

УДК 528.482:528.088.2

## **АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ПОХИБОК ПРИ ГЕОДЕЗИЧНОМУ МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ**

З метою виявлення нестабільних процесів в тілі Землі та на її поверхні для забезпечення безпеки об'єктів інфраструктури, природних ландшафтів і для прогнозування надзвичайних ситуацій потрібно здійснювати геодезичний моніторинг деформацій земної поверхні. Залежно від умов спостережень для моніторингу можуть використовуватися різні методи: класичне нівелювання, тахеометрія, ГНСС-знімання, лазерне сканування, інтерферометрія SAR. Ключовим параметром для визначення достовірності результатів вимірювання при проведенні геодезичних робіт є рівень точності геодезичних методів.

Мета – проаналізувати джерела похибок, що впливають на точність проведення геодезичного моніторингу деформацій земної поверхні.

Кожен геодезичний метод має свою ступінь точності. Це викликано складністю і точністю самого технологічного процесу, а також технічними характеристиками обладнання. При нівелюванні цифровими нівелірами точність може коливатися 0,3–1,0 мм/км, високоточними нівелірами – 0,3–0,5 мм/км, нівелірами середньої точності – 1,0–3,0 мм/км. Результати лінійно-кутових вимірювань залежать від точності визначення відстаней і кутів. Для відстаней до кількох кілометрів точність може досягати 1–5 см. Точність визначення координат точок за допомогою ГНСС-знімання може варіюватися в широких межах залежно від умов роботи. В умовах хорошого сигналу з використанням поправок DGPS/RTK точність може досягати 0,5–3 см, при поодинокому позиціонуванні без використання корекцій – 3–10 м. При створенні точних 3D-моделей земної поверхні методом наземного лазерного сканування досягається висока точність знімання до 1–5 мм. При мобільному лазерному скануванні та скануванні з БПЛА (LiDAR) точність погіршується до 1–10 см залежно від точності калібрування й дальності знімання.

Метод інтерферометрії SAR полягає у визначенні деформацій земної поверхні на основі аналізу інтерференції між радарними зображень супутників. Поле деформацій отримують шляхом розрахунку різниці фаз між двома радіолокаційними знімками, що дозволяє визначити зміни у висоті поверхні з точністю до міліметра. Технології InSAR відрізняються локальністю зйомки. Наприклад, у PSInSAR, SBAS, TS-InSAR, MTInSAR для спостережень обираються точки, на які встановлюються постійні розсіювачі, по яким здійснюється автоматична інтерпретація руху, точність спостережень по локальним пунктам – 1–2 мм. DInSAR надає просторову картину деформацій суцільних територій, усереднюючи значення деформацій по пікселям, при цьому точність визначення зміщень окремої точки може знизитися до 1 см.

Погіршення результатів вимірювання може бути викликано різними факторами. Метеорологічні характеристики стану атмосфери (температура, вологість, тиск, наявність опадів) можуть впливати на зниження якості вимірів, особливо для радарних систем і ГНСС, викликаючи тропосферну затримку [1]. Для компенсації гідростатичної компоненти оцінюють атмосферні умови, корегуючи дані [2]. Для обрахунку фазових зсувів при радарних зніманнях застосовують моделі тропосфери. Іоносфера Землі також спричиняє затримку супутникового сигналу, що призводить до помилок у визначенні місцезнаходження. До систематичних помилок відносять й орбітальне зміщення, зсув годинника та приймача [3]. Конфігурація супутників може збільшити помилки в ГНСС-зніманнях. В таких випадках похибки сигналу можна усунути за допомогою корекцій з наземної базової станції [4]. Неточне зчитування

координат можливе при явищі багатопроменевості, коли супутниковий сигнал відбивається від різних перешкод (будівлі, транспортні засоби, скелі тощо), перш ніж потрапити на антену ГНСС–приймача або на радіолокаційну ціль. В інтерферометрії SAR можуть виникнути шуми від зміни поверхневого шару, різного кута огляду чи об’ємного розсіювання випромінювання, з’явитися незначні відхилення через трансформаційний зсув вертикальних швидкостей точок (пікселів) при перетворенні довжини зміщення з LOS в систему координат WGS–84 [5]. В програмних продуктах для обробки радарних знімків, наприклад, SNAP, налаштований функціонал для пом’якшення атмосферних та орбітальних помилок. Основною оцінкою точності кінцевого результату InSAR є когерентність між радіолокаційними зображеннями, що є показником якості фазової інформації. Когерентність обчислюється як окрема растрова смуга та показує ступінь подібності пікселів між радарними зображеннями в межах 0–1. Після обробки інтерферометричних даних зазвичай обирають пікселі з когерентністю до 0,4. На втрату когерентності впливають часові помилки над рослинністю і водоймами, неточності метаданих орбіти, розсіювання від об’ємних структур [6]. Для уточнення результатів потрібно збільшити кількість спостережень при сприятливих умовах. Поєднання супутникових геодезичних методів з наземними можуть дати реальні уточнені результати [7].

**Висновки.** Точність геодезичних методів залежить від виду й технічних умов виконання вимірювальних робіт, обладнання та програмного забезпечення, яке використовується, наявності та якості опорної мережі, природних умов. Фактори, що викликають систематичні похибки, практично враховуються при постобробці даних. Найнебезпечнішим є людський фактор, коли помилки оператора можуть значно спотворити результати. Сучасні супутникові технології, в тому числі радіолокаційні спостереження, лазерне сканування дозволяють досягати високої точності, в той час традиційні геодезичні методи, такі як нівелювання й тахеометрія теж дають достатню точність для виконання більшості геодезичних завдань.

#### **Список літератури:**

1. Nesterenko S., Kliepko A. Geodetic monitoring of the Kaniv HPP dam using satellite radar. *International Scientific and Technical Conference of Young Professionals GeoTerrace–2022. European Association of Geoscientists & Engineers*, 2023. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590018>
2. Heresh Fattahi, Falk Amelung. InSAR uncertainty due to orbital errors. *Geophysical Journal International*, 2014. Vol. 199, Issue 1, October, 2014, P. 549–560. URL: <https://doi.org/10.1093/gji/ggu276>
3. Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland. *Remote Sensing*, 2020. 12(2):242. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12020242>
4. Савчук С., Хоптар А. Принципи створення спільних розв’язків для різних технологій супутникових спостережень. *Науковий вісник Ужгородського університету*, 2014. Вип. 3, с. 54–58.
5. Braun A., Veci L. Sentinel-1 Toolbox. *Interferometry Tutorial*. 2021. 25 s. URL: [https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial\\_v2.pdf](https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf)
6. Jianjun Z.H.U., Zhiwei L.I., Jun, H.U. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring. *Acta Geod. Cartogr. Sinica*, 2017. 46 (10), 1717–1733. URL: <https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20170350>
7. Tretyak K., Nesterenko S., Bisovetsky, Yu. Complex InSAR radar image processing, GNSS, and TPS measurements to determine the Kaniv HPP dam deformations *Applied Geomatics* (preprint), 2023. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3426456/v1>