

**Нестеренко С.В., к.т.н., доцент, докторант кафедри вищої геодезії та астрономії**  
(Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)

## СУЧАСНІ ГЕОДЕЗИЧНІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Гідротехнічні споруди України створюють загрози в регіонах можливого затоплення. Аварії на греблях призводять до людських жертв, матеріальних втрат, екологічних катастроф і погіршень [1]. Причинами таких катастроф можуть бути стихійні лиха, людські чинники, в тому числі терористичні акти [2]. На деформації техногенно-навантажених територій, в тому числі гідротехнічних споруд, впливають комплекс факторів: інженерно-геологічні умови, кліматичні впливи, конструктивні й технологічні особливості влаштування гребель, динамічні коливання через рух транспорту, особливості експлуатації об'єктів. Особливо потрібно звертати увагу на явища, що значно понижують міцність ґрунтів: підвищення вологості і замочування, морозне здимання, утворення карст тощо. Додатково потрібно проводити спостереження за термічним станом ґрунтів і рівнем підземних вод, так як експлуатація інженерної споруди може призвести до змін термічного режиму ґрунтів і характеру коливань рівня підземних вод.

В геодезії прийнято розглядати деформації, як зміну положення об'єкту відносно початкового, а зміну його форми – як похідну від функції зміщення. Оцінку стану гідротехнічної споруди виконують за величинами деформацій, які спостерігаються для точок, що зафіксовані в характерних місцях споруди. Процес деформації може бути описаний функцією зміни просторового положення точок за вибраний інтервал часу відносно прийнятого початкового положення і початку відліку часу. Результати спостережень за осіданнями і зміщеннями споруд повинні задовольняти висунутим вимогам у відношенні повноти, своєчасності і точності.

Традиційні геодезичні методи не достатньо добре пристосовані для організації таких моніторингових вимірювань на об'єктах великих розмірів. З появою супутникових систем, з автоматизацією технології безперервного геодезичного знімання стало можливим виявлення та прогнозування деформацій об'єктів і споруд [3]. При використанні супутникових методів точність визначення координат в сукупності з оперативністю отримання кінцевих результатів визначаються ступенем необхідної детальності досліджень, а також економічними можливостями організації робіт.

Розвиток дистанційних методів досліджень та ГІС доповнюють можливості спостережень за техногенно-навантаженими територіями. Супутникова радіолокація стала ефективним інструментом для відстеження стабільності гідротехнічних об'єктів. InSAR може підвищити безпеку греблі, забезпечуючи своєчасні вимірювання горизонтальних і вертикальних деформацій з високою просторовою роздільною здатністю. Застосування технології радіолокаційної інтерферометрії дозволяє оцінити досліджуваний об'єкт в динаміці, надаючи карти зміщень з можливістю дистанційного аналізу даних моніторингу.

Важливим питанням є вибір методу опрацювання радіолокаційних знімків для визначення зміщень великих інженерних об'єктів, зокрема гідротехнічних споруд [4]. Persistent Scatterer Interferometry PSInSAR підходить для визначення деформації штучних споруд й інших стійких точок, для ідентифікації пікселів використовуються persistent scatterer (PS) – наземні спеціально встановлені радіолокаційні цілі, які мають постійне високе значення відбивної здатності протягом довгого періоду; Distributed Scatterer Interferometry DS-InSAR використовує щільну наземну мережу distributed scatterer (DS) – природні радіолокаційні цілі, які мають схожу з PS радіолокаційну

сигнатуру і відбивну здатність, метод зручний для визначення деформацій в заліснених регіонах, для оцінки деформації ґрунту; Small Baseline Subset SBAS генерує векторні карти середньої швидкості деформації та часові ряди переміщень для досліджуваної області на основі техніки малих базових підмножин, використовуються точки з визначеними координатами; The Multi-temporal Satellite-based Differential Interferometry MTInSAR комбінує методи PS і DS, або методи PS і SBAS, поле деформації отримують шляхом розрахунку фази та аналізу часових рядів; Time Series Interferometric Synthetic Aperture Radar TS-InSAR виявляє повільну швидкість деформації, досліджуючи фазові зміни SAR–зображень, отримані датчиками з низькою несучою частотою. зміщення по встановленим розсіювачам веде до автоматичної інтерпретації сценаріїв деформації греблі. У методах TS-InSAR, PSInSAR, DS-InSAR, SBAS технологічно обираються точки (пікселі) з високою когерентністю та узгодженістю часових рядів на SAR зображеннях, визначається динаміка і напрям зміщень розсіювачів. Для дослідження інженерних споруд найбільші переваги має комбінований MTInSAR, в якому часовий ряд зміщення по встановленим розсіювачам веде до автоматичної інтерпретації сценаріїв деформації греблі.

Вище перелічені методи мають обмеження у використанні. Моніторинг на основі InSAR здійснюється для виявлення невеликих рухів. Якщо швидкість деформації перевищує половину довжини хвилі променя радару, то зображення будуть не когерентними. При дослідженні крутих бічних схилів можлива недооцінка величини зміщень. Проте радіолокаційна інтерферометрія пропонується для моніторингу руху гідротехнічних споруд через її високу чутливість, яка дозволяє ідентифікувати зміщення, використовуючи набори даних з часовою і просторовою роздільною здатністю. Технологію InSAR потрібно використовувати доповненням до інших геодезичних методів як ефективний метод перевірки достовірності й точності результатів визначення деформацій гідротехнічних споруд, особливо в умовах їх екстремальної експлуатації.

#### Список використаних джерел:

1. Нестеренко, С.В., Шарий, Г.І., Щепак, В.В., Ткаченко, І.В. & Тріфонова, А.С. (2023). Геоматичний моніторинг екологічних загроз на техногенно–навантажених територіях. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель: науково-виробничий журнал*. 2, С. 26–44. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2023.02.03>
2. Бондар, О.І., Михайленко, Л.Є., Ващенко, В.М. & Лапшин, Ю.С. (2014). Сучасні проблеми гідротехнічних споруд в Україні. *Вісник НАН України*. 2, С. 40-47.
3. Tretyak, K. & Palianytsia, B. (2023). Dam Spatial Temperature Deformations Model Development Based on GNSS Data. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Vol. 37 (4). DOI: <https://doi.org/10.1061/JPCFEV.CFENG-4312>
4. Aswathi, J., Binoj Kumar, R.B., Oommen, T., Bouali, E.H., Sajinkumar, K.S. (2022). InSAR as a tool for monitoring hydropower projects: A review. *Energy Geoscience*. Vol. 3 (2). pp. 160–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.12.007>