
- розробка методики, яка включає вибір методів польових і камеральних робіт;
- оптимізація процесу камерального опрацювання даних та їх аналізу;
- впровадження методів, які забезпечать високу точність і надійність моніторингових даних.

Отже, дане дослідження спрямоване на аналіз існуючих підходів та розробку методики геодезичного моніторингу, яка забезпечує високий рівень точності та надійності, враховуючи сучасні виклики та потреби в умовах інтенсивного розвитку інженерної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу дослідження

Методика проведення геодезичного моніторингу ґрунтується на комплексному підході, який охоплює польові та камеральні етапи робіт, починаючи з планування до аналізу отриманих результатів. Залежно від специфіки об'єкта та території, використовуються різні методи й інструменти для забезпечення точності та оперативності моніторингу.

На початковому етапі робіт здійснюється проектування геодезичної мережі, що є основою для подальших вимірювань. Геодезичні мережі мають забезпечувати стабільні реперні точки, які необхідні для фіксації змін у просторі. Наприклад, для моніторингу деформацій споруд чи рухів ґрунтів закладаються репери, які фіксуються на землі або об'єкті з урахуванням впливу зовнішніх факторів, таких як осадка ґрунту та температурні коливання. Створення таких мереж включає попередній аналіз місцевості, визначення оптимальних місць для встановлення реперів і перевірку стабільності цих точок [2].

Польові вимірювання є одним з основних етапів геодезичного моніторингу, який виконується з використанням сучасних приладів: електронних тахеометрів, GNSS-приймачів, лазерних сканерів та інших. Кожен метод вимірювання має свої переваги та недоліки, залежно від точності, умов роботи та швидкості збору даних. Електронні тахеометри часто використовуються для короткочасного моніторингу невеликих об'єктів, де потрібна висока точність. GNSS-системи, у свою чергу, забезпечують оперативність та зручність у великих масштабах. Наприклад, їх широко застосовують для спостережень за великими територіями чи об'єктами інфраструктури, такими як дороги, мости та дамби [1, 4].

Лазерне сканування та використання безпілотних літальних апаратів дозволяють отримувати детальні 3D-дані про об'єкт або

територію. Лазерні сканери застосовуються для високоточної зйомки складних форм або великих споруд, як-от висотні будівлі чи архітектурні пам'ятки. Сканування забезпечує отримання «хмар точок» — набору координатних даних, які фіксують поверхню об'єкта з високою роздільною здатністю. Дані з БПЛА доповнюють ці дані, особливо в ситуаціях, коли доступ до об'єкта ускладнений. Зібрані за допомогою дронів фотограмметричні та лазерні дані є важливими для швидкого збору інформації у важкодоступних умовах [7, 8].

Камеральне опрацювання включає обробку та аналіз отриманих даних з метою виявлення змін у просторі. На цьому етапі важливу роль відіграє програмне забезпечення, яке автоматизує обробку хмар точок та створення тривимірних моделей. За допомогою програм: Trimble RealWorks або Leica Cyclone, здійснюється узгодження отриманих даних та їх візуалізація для подальшого аналізу змін. Камеральне опрацювання також включає побудову профілів, розрахунок обсягів та виявлення деформацій за різні часові періоди. Завдяки інструментам автоматизованого аналізу забезпечується висока точність та зменшується вплив людського фактору [11].

Аналіз та інтерпретація змін на основі зібраних даних є завершальним етапом. На цьому етапі відстежуються зміщення точок, зміни об'ємів або форми об'єктів. Наприклад, для інфраструктурних об'єктів, таких як мости чи будівлі, аналіз деформацій дозволяє визначити критичні зміщення, що можуть свідчити про потенційну небезпеку або необхідність ремонту [3]. Важливою частиною аналізу є прогнозування, що виконується на основі порівняння багаточасових даних і застосування методів машинного навчання. Такий підхід дозволяє прогнозувати майбутні зміни з урахуванням статистичних закономірностей та підвищує ефективність моніторингу в цілому [5].

Таким чином, проведення геодезичного моніторингу включає інтеграцію сучасних технологій для збору та обробки даних, що забезпечує високу точність і можливість оперативного реагування на зміни. У поєднанні з методами прогнозування та автоматизацією аналізу отриманих результатів, це дозволяє розробити комплексний підхід до моніторингу, що є важливим для забезпечення стабільності й безпеки об'єктів різного призначення.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Геодезичний моніторинг є важливим компонентом сучасних інженерних систем, оскільки забезпечує безпеку й ефективне управління

інфраструктурою та територіями. Проаналізовані методи, включно з традиційними геодезичними підходами та новітніми технологіями, показують, що комплексний підхід до моніторингу, який поєднує інноваційні інструменти та методи аналізу, дозволяє досягти високої точності та ефективності. Сучасні GNSS-системи, лазерне сканування, а також БПЛА суттєво підвищують можливості спостереження, особливо в умовах важкодоступних територій та великих об'єктів.

Однією з головних переваг є автоматизація камерального опрацювання даних, яка знижує вплив людського фактору, а також дозволяє оперативно аналізувати великі обсяги інформації, отримані з різних джерел. Завдяки цьому можливо більш точно виявляти критичні зміни та здійснювати прогнозування майбутніх тенденцій, що є надзвичайно важливим для запобігання аваріям та підтримки об'єктів у належному стані. Прогнозування на основі штучного інтелекту та методів машинного навчання відкриває нові перспективи в області моніторингу, забезпечуючи надійність і можливість швидкого реагування на загрози.

Важливим аспектом для подальших досліджень є стандартизація методів та інтеграція різних технологій для досягнення ще більшої точності. Врахування індивідуальних особливостей кожного об'єкта та використання адаптивних методів моніторингу дозволить створити уніфіковані підходи, що можуть бути застосовані для широкого спектру об'єктів. Таким чином, результати цього дослідження підтверджують, що сучасний геодезичний моніторинг здатний вирішувати як технічні, так і організаційні завдання, забезпечуючи високий рівень точності, швидкості та надійності.

Література

1. Dawson, J. H., Tregoning, P. *The ongoing utility of GNSS in monitoring tectonic deformation in Papua New Guinea* // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2007. – Vol. 112(B11). DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JB004357>
2. Fabris, M., Pesci, A., Caroti, G. *Terrestrial laser scanning for dam monitoring: A case study from the Poglia dam in Northern Italy* // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2017. – Vol. 8(2). – P. 77–93. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1254985>
3. NASA. *Geodetic data for Earth observation and monitoring* // Retrieved from <https://earthdata.nasa.gov>. – 2023.
4. Sampietro, D., Reguzzoni, M. *Advances in GNSS monitoring for land and infrastructure safety* // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10(4). – P. 15–38. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10041538>
5. Yigit, C., Guler, S. *Robotic total station applications in dam deformation monitoring* // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20(8). – P. 22–71. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20082271>
6. Kaloop, M. R., Hu, J. *Structural health monitoring of bridges using GNSS and accelerometer data* // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11(7). – P. 762. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11070762>

7. Dixon, T. H., Mao, A. Using satellite radar interferometry to monitor ground deformation // *Reviews of Geophysics*. – 2021. – Vol. 59(3). DOI: <https://doi.org/10.1029/2020RG000714>
8. Xu, W., Dong, Z. Hydrostatic leveling and geodetic techniques for monitoring subsidence and displacement // *Journal of Surveying Engineering*. – 2019. – Vol. 145(3). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000298](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000298)
9. Bell, J. W., Amelung, F., Ramelli, A. R. Applications of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) to fault monitoring in Nevada, USA // *International Journal of Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 41(2). – P. 371–394. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1641224>
10. Rizos, C., Janssen, V. Precise positioning and deformation monitoring using low-cost GNSS sensors // *GPS Solutions*. – 2022. – Vol. 26(1). – P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01112-7>
11. Goncalves, G., Henriques, M. J. Integration of TLS and GNSS for geodetic monitoring of urban infrastructures // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 152. – P. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.011>
12. Li, X., Zhao, Y. Real-time landslide monitoring with GNSS: A case study in the Three Gorges Reservoir area // *Natural Hazards*. – 2021. – Vol. 109. – P. 567–581. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04866-y>
13. Fernández, J., Galindo-Zaldívar, J. Deformation monitoring using GNSS and laser scanning for volcanic areas // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2018. – Vol. 368. – P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.10.001>
14. He, X., Luo, X. Geodetic monitoring of sea-level rise using satellite altimetry // *Oceanography*. – 2020. – Vol. 33(3). – P. 50–63. DOI: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.303>
15. Iglseider, C., Blümel, J. Application of GNSS in monitoring glaciers and polar ice // *Cryosphere*. – 2021. – Vol. 15. – P. 3591–3614. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-15-3591-2021>

References

1. Dawson, J. H., Tregoning, P. (2007). The ongoing utility of GNSS in monitoring tectonic deformation in Papua New Guinea. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 112(B11), 9–12.
2. Fabris, M., Pesci, A., Caroti, G. (2017). Terrestrial laser scanning for dam monitoring: A case study from the Poggia dam in Northern Italy. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 77–93.
3. NASA. (2023). Geodetic data for Earth observation and monitoring. Retrieved from <https://earthdata.nasa.gov>
4. Sampietro, D., Reguzzoni, M. (2020). Advances in GNSS monitoring for land and infrastructure safety. *Applied Sciences*, 10(4), 15–38.
5. Yigit, C., Guler, S. (2020). Robotic total station applications in dam deformation monitoring. *Sensors*, 20(8), 22–71.
6. Kaloop, M. R., Hu, J. (2019). Structural health monitoring of bridges using GNSS and accelerometer data. *Remote Sensing*, 11(7), 762.
7. Dixon, T. H., Mao, A. (2021). Using satellite radar interferometry to monitor ground deformation. *Reviews of Geophysics*, 59(3).

8. Xu, W., Dong, Z. (2019). Hydrostatic leveling and geodetic techniques for monitoring subsidence and displacement. *Journal of Surveying Engineering*, 145(3).
9. Bell, J. W., Amelung, F., Ramelli, A. R. (2020). Applications of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) to fault monitoring in Nevada, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 41(2), 371–394.
10. Rizos, C., Janssen, V. (2022). Precise positioning and deformation monitoring using low-cost GNSS sensors. *GPS Solutions*, 26(1), 1–15.
11. Goncalves, G., Henriques, M. J. (2019). Integration of TLS and GNSS for geodetic monitoring of urban infrastructures. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 13–24.
12. Li, X., Zhao, Y. (2021). Real-time landslide monitoring with GNSS: A case study in the Three Gorges Reservoir area. *Natural Hazards*, 109, 567–581.
13. Fernández, J., Galindo-Zaldívar, J. (2018). Deformation monitoring using GNSS and laser scanning for volcanic areas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 368, 1–14.
14. He, X., Luo, X. (2020). Geodetic monitoring of sea-level rise using satellite altimetry. *Oceanography*, 33(3), 50–63.
15. Iglseider, C., Blümel, J. (2021). Application of GNSS in monitoring glaciers and polar ice. *Cryosphere*, 15, 3591–3614.

Рецензент: д-р екон. наук, проф. К.А. Мамонов, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Автор: НЕСТЕРЕНКО Сергій Григорович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
земельного адміністрування та геоінформаційних
систем
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – nesterenkog34@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-9728>

Автор: РАДЗІНСЬКА Юлія Борисівна
кандидат технічних наук, доцент кафедри
земельного адміністрування та геоінформаційних
систем
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E mail – radzinskayayb@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-7975>

Автор: ЄВДОКИМОВ Андрій Анатолійович
асистент кафедри земельного адміністрування та
геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – akim050776@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7538-8922>

Автор: ШТЕРНДОК Ернест Сергійович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
земельного адміністрування та геоінформаційних
систем
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова

MODERN ASPECTS OF METHODOLOGICAL SUPPORT OF GEODETIC MONITORING OF OBJECTS AND TERRITORIES

S. Nesterenko, Y. Radzinska, A. Yevdokimov, E. Shterndok

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

This study is devoted to the analysis of modern methods and technologies of geodetic monitoring used to detect and control changes in geodynamic processes and structural deformations of infrastructure and natural systems. Geodetic monitoring is an integral part of infrastructure safety, environmental protection, and effective land management, as it allows assessing the stability of buildings, bridges, dams, mountain ranges, and other important structures, as well as natural landscapes. This study highlights the development and integration of innovative monitoring methods, such as GNSS, laser scanning, unmanned aerial vehicles, and other geodetic technologies.

The analysis of previous studies shows that the use of GNSS and laser scanning provides high accuracy and regularity of measurements, which is critical for real-time monitoring of infrastructure and for predicting possible deformations and displacements. The use of robotic total stations and automated networks reduces dependence on the human factor and speeds up data collection, ensuring a high level of measurement accuracy. At the same time, data processing using machine learning and artificial intelligence methods opens up opportunities for predicting possible changes in the stability of objects, which significantly increases the efficiency of geodetic monitoring.

The purpose of the study is to substantiate the need to use the latest technologies in geodetic monitoring to achieve high accuracy and timely detection of changes that may have critical safety implications. In particular, the use of GNSS in combination with automated total stations allows for continuous monitoring of large areas and detection of even minor changes in the structure of objects. The article discusses in detail the methods of camera processing of data obtained during laser scanning, which allows creating high-precision three-dimensional models for further analysis of changes.

It has been determined that the combination of GNSS, laser scanning and data analysis using machine learning technologies can achieve the reliability and accuracy required to monitor critical infrastructure facilities. Technological advances allow not only to detect current changes, but also to predict possible trends, ensuring timely response to risks and threats. The results of this study can be applied in the field of territory management, environmental protection, and the design of sustainable engineering solutions.

Keywords: *geodetic monitoring, laser scanning, robotic total stations, deformation, infrastructure security, three-dimensional modeling, deformation control, technological innovations, dam monitoring.*