

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра Геодезії та землеустрою

Гамар Віта Олегівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.8.044.2

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА
МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ АРХІВУВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ
ДОВГОТРИВАЛОГО СУПУТНИКОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО
МОНІТОРИНГУ ІНЖЕНЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Геодезія

(назва освітньої програми)

193 «Геодезія та землеустрій»

(шифр і назва спеціальності)

В. О. Гамар

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник **Кухтар Денис Васильович, к.т.н, доцент**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

М. М. Приходько

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»

Кафедра «Геодезії та землеустрою»

Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ магістр _____

Спеціальність _____ 193 Геодезія та землеустрій _____
(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри

М.М. Приходько

«__» _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**Гамар Віті Олегівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи **«Методичні основи архівування даних для довготривалого супутникового радіолокаційного моніторингу інженерних об'єктів»**Керівник роботи Кухтар Денис Васильович, кандидат технічних наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом вищого навчального закладу від «__»__ 2025 року №

1. Термін подання студентом роботи 23.12.2025
2. Вихідні дані до роботи: 1. Радіолокаційні знімки супутника Sentinel-1. 2. Часові серії даних ГНСС-спостережень 3. Науково-технічна література, періодичні видання.
3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 1. Методи наземних та супутникових геодезичних спостережень для моніторингу стану Дністровської ГЕС.
 2. Методика забезпечення відтворюваності та масштабованості InSAR-моніторингу в довготривалих серіях спостережень
 3. Аналіз вертикальних зміщень дамби Дністровської ГЕС за даними супутникової радіолокаційної інтерферометрії.
 4. Загальні висновки
4. Перелік графічного матеріалу: часові серії вертикальних зміщень та карти швидкостей деформацій.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав		Завдання прийняв	
		Підпис	Дата	Підпис	Дата
1-3	доц. Кухтар Д. В.				

6. Дата видачі завдання 23.10.2025**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасний стан геодезичного моніторингу гідроенергетичних об'єктів	10.11.25	
2	Методичні основи архівування даних та переліку метаданих	30.11.25	
3	Створення карти вертикальних деформацій для ґрунтової та бетонної частини греблі Дністровської ГЕС методом InSAR	10.12.25	
4	Оформлення висновків по проекту та представлення роботи на кафедрі	20.12.25	

Студент _____ /Гамар В. О./
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ /доц. Кухтар Д. В./
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі «Методичні основи архівування даних для довготривалого супутникового радіолокаційного моніторингу інженерних об'єктів» представлено методичку опрацювання даних супутникової радарної інтерферометрії для моніторингу зміщень інженерних споруд.

Метою даної магістерської роботи є оцінка ефективності інтегрованого геодезичного підходу до моніторингу бетонної дамби Дністровської ГЕС шляхом поєднання даних GNSS, вимірювань роботизованих тахеометрів та супутникових радіолокаційних даних Sentinel-1, оброблених методом PSInSAR.

Наукова новизна роботи полягає в узагальненні метаданих для проведення довготривалого моніторингу дамби Дністровської ГЕС та отриманні даних для удосконалення температурної моделі деформацій бетонної частини греблі на основі даних дистанційного зондування.

Практична цінність роботи полягає в отриманні рекомендацій для покращення результатів геодезичного моніторингу греблі Дністровської ГЕС наземними та дистанційними методами моніторингу.

Ключові слова: моніторинг стану конструкцій; насипна гребля; бетонна гребля; температурна деформація; розклад вектору деформацій; валідація InSAR; PSInSAR; Sentinel-1.

ABSTRACT

The master's thesis "Methodological foundations of data archiving for long-term satellite radar monitoring of engineering facilities" presents a methodology for processing satellite radar interferometry data for monitoring displacements of engineering structures.

The purpose of this master's thesis is to assess the effectiveness of an integrated geodetic approach to monitoring the concrete dam of the Dniester HPP by combining GNSS data, measurements of robotic total stations and Sentinel-1 satellite radar data processed by the PSInSAR method.

The scientific novelty of the work lies in the generalization of metadata for long-term monitoring of the Dniester HPP dam and obtaining data for improving the temperature model of deformations of the concrete part of the dam based on remote sensing data.

The practical value of the work lies in obtaining recommendations for improving the results of geodetic monitoring of the Dniester HPP dam using ground and remote monitoring methods.

Keywords: structural health monitoring; earth-fill dam; concrete dam; temperature deformation; decomposition; InSAR validation; PSInSAR; Sentinel-1.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ВСТУП.....	8
1 Методи наземних та супутникових геодезичних спостережень для моніторингу стану гідроелектростанцій.....	9
1.1 Сучасний стан геодезичного моніторингу гідроенергетичних об'єктів.....	9
1.2 Дослідження температурних деформацій бетонних гребель.....	12
1.3 Характеристика об'єкту досліджень.....	14
1.4 Методи геодезичного моніторингу Дністровської ГЕС.....	15
Висновки до розділу 1.....	19
2 МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДТВОРЮВАНOSTІ ТА МАСШТАБОВАНOSTІ INSAR-МОНІТОРИНГУ В ДОВГОТРИВАЛИХ СЕРІЯХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ.....	21
2.1. Актуальність довготривалого супутникового радіолокаційного моніторингу інженерних об'єктів.....	21
.....	21
2.2 Вхідні дані та методи їхнього опрацювання.....	21
2.3 Методичні основи архівування даних та переліку метаданих.....	23
2.4 Формальна схема архіву InSAR-проєкту для алгоритму StaMPS.....	25
2.5 Переваги та обмеження запропонованого підходу.....	28
Висновки до розділу 2.....	29
3 АНАЛІЗ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ДАМБИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГЕС ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ.....	31
3.1 Створення карти вертикальних деформацій для ґрунтової та бетонної частини греблі Дністровської ГЕС методом InSAR.....	31
3.2 Верифікація результатів радіолокаційного моніторингу.....	33

	8
3.3 Фільтрація та оптимізація даних часових рядів.....	36
3.4 Результати визначення вертикальних зміщень бетонної частини греблі Дністровської ГЕС.....	45
Висновки до розділу 3.....	49
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....	58

ВСТУП

Надійність та безпечна експлуатація гідротехнічних споруд є одним із ключових чинників енергетичної та екологічної безпеки держави. Великі бетонні дамби, зокрема гідроелектростанцій, зазнають постійного впливу природних і техногенних факторів, серед яких зміни температури, рівня води, сонячної радіації та внутрішні напруження конструкцій. Ці чинники зумовлюють розвиток деформацій, які у разі несвоєчасного виявлення можуть призвести до зниження експлуатаційної надійності або аварійних ситуацій.

Класичні інструментальні геодезичні методи моніторингу, такі як нівелювання, GNSS-спостереження та тахеометричні вимірювання, залишаються базовими інструментами контролю стану дамб. Водночас їх дискретний характер і обмежена просторова щільність контрольних точок не завжди дозволяють своєчасно виявляти малі, але систематичні деформації, зокрема циклічні теплові переміщення. У зв'язку з цим актуальним є впровадження інтегрованих багаторівневих систем спостережень, що поєднують наземні та супутникові методи моніторингу.

Особливу роль у сучасних дослідженнях відіграють методи супутникової радіолокаційної інтерферометрії (InSAR), які забезпечують регулярне, дистанційне та високоточне вимірювання деформацій земної поверхні й інженерних споруд. Метод постійних розсіювачів (PSInSAR) дозволяє формувати довготривалі часові ряди переміщень із міліметровою точністю, що є критично важливим для аналізу повільних і циклічних деформацій бетонних конструкцій.

Метою даної магістерської роботи є оцінка ефективності інтегрованого геодезичного підходу до моніторингу бетонної дамби Дністровської ГЕС шляхом поєднання даних GNSS, вимірювань роботизованих тахеометрів та супутникових радіолокаційних даних Sentinel-1, оброблених методом

PSInSAR. У роботі використано 185 висхідних та 184 низхідних знімки Sentinel-1A за період 2019–2025 років із 12-денним циклом повторення.

Обробка радіолокаційних даних виконувалася з використанням програмного пакета StaMPS, а достовірність отриманих результатів перевірялася шляхом порівняння вертикальних переміщень, визначених за даними InSAR, з результатами GNSS-спостережень стаціонарної системи моніторингу дамби. Аналіз часових рядів дозволив виявити узгоджені сезонні закономірності та спільну довгострокову тенденцію, що свідчить про домінуючий вплив теплових процесів на деформаційну поведінку споруди. Гармонічні складові з амплітудами 4–5 мм, характерні для літнього періоду, підтверджують циклічний характер вертикальних переміщень.

Для зменшення впливу шумів та випадкових похибок у часових рядах застосовано фільтрацію на основі перетворення Фур'є та апроксимаційні методи, що забезпечили оптимальний баланс між точністю результатів і збереженням інформативності даних. Спільне використання GNSS, роботизованих тахеометрів та InSAR дозволило збільшити щільність надійних контрольних точок і суттєво покращити модель теплових деформацій дамби. Найбільші вертикальні зміщення, величиною 6-13 мм, зафіксовані на горизонтальних ділянках конструкції, найбільш схильних до впливу сонячної радіації.

Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції супутникових та наземних геодезичних методів у системи моніторингу гідротехнічних споруд і демонструють перспективність застосування PSInSAR для детального аналізу теплових деформацій бетонних дамб.

1 МЕТОДИ НАЗЕМНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1 Сучасний стан геодезичного моніторингу гідроенергетичних об'єктів

Гідроелектростанції (ГЕС) відіграють ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки, стабільності електропостачання та регулюванні водного режиму річок. Гідроенергетичні споруди, зокрема греблі та дамби, постійно перебувають у складних умовах експлуатації. Це зумовлено впливом антропогенних факторів, інтенсивних температурних коливань, сейсмічних навантажень, фільтраційних процесів та екстремальних гідрологічних режимів. Як складні інженерні споруди, ГЕС вимагають постійного моніторингу технічного стану для своєчасного виявлення можливих деформацій, осідань, зсувів та інших геодинамічних процесів, які можуть привести до аварій або зниження ефективності експлуатації. У мирний час така потреба зумовлена тривалим терміном служби споруд, впливом природних факторів та необхідністю підтримання високого рівня безпеки. Проте в умовах війни в Україні, значення моніторингу суттєво зростає: об'єкти гідроенергетики стають потенційними цілями для обстрілів та диверсій, що ставить під загрозу не лише енергосистему країни, але безпосередньо впливає на техногенну та екологічну безпеку прилеглих територій.

На сьогоднішній день Україна отримує унікальний досвід, пов'язаний з підтримкою надійності та безпечною експлуатацією цілого ряду гідроенергетичних об'єктів в умовах війни. Це стає можливим у тому числі завдяки використанню високоточних, оперативних та віддалених методів спостереження за станом гідротехнічних споруд. Зокрема, застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), таких як радіолокаційна

інтерферометрія (InSAR), GNSS-спостереження, а також традиційні геодезичні та геотехнічні вимірювання дозволяють здійснювати комплексну оцінку стабільності гідроспоруд у режимі близькому до реального часу.

Серед геодезичних методів моніторингу дамб, центральне місце посідають класичні інструментальні технології – геометричне та тригонометричне нівелювання, лінійно-кутові та GNSS-вимірювання, які дозволяють отримати високу точність визначення просторових рухів на контрольних точках конструкції [Scaioni et al., 2018; Zolfaghari, 2022]. Процес опрацювання довгих часових серій GNSS-спостережень дозволяє виконувати просторовий аналіз деформацій та візуалізувати зміни стану конструкції в часі [Agapie et al., 2021; Reguzzoni et al., 2022]. GNSS-вимірювання забезпечують надійні результати для побудови динамічних моделей деформацій гребель, що дозволяє виявляти чіткі взаємозв'язки між просторовими зміщеннями та екзогенними факторами зовнішнього середовища [Konakoglu, 2021]. Реконструкція 3D моделей гідровузла на основі зображень з БПЛА, дозволяє покращити ефективність моніторингу та інспекції греблі для складних умов експлуатації з мінливим навантаженням [Zhao et al., 2021]. Низка гідроелектростанцій розташована в сейсмічно активних зонах, де є можливість прояву помірних землетрусів. Тому потребує систематичного відстеження просторової стабільності споруди, удосконалення процедур та моделювання оцінки сейсмічних ризиків [Sevieri et al., 2021].

За таких умов класичні методи періодичних інструментальних вимірювань виявляються недостатніми для своєчасного виявлення небезпечних змін. Необхідною стає інтеграція безперервних і дистанційних геодезичних технологій: GNSS, InSAR, волоконно-оптичних сенсорів, UAV-фотограмметрії. Вони дозволяють формувати багатоканальну систему моніторингу [Bolzon et al., 2025], яка здатна враховувати впливи комплексного характеру та забезпечувати моніторинг у недоступних місцях де використання класичних методів є неможливе.

В останні десятиліття активно розвиваються дистанційні методи, зокрема супутникова радіолокаційна інтерферометрія InSAR. Опрацювання довгих часових серій SAR знімків методами PSInSAR та SBAS дають змогу здійснювати просторове згущення мережі контрольних точок у масштабі всієї споруди та прилеглої території. При цьому моніторинг гідроенергетичних об'єктів не обмежується лише двома методами радіолокаційної інтерферометрії. У статті [Aswathi et al., 2022] зроблено огляд застосування таких методів як: диференціальна радіолокаційна інтерферометрія (DInSAR), інтерферометрія за даними наземного радару (GBInSAR), Quasi-Persistent Scatterers Interferometry (QPSInSAR), багаточасова радіолокаційна інтерферометрія (MTInSAR). Метод PSInSAR достатньо точний та чутливий для визначення деформацій тіла греблі під впливом зміни рівня води у водосховищі [Wang, et al., 2023]. Застосування наземних ГНСС станцій супутникового моніторингу дозволяє верифікувати результати радіолокаційного моніторингу та підвищувати його точність у виявленні деформацій [Pang, et al., 2023]. Крім цього актуальним є необхідність інтеграції технології InSAR з наземними вимірюваннями для довгострокових програм моніторингу дамб і хвостосховищ [Rana et al., 2024]. Комплекс методів (GNSS та InSAR) забезпечує визначення швидкостей руху греблі в межах 1-4 мм/рік. Методика *Small Baseline Subset* (SBAS), реалізована на основі даних Sentinel-1, успішно застосована для дослідження деформацій дамби хвостосховища на руднику Dexing Copper Mine, який за масштабами є другим у Азії. Це підтверджує ефективність технології SBAS для вирішення прикладних завдань безпеки гідротехнічних споруд [Xie et al., 2023].

Водночас дослідження можливостей Multi-Temporal InSAR (MTInSAR) засвідчили, що цей підхід дозволяє значно розширити масив контрольних точок при моніторингу ґрунтових гребель. Завдяки цьому досягається вища деталізація та надійність результатів, що відображено у роботі [Ruiz-Armenteros et al., 2022].

Особливе значення мають мультисенсорні підходи, де поєднання даних із кількох радарних місій (ERS-1/2, Envisat, ALOS/PALSAR та Sentinel-1) забезпечило створення однієї з найдовших часових серій (1995–2019) для аналізу деформацій греблі Гувера та навколишньої території водосховища [Darvishi et al., 2021]. Така міжсупутникова інтеграція відкриває нові можливості для виявлення як довготривалих тенденцій, так і локальних аномалій у стані об'єктів.

Узагальнюючи ці результати, можна стверджувати, що методи супутникового радіолокаційного знімання, зокрема SBAS, MTInSAR та мультисенсорна інтеграція, є незамінними складовими сучасних систем моніторингу дамб і гідроенергетичних комплексів. Вони забезпечують високу точність, довготривале спостереження та широке територіальне охоплення, що робить їх ключовим інструментом у забезпеченні безпеки та надійності критичної інфраструктури.

1.2 Дослідження температурних деформацій бетонних гребель

Сучасні гідроенергетичні споруди функціонують у середовищі, яке дедалі частіше характеризується нестабільними та екстремальними умовами. Зростання частоти й інтенсивності кліматичних аномалій (сильні паводки, тривалі посухи, різкі коливання температури) створюють додаткові навантаження на греблі та дамби. У багатьох регіонах світу спостерігається значна сезонна амплітуда температур, що зумовлює термічні деформації конструкцій, появу тріщин і розвиток фільтраційних процесів у тілі споруд. Дослідження температурних деформацій бетонних гребель є важливим елементом створення динамічної моделі. При цьому важливо враховувати унікальність конструкції кожного об'єкту та природно-кліматичні умови регіону де він експлуатується. Адаптація традиційних методів визначення температурних деформацій може бути ускладнена за складних умов експлуатації споруди (високогірні райони, різка зміна температури та ін.).

Тому активно розробляються інтелектуальні методи визначення температурних деформацій греблі із застосуванням машинного навчання та нейронних мереж [Yang et al., 2024]. Особливо актуальними є дослідження деформацій на ділянках конструкції з високими градієнтами температури (наприклад в зоні водовипуску). При пропусканні великих обсягів води через греблю, низька температура води створює ефект «холодового шоку» та може впливати на утворення тріщин в бетонній конструкції [Yu et al., 2024]. У роботі [Tretyak, Serant, Bisovetskyi, 2024] розроблено та проаналізовано модель для визначення просторових деформацій Дністровської ГЕС на основі температури води та відстані від краю греблі. Отримана модель дозволяє прогнозувати та ідентифікувати сезонні просторові рухи, а у випадку виникнення деформацій, що відхиляються від моделі – сигналізує про необхідність ретельного контролю цих ділянок конструкції. Дослідження зв'язку між температурними змінами та деформаціями гідровузлів каскаду Дніпровських ГЕС та Дністровської ГЕС проводились на основі даних наземних спостережень та автоматизованих систем моніторингу (GNSS) [Tretyak and Palianytsia, 2021; 2022; 2023]. З метою отримання додаткових контрольних точок на споруді та уточнення температурної моделі, широко використовуються дані супутникового радіолокаційного знімання [Ruiz-Armenteros et al., 2021].

Поєднання наземних і дистанційних геодезичних методів формує багаторівневу систему спостережень, що дозволяє підвищити достовірність оцінки технічного стану гідроенергетичних об'єктів. Це особливо актуально в умовах кліматичних змін і зростання частоти екстремальних природних та антропогенних явищ, коли завчасне виявлення навіть незначних деформацій може запобігти розвитку аварійних ситуацій.

Актуальним питанням залишається дослідження ефективності інтегрованого підходу до спільного опрацювання даних систематичного моніторингу греблі Дністровської ГЕС методами ГНСС, лінійно-кутових

вимірювань та даними супутникового радіолокаційного моніторингу методом PSInSAR, для вивчення циклічних температурних деформацій бетонної частини греблі.

1.3 Характеристика об'єкту досліджень

Гребля Дністровської ГЕС (м. Новодністровськ, Чернівецька область, Україна) – це комбінована гідротехнічна споруда, розташована в руслі річки Дністер, однієї з основних водних артерій країни. Гребля складається з бетонної гравітаційної секції та земляних насипів, має максимальну висоту близько 60 м, довжину по гребню приблизно 750 м та ширину гребеня до 12 м (рис. 1.1). У конструкції передбачено водозливну частину, водоприймачі та машинний зал із гідроагрегатами. Водосховище має повний об'єм близько 3 км³ і площу дзеркала 142 км².

Будівництво греблі розпочалося у 1973 році, а перше заповнення водосховища та введення в експлуатацію ГЕС відбулося у 1981 році. Для зведення споруди було використано кілька мільйонів м³ бетону, кам'яних матеріалів та ґрунту. Гребля виконує комплексні функції: виробництво електроенергії, регулювання стоку, протипаводковий захист, а також забезпечення водопостачання та зрошення у нижній течії Дністра.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд споруд Дністровської ГЕС-1

Визначення просторових векторів зміщень та деформацій гідротехнічних споруд Дністровської ГЕС виконується за результатами опрацювання ГНСС та лінійно-кутових вимірювань за допомогою Стационарної системи моніторингу просторових зміщень споруд (ССМПЗС). ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 є сучасним складним програмно-апаратним комплексом до складу якого входять мультисистемні ГНСС приймачі, роботизовані електронні тахеометри, прецизійні інклінометри та телекомунікаційне обладнання. У режимі реального часу результати різноманітних взаємо контрольованих вимірів передаються на сервер мережі, для подальшого математичного опрацювання за допомогою програмних продуктів «SPIDER» і «GEOMOS» (Leica Geosystems) і визначення достовірних параметрів зміщень і деформацій бетонної гребелі. Виконавцем робіт з встановлення (ССМПЗС) була швейцарська компанія «Leica Geosystems». ССМПЗС є новітньою технологічною системою, яка для одержання достовірних результатів з максимальною точністю вимагає адаптації системи до конкретних умов розташування контрольної вимірної апаратури на гідротехнічних спорудах. У процесі експлуатації ССМПЗС проводиться регулярний контроль та аналіз роботи системи і результатів вимірів, з метою виявлення грубих та систематичних похибок пов'язаних з зовнішніми факторами (оптична рефракція, вібрації споруд тощо). На сьогоднішній день накопичено значний обсяг результатів вимірів. Постійно ведуться роботи з удосконалення моделі рефракційного поля та температурної моделі ГЕС.

1.4 Методи геодезичного моніторингу Дністровської ГЕС

Комплексний моніторинг просторових зміщень греблі Дністровської ГЕС проводиться цілодобово з наступною дискретністю вимірів: ГНСС –

шестигодинні та добові розв'язки, лінійно-кутові виміри – інтервал 6 годин, InSAR – інтервал 12 днів.

ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 включає 54 пункти, які розміщені на греблі та основних будівлях (рис. 1.2). Координати пунктів MP1-MP6, WP1-WP4, ACP1, ACP2, DSR1 та DSR2 (14 пунктів) визначаються на основі супутникових та лінійно-кутових вимірювань. Вони оснащені ГНСС-приймачами та відбивачами 360° (рис. 1.3). Пункти DSR1 та DSR2 додатково оснащені електронними роботизованими тахеометрами для проведення лінійно-кутових вимірювань.

Координати пунктів CP01-CP40 (40 пунктів) визначаються лише на основі лінійно-кутових вимірювань. Пункти CP01-CP40 оснащені круглими відбивачами. Розміщення 38 круглих відбивачів на споруді греблі наведено на (рис 1.4).



Рисунок 1.2 – Схема мережі геодезичних пунктів ССМПЗС Дністровської ГЕС-1

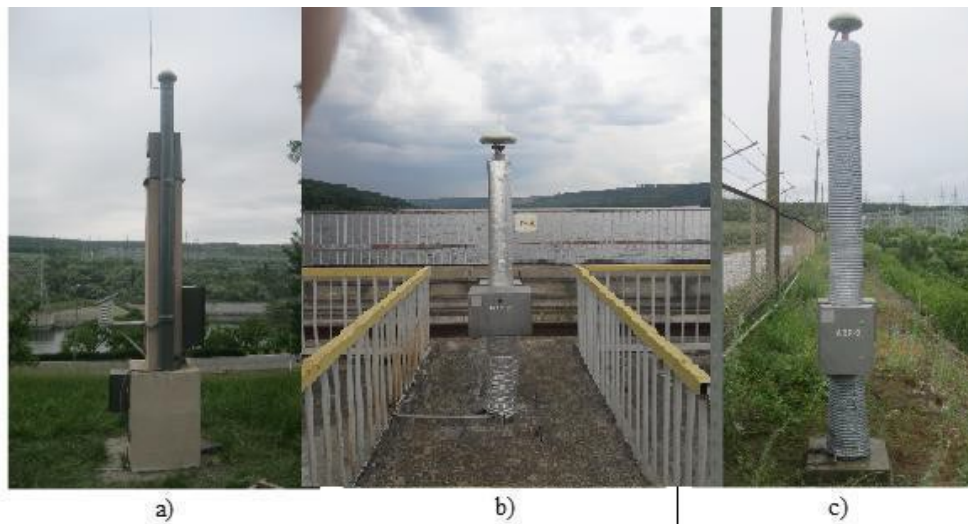


Рисунок 1.3 – Загальний вид базових точок DSR1 і DSR2 (а), пунктів на бетонній греблі МР1-МР6 (b), пунктів на ґрунтовій греблі АСП1 і АСП2(с)



Рисунок 1.4 – а: Просторове розміщення пунктів СР01-СР18 координати яких визначаються лінійно-кутовими методами (вид із пункту DSR1); б: Просторове розміщення пунктів СР19-СР38 координати яких визначаються лінійно-кутовими методами (вид із пункту DSR2)

Сучасні методи інтерферометрії з використанням даних радарів із синтезованою апертурою (SAR) дозволяють з високою точністю відслідковувати деформації земної поверхні та техногенно навантажених територій. Серед них особливе місце посідають мультичасова інтерферометрія (MT-InSAR), зокрема метод постійних розсіювачів (PSI), які довели свою ефективність у задачах довготривалого моніторингу гідроенергетичних об'єктів [Zhou et al., 2020; Aswathi et al., 2022; Ziemer et al., 2025].

MT-InSAR – це узагальнене поняття, яке охоплює низку інтерферометричних технік, що використовують часові серії SAR-знімків, отриманих у різні моменти часу. Основною метою є виявлення деформацій поверхні з високою точністю шляхом пригнічення атмосферних впливів та зниження похибок, пов'язаних з орбітальними похибками чи декореляцією сигналу.

MT-InSAR передбачає генерацію численних інтерферограм досліджуваної території, що дає змогу реконструювати часову еволюцію зміщень. Цей підхід особливо ефективний в інфраструктурно насичених зонах, де можна простежити як локальні, так і регіональні деформації, включаючи осідання ґрунтів, деформації тунелів, дамб, мостів та інших об'єктів критичної інфраструктури.

PSI – одна із найточніших реалізацій MT-InSAR, яка базується на виявленні та аналізі постійних розсіювачів (persistent scatterers, PS) – точок на поверхні, що демонструють високу когерентність протягом усього періоду спостережень.

Однією з особливостей радарної інтерферометрії є те, що вимірювання зміщень здійснюється уздовж лінії візування радара (Line of Sight, LOS), тобто в напрямку від супутника до спостережуваної точки на земній поверхні. Оскільки радарні системи SAR працюють у режимі бокового огляду, кут візування до поверхні зазвичай становить від 25° до 45° щодо вертикалі. Це

означає, що SAR є найбільш чутливим до вертикальних та східно-західних компонент зміщення, тоді як північно-південні рухи залишаються слабо детектованими або повністю невизначеними.

У результаті, одноканальний супутниковий вимір забезпечує лише проекцію деформації на напрямок LOS. Це створює певне обмеження в інтерпретації деформацій, оскільки не дозволяє безпосередньо відрізнити вертикальні і горизонтальні складові зміщення.

Для подолання цього обмеження у практиці моніторингу інженерних об'єктів широко застосовується підхід, що ґрунтується на декомпозиції даних з висхідних і низхідних орбіт SAR-супутника (Multi-geometry) [Calò et al., 2024]. Ці орбіти мають протилежний напрямок руху платформи (приблизно з південного заходу на північний схід для висхідної і навпаки для низхідної) та дещо різні кути візування. Комбінування даних з обох орбіт дозволяє розкласти виміряні LOS-деформації на дві основні компоненти – вертикальну (Up) та горизонтальну у східно-західному напрямку (East-West).

Такий векторний розклад є вкрай важливим для інженерного аналізу, оскільки вертикальні осідання, підняття або горизонтальні зсуви можуть мати різну природу та різний ступінь ризику для об'єктів інфраструктури. Окрім того, для повноцінної тривимірної реконструкції векторів зміщень (включаючи північно-південну складову) необхідне залучення додаткових джерел інформації, таких як спостереження з інших супутників із різною геометрією зйомки, або незалежних наземних вимірювань, зокрема GNSS-даних, які дають змогу верифікувати та доповнити результати InSAR [Zhou et al., 2024].

Висновки до розділу 1

У першому розділі роботи виконано комплексний аналіз сучасних методів наземних і супутникових геодезичних спостережень, що застосовуються для моніторингу технічного стану гідроелектростанцій як об'єктів критичної інфраструктури. Показано, що гідроенергетичні споруди функціонують у складних природно-техногенних умовах, які зумовлюють необхідність безперервного та високоточного контролю їх просторової стабільності. В умовах кліматичних змін і воєнних загроз значення таких досліджень істотно зростає, оскільки своєчасне виявлення деформацій є ключовим чинником запобігання аварійним ситуаціям та зниження техногенних ризиків.

Проаналізовано сучасний стан геодезичного моніторингу гідроенергетичних об'єктів і встановлено, що класичні інструментальні методи (нівелювання, лінійно-кутові вимірювання, GNSS) залишаються базовими засобами визначення просторових зміщень з високою точністю. Водночас доведено, що їх періодичний характер та обмежена просторово-територіальна репрезентативність не завжди забезпечують своєчасне виявлення повільних або локалізованих деформацій, особливо на великих або важкодоступних ділянках споруд.

Показано, що інтеграція наземних методів із дистанційними технологіями, зокрема супутниковою радіолокаційною інтерферометрією InSAR, є ефективним шляхом підвищення надійності систем моніторингу. Методи MT-InSAR, PSInSAR та SBAS дозволяють формувати густі просторові мережі контрольних точок і здійснювати довготривале спостереження за деформаціями як безпосередньо тіла греблі, так і прилеглих територій. Особливої уваги надано мультисенсорним і мультигеометричним підходам, які забезпечують підвищення точності та можливість векторного аналізу зміщень.

У підрозділі, присвяченому температурним деформаціям бетонних гребель, обґрунтовано важливість урахування термічних чинників як одного з визначальних механізмів циклічних просторових рухів. Показано, що

поєднання даних наземних систем моніторингу з супутниковими InSAR-спостереженнями дозволяє не лише фіксувати сезонні деформації, але й формувати прогностичні моделі, здатні ідентифікувати аномальні відхилення від нормального режиму роботи споруди.

2 МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДТВОРЮВАНОСТІ ТА МАСШТАБОВАНОСТІ INSAR-МОНІТОРИНГУ В ДОВГОТРИВАЛИХ СЕРІЯХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

2.1. Актуальність довготривалого супутникового радіолокаційного моніторингу інженерних об'єктів

Супутниковий радіолокаційний моніторинг інженерних об'єктів із використанням методів інтерферометрії (InSAR) набув широкого застосування завдяки можливості дистанційного вимірювання деформацій земної поверхні з міліметровою точністю. Особливе значення мають довготривалі часові серії, які дозволяють аналізувати повільні деформаційні процеси, оцінювати стабільність інженерних споруд та прогнозувати потенційні ризики.

Сузір'я супутників Sentinel-1 забезпечує систематичне накопичення SAR-даних, що створює передумови для формування багаторічних архівів радіолокаційних знімків. Проте на практиці виникає проблема повторного використання вже оброблених InSAR-проектів, зокрема при необхідності оновлення часових серій за рахунок нових знімків. Відсутність стандартизованого підходу до архівування результатів обробки та супровідних метаданих ускладнює масштабування таких досліджень.

Метою цієї роботи є розробка методичних основ архівування даних для довготривалого супутникового радіолокаційного моніторингу інженерних об'єктів із використанням методу StaMPS на основі SAR-знімків Sentinel-1.

2.2 Вхідні дані та методи їхнього опрацювання

Для моніторингу деформацій інженерного об'єкта використано архівні радіолокаційні знімки супутника Sentinel-1A з 12-денним інтервалом між зніманнями за період 2019-2025 років. Дані отримано в інтерферометричному режимі зйомки (IW) із фіксованою геометрією спостережень, що є критично

важливим для формування стабільної часової серії. Територія дослідження визначена координатами об'єкта та охоплює зону, достатню для аналізу як власне інженерної споруди, так і навколишнього деформаційного поля.

Для обробки SAR-даних застосовано метод Persistent Scatterer Interferometry, реалізований у програмному пакеті StaMPS. Метод базується на аналізі стабільних відбивачів (постійних розсіювачів), що зберігають високу когерентність упродовж усього періоду спостережень.

У результаті обробки формується набір інтерферограм та допоміжних даних, які зберігаються у відповідних каталогах проєкту StaMPS, зокрема: `rslc` – комплексні зображення, приведені до єдиної геометрії; `diff0` – диференціальні інтерферограми, підготовлені для подальшого аналізу.

Дані в папці `rslc` є важливими для амплітудного аналізу та вибору кандидатів на постійні розсіювачі (PS) у методі інтерферометрії постійних розсіювачів (PSI) StaMPS. Основні типи файлів у цій папці: файли `.rslc`: містять комплексні дані радарних зображень (Single Look Complex) для кожної дати зйомки, які були передискретизовані (resampled) відповідно до головного зображення (master image); файли `.rslc.par`: текстові файли параметрів, що містять метадані для відповідних `.rslc` файлів (геометрія зйомки, часові характеристики тощо).

Папка `diff0` у структурі StaMPS містить результати розрахунку диференціальних інтерферограм, з яких видалено топографічну фазу. Це ключовий компонент для подальшого аналізу зміщень земної поверхні. Основні дані, що містяться в папці `diff0`: файли `.diff` - це самі диференціальні інтерферограми. Вони представляють різницю фаз між головним (master) та другорядним (slave) знімками, де внесок рельєфу вже скомпенсований за допомогою цифрової моделі рельєфу (DEM); файли `.diff.par` - текстові файли з параметрами для кожної інтерферограми (метадані про базові лінії, часові інтервали тощо); файли `.int` – тут також

можуть зберігатися вихідні (flattened) інтерферограми перед остаточною корекцією.

При розширенні періоду спостережень за рахунок оновлення переліку зображень, виникає необхідність інтеграції нових SAR-знімків у вже існуючий InSAR-проект. Без попереднього архівування та збереження метаданих це може призвести до:

- необхідності відновлення проекту та опрацювання повного періоду спостережень;
- помилок при виборі даних для декомпозиції (азимут знімка та кут падіння променя);
- несумісності нових інтерферограм із попередніми результатами.

Таким чином, архівування повинно охоплювати не лише файли обробки, але й повний набір описових параметрів проекту.

2.3 Методичні основи архівування даних та переліку метаданих

Запропонований підхід ґрунтується на формуванні об'єктно-орієнтованого архіву, в межах якого кожен інженерний об'єкт супроводжується стандартизованим набором метаданих. Ці метадані допомагають в швидкому підборі необхідних радіолокаційних знімків для оновлення часового ряду даних.

Обов'язкові описові параметри проекту:

- тип SAR-знімків (SLC);
- платформа (Sentinel-1A/B/C);
- координати території дослідження;
- номер підсмуги (sub-swath);
- період спостережень;
- параметри орбіти (path/frame);

- кількість використаних знімків;
- обсяг архіву даних;
- дата master-знімка;
- кут падіння радіолокаційного променя;
- дирекційний кут антени супутника;
- кількість файлів у каталогах diff0 та rslc.

Для забезпечення довготривалого використання результатів InSAR-моніторингу запропоновано стандартизований набір метаданих архіву проєкту. Таблиця 2.1 узагальнює ключові параметри, що описують геометрію зйомки, часові характеристики, структуру даних та результати інтерферометричної обробки методом StaMPS окремо для висхідної та низхідної орбіт супутника. Наявність зазначених метаданих забезпечує відтворюваність обробки, коректне розширення часових серій за рахунок нових SAR-знімків та сумісність результатів у багаторічних InSAR-дослідженнях інженерних об'єктів.

Таблиця 2.1 – Метадані архіву InSAR-проєкту для довготривалого моніторингу

№	Параметри метаданих	Позначення	Опис	Значення (приклад)
Пошук знімків				
1	Тип SAR-знімків	Product type	Тип радіолокаційних даних, використаних у проєкті	Sentinel-1 SLC
2	Платформа	Satellite	Супутникова платформа (SA/SB/SC)	S1A
3	Режим зйомки	Acquisition mode	Режим радіолокаційного знімання (IW/EW/Stripmap/WV)	IW
4	Підсмуга	Sub-swath	Номер підсмуги в режимі IW (IW1/IW2/IW3)	IW2
5	Поляризація	Polarization	Обрана поляризація сигналу (VV/HH/ VV+VH..)	VV
6	Орбіта	Orbit direction	Напрямок орбіти супутника (Ascending / Descending)	Ascending
7	Номер траси	Path	Номер орбітальної траси	116
8	Кадр	Frame	Номер кадру в межах траси	154
9	Період	Observation	Часовий інтервал SAR-	2019.04.26-

	спостережень	period	спостережень	2025.06.29
10	Інтервал повторення	Revisit time	Час між послідовними зніманнями (діб)	12
11	Кількість знімків	Number of scenes	Кількість SAR знімків для одного напрямку орбіти (шт.)	186
12	Обсяг архіву	Archive size	Обсяг архіву SLC знімків (ГБ)	859
Параметри опрацювання				
13	Дата оновлення архіву	Archive update	Остання дата модифікації архіву	2025-12-15
14	Метод опрацювання	InSAR method	Використаний InSAR-алгоритм	StaMPS (PSI)
15	Координати території дослідження	AOI	Географічні межі досліджуваної ділянки (WGS84)	LON min=32.48 LAT min=49.45 LON max=32.75 LAT max=49.68
16	Основний знімок	Master date	Дата master-знімка (уууу-мм-дд)	2022-06-09
17	Кількість файлів у папці rslc	N(rslc)	Кількість файлів (шт.) $rslc = (N_{slaves} + master) * 2$	372
18	Кількість файлів у папці diff0	N(diff0)	Кількість файлів (шт.) $diff0 = N_{slaves} * 3$	555
19	Примітки	Notes	Додаткова інформація щодо архіву	Готовий до оновлення
Декомпозиція вектору деформацій				
20	Експортування часових серій	asc.csv/ dsc.csv	Координати центру (B;L) та радіус території (R)	B=49.555369 L=32.557519 R=4000 м
21	Кут падіння променя	Incidence angle	Середній кут падіння радіолокаційного променя (градуси)	34.58°
22	Дирекційний кут напрямку антени	Centre Heading	Азимутальний напрямок руху супутника+90°	79.98°
23	Максимальна відстань між постійними розсіювачами	Distance upper bound	Віддаль між постійними розсіювачами, що в процесі декомпозиції визначаються як єдина точка	0.0002°≈22 м

Зазначені параметри забезпечують повну відтворюваність InSAR-обробки та можливість коректного додавання нових сцен. По суті, об'єктно-орієнтований підхід перетворює архів з пасивного сховища на активну систему керування інформацією, яка розуміє сутність об'єктів, а не лише їхні байти.

2.4 Формальна схема архіву InSAR-проєкту для алгоритму StaMPS

Архівування даних InSAR-проєкту, сформованого з використанням програмного пакета StaMPS, повинно забезпечувати можливість повної відтворюваності обробки та розширення часової серії без повторного формування базового набору інтерферограм. З цією метою архів розглядається як структурований об'єктно-орієнтований інформаційний контейнер, який поєднує первинні та похідні SAR-дані з описовими метаданими (табл. 2.1).

Основною одиницею архіву є інженерний об'єкт моніторингу, для якого зберігається повний набір файлів StaMPS та супровідної інформації, необхідної для інтеграції нових SAR-знімків у часову серію. Формальна структура архіву StaMPS може бути подана у вигляді ієрархічної схеми каталогів (рис. 2.1):

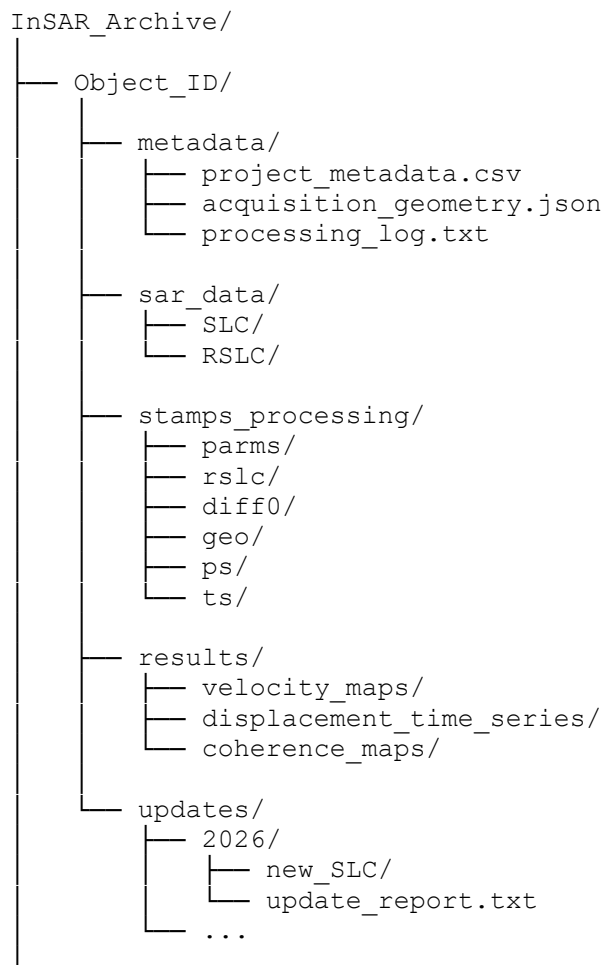


Рисунок 2.1 – Ієрархічна структура архіву

Каталог `metadata/` містить формалізований опис параметрів InSAR-проєкту, включно з характеристиками зйомки, просторовими межами дослідження та інформацією про master-знімок. Збереження метаданих у форматі (CSV, JSON) дозволяє автоматизувати перевірку сумісності нових SAR-сцен.

Каталог `sar_data/` призначений для збереження первинних та попередньо опрацьованих SAR-даних. Зокрема, каталог `rslc/` містить комплексні зображення, приведені до єдиної геометрії, які є базовими для формування диференціальних інтерферограм.

Каталог `stamps_processing/` відображає стандартну структуру робочого середовища StaMPS. Ключовими елементами є:

- `rslc/` - комплексні вирівняні зображення;
- `diff0/` - набір диференціальних інтерферограм;
- `parms/` - параметри обробки;
- `ps/` та `ts/` - результати аналізу постійних відбивачів і часових серій.

Каталог `results/` містить узагальнені результати InSAR-аналізу, зокрема карти швидкостей деформацій та часові ряди зміщень, які можуть використовуватися незалежно від середовища StaMPS.

Каталог `updates/` забезпечує логічне відокремлення нових даних, отриманих при розширенні періоду спостережень, що дозволяє зберігати історію оновлень архіву.

З формальної точки зору архів InSAR-проєкту може бути описаний як кортеж:

$$A = \{O, M, D, P, R, U\} \quad A = \{O, M, D, P, R, U\} \quad A = \{O, M, D, P, R, U\}$$

де:

- `OOO` - ідентифікатор інженерного об'єкта;
- `MMM` - множина метаданих (геометрія зйомки, часові параметри, орбіта);

- DDD - набір SAR-даних (SLC, RSLC, diff0);
- PPP - параметри обробки StaMPS;
- RRR - результати InSAR-аналізу;
- UUU - дані оновлень архіву.

Така модель дозволяє формалізувати процедуру доповнення архіву без порушення цілісності попередніх результатів.

2.5 Переваги та обмеження запропонованого підходу

Запропонований підхід до архівування даних довготривалого супутникового радіолокаційного моніторингу інженерних об'єктів забезпечує низку принципів переваг у порівнянні з неструктурованим зберіганням результатів InSAR-обробки.

1. Стандартизація метаданих дозволяє зберігати не лише результати інтерферометричного аналізу, але й повний опис геометрії зйомки та параметрів обробки, що є критично важливим для відтворюваності результатів. Це особливо актуально для багаторічних проєктів, у межах яких зміна виконавців або програмного середовища може унеможливити повторне використання даних.

2. Об'єктно-орієнтована структура архіву забезпечує логічне розділення даних за інженерними об'єктами моніторингу, що спрощує масштабування досліджень та інтеграцію кількох незалежних InSAR-проєктів у єдину систему спостережень.

3. Збереження робочої структури StaMPS (каталоги *rslc*, *diff0*, *parms*) дозволяє виконувати доопрацювання та розширення часових серій без повторного формування повного набору інтерферограм, що суттєво знижує обчислювальні та часові затрати.

Попри очевидні переваги, запропонований підхід має низку обмежень, які необхідно враховувати при практичній реалізації.

1. Архівування великих масивів SAR-даних, зокрема комплексних зображень RSLC та диференціальних інтерферограм, вимагає значних обсягів

дискового простору. Для багаторічних проєктів із високою щільністю зйомок це може стати критичним фактором, особливо в умовах обмежених ресурсів зберігання.

2. Підхід орієнтований на стабільність параметрів зйомки. Зміна режиму зйомки, підсмуги або орбітальної конфігурації може ускладнити або унеможливити безшовне розширення часової серії в межах одного архіву.

3. Використання програмного пакета StaMPS передбачає певний рівень експертних знань, а помилки на етапі первинного формування архіву можуть поширюватися на всі подальші оновлення часової серії.

Подальший розвиток запропонованого підходу пов'язаний із впровадженням засобів автоматизації процесів архівування та оновлення InSAR-проєктів.

Одним із перспективних напрямів є автоматичне формування та оновлення метаданих архіву на основі супровідної інформації SAR-знімків (SAFE-метадані Sentinel-1). Це дозволить мінімізувати ручне введення параметрів і знизити ризик помилок.

Іншим важливим напрямом є інтеграція архіву StaMPS із хмарними платформами обробки супутникових даних та автоматизованими сервісами завантаження нових SAR-сцен. Такий підхід відкриває можливості для напівавтоматичного або повністю автоматичного розширення часових серій у режимі, близькому до оперативного моніторингу.

Перспективним також є використання контейнеризованих середовищ обробки (Docker, Singularity), що забезпечує стабільність програмного оточення та підвищує відтворюваність результатів InSAR-аналізу в довготривалій перспективі.

Висновки до розділу 2

Запропоновані методичні основи архівування InSAR-даних забезпечують ефективне довготривале використання SAR-знімків Sentinel-1

для моніторингу інженерних об'єктів. Стандартизація структури архіву та супровідних метаданих є ключовою умовою для розширення часових серій і підвищення надійності інтерпретації деформаційних процесів.

Замість простого зберігання файлів, об'єктно-орієнтована структура архіву дозволяє створювати складніші системи управління, де можна:

- Відстежувати зв'язки між об'єктами (наприклад, версії одного документа, пов'язані файли, історія змін).
- Моделювати реальні сутності (користувач, проєкт, товар) як об'єкти з їхніми атрибутами та функціями, що полегшує пошук та управління.
- Створювати динамічні класи для різних типів архівних матеріалів, забезпечуючи їхню логічну структуру та поведінку.

Запропонована формальна схема архіву StaMPS забезпечує:

- довготривале зберігання InSAR-даних;
- можливість відтворення результатів через тривалий час;
- ефективне масштабування InSAR-моніторингу інженерних об'єктів.

Розширення часової серії InSAR-моніторингу реалізується шляхом додавання нових SAR-знімків до каталогу updates/ з подальшою перевіркою їх сумісності за такими критеріями:

- ідентичність режиму зйомки та підсмуги;
- стабільність орбітальних параметрів;
- збереження опорного master-знімка;
- відповідність геометрії зйомки архівним даним.

Дотримання цих принципів дозволяє інтегрувати нові сцени Sentinel-1 у вже існуючий StaMPS-проєкт без необхідності повторної повної обробки даних за попередній період.

3 АНАЛІЗ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ДАМБИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГЕС ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Мульти-геометричний підхід опрацювання радіолокаційних даних супутника Sentinel-1 був використаний для дослідження просторових рухів Дністровської ГЕС. Для моніторингу і досліджень такої інженерної споруди важливо виконати декомпозицію вектору деформацій, оскільки тут присутні як вертикальні так і горизонтальні зміщення.

3.1 Створення карти вертикальних деформацій для ґрунтової та бетонної частини греблі Дністровської ГЕС методом InSAR

Вхідними даними для проведення досліджень були 185 радіолокаційних знімків, отриманих супутником Sentinel-1A з висхідної орбіти, та 184 знімки, отримані з низхідної орбіти. Часова серія охопила період з 01 січня 2019 р. до 05 лютого 2025 р. Інтервал часу між зніманнями – 12 днів. Радіолокаційні знімки отримано в режимі IW (Interferometric Wide) з просторовим розрізненням 5×14 м/піксель. Знімки завантажено з архіву Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/>). Опрацювання даних супутникового радіолокаційного знімання методом постійних розсіювачів (PSI) виконувалось окремо для висхідної та низхідної орбіт. Реалізація методу виконана за алгоритмом StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) в програмі MatLab.

За результатами опрацювання двох наборів радіолокаційних знімків (для висхідної та низхідної орбіт) методом PSI, отримано часові серії деформацій уздовж лінії візування супутника для точок, що визначені як постійні розсіювачі.

Для отримання вертикальної компоненти деформацій, виконано сумісне опрацювання двох наборів даних за допомогою розробленого скрипта на мові програмування Python. Вхідними даними для проведення декомпозиції вектору деформацій були часові серії переміщень постійних розсіювачів для двох орбіт, азимуту орбіт супутника та кути падіння променя. У результаті сформовано карту вертикальних швидкостей деформацій для спільних точок (постійних розсіювачів), отриманих з висхідної та низхідної орбіт (рис. 3.1).

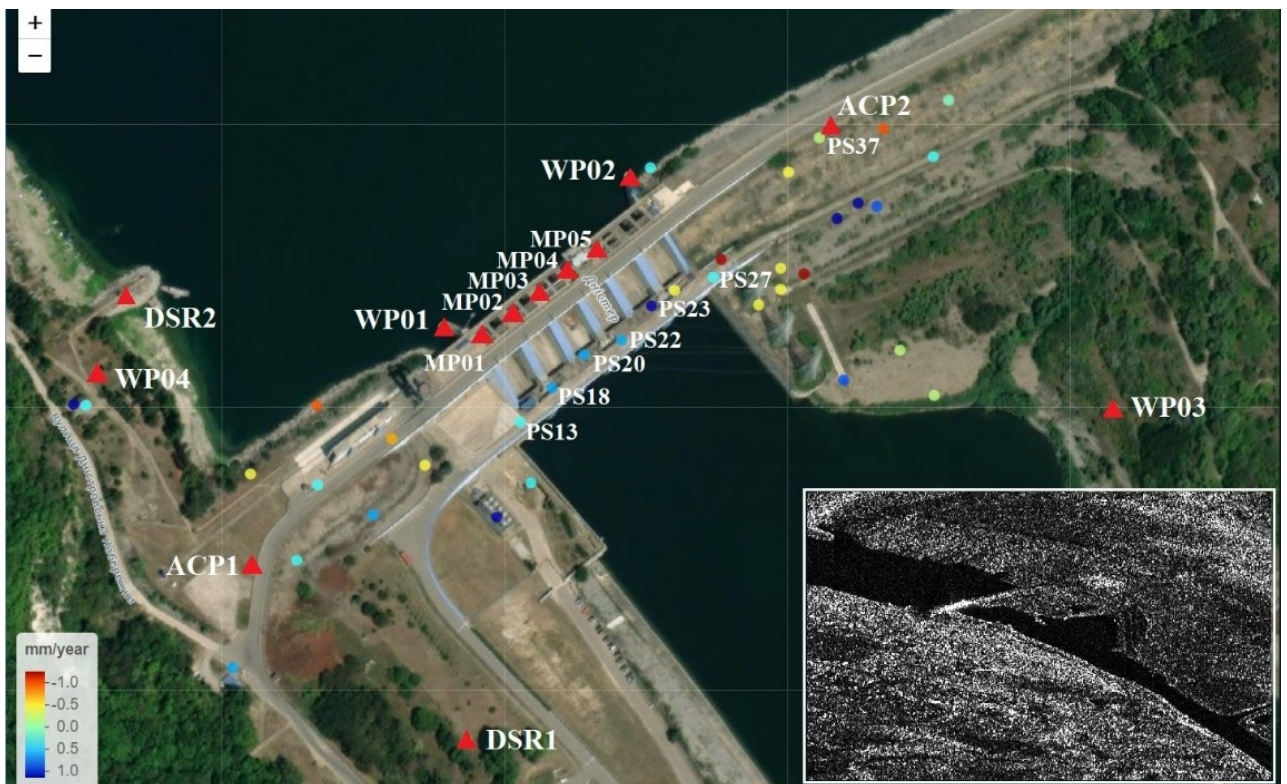


Рисунок 3.1 – Карта вертикальних швидкостей деформацій греблі Дністровської ГЕС за період 2019-2025, отримана методом InSAR. Карта показує взаємне розташування пунктів ГНСС-мережі () та постійних розсіювачів InSAR (кольорові круги). Часові серії позначених постійних розсіювачів (PS13-PS37) взято для порівняння за часовими серіями ГНСС-вимірювань

3.2 Верифікація результатів радіолокаційного моніторингу

З метою підтвердження достовірності результатів супутникового радіолокаційного моніторингу, виконано порівняння отриманих даних з результатами ГНСС-вимірювань на пунктах ССМПЗС, що розташовані на греблі. Серед усіх отриманих постійних розсіювачів на карті швидкостей (рис. 3.1), положення лише одного з них співпадає з положенням ГНСС-станції. Розташування пункту АСР2 ГНСС-мережі поряд з точкою PS37 на карті швидкостей (рис. 3.1) дає змогу провести порівняння та верифікацію результатів радіолокаційної інтерферометрії.

Інтеграція радіолокаційної інтерферометрії до комплексу геодезичних спостережень на даному об'єкті та інших гідроенергетичних спорудах потребує більшої кількості точок зі спільними результатами наземних та дистанційних спостережень. Для комплексу InSAR та ГНСС методів це може бути забезпечене шляхом встановлення наземних кутових відбивачів для радіолокаційного моніторингу на пунктах ГНСС-мережі [Tretyak et al., 2023]. Таким чином, у результаті опрацювання радіолокаційних знімків, пункти ГНСС-мережі будуть відображатися на карті швидкостей деформацій як постійні розсіювачі. Це в свою чергу забезпечить можливість валідації результатів InSAR.

На рис. 3.2 представлено порівняння часової серій зміни висоти пункту АСР2 за даними ГНСС-вимірів та розміщеної поряд точки PS37 радіолокаційної інтерферометрії за період 2019-2025 рр.

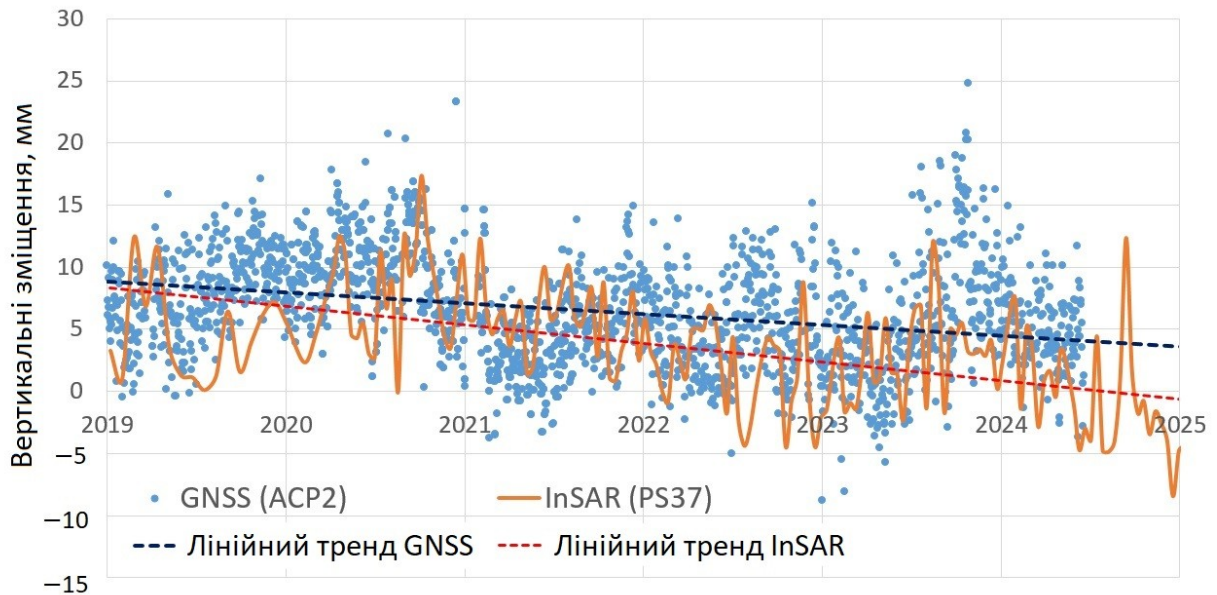


Рисунок 3.2 – Часові ряди вертикальних зміщень на насипній дамбі на основі радіолокаційного моніторингу та ГНСС-вимірювань

Часові серії вертикальних зміщень за GNSS та InSAR (рис. 3.2) демонструють добру узгодженість за фазою сезонних коливань і спільний довготерміновий тренд. Крива InSAR є помітно згладженою порівняно з дискретними GNSS-вимірами; при цьому спостерігається невеликий висотний зсув, тобто InSAR дає менші значення (~ 3 мм), імовірно обумовлений відмінностями у визначенні вертикальної компоненти та атмосферними залишками. Амплітуди збігаються добре, тобто масштаб деформацій обидва методи відтворюють подібно. Локальні розбіжності амплітуд/піків не змінюють загального висновку про узгодженість методів у виявленні сезонної та повільної складових деформацій.

На відміну від пункту ACP2, положення ГНСС-станцій (MP01-MP05) та постійних розсіювачів на бетонній греблі не співпадають (рис. 3.1). Тим не менше, порівняння результатів часових серій ГНСС та InSAR для точок на гребені та бермі нижнього укосу, показує стійку узгодженість сезонних вертикальних рухів верхньої та нижньої частини греблі (рис. 3.3)

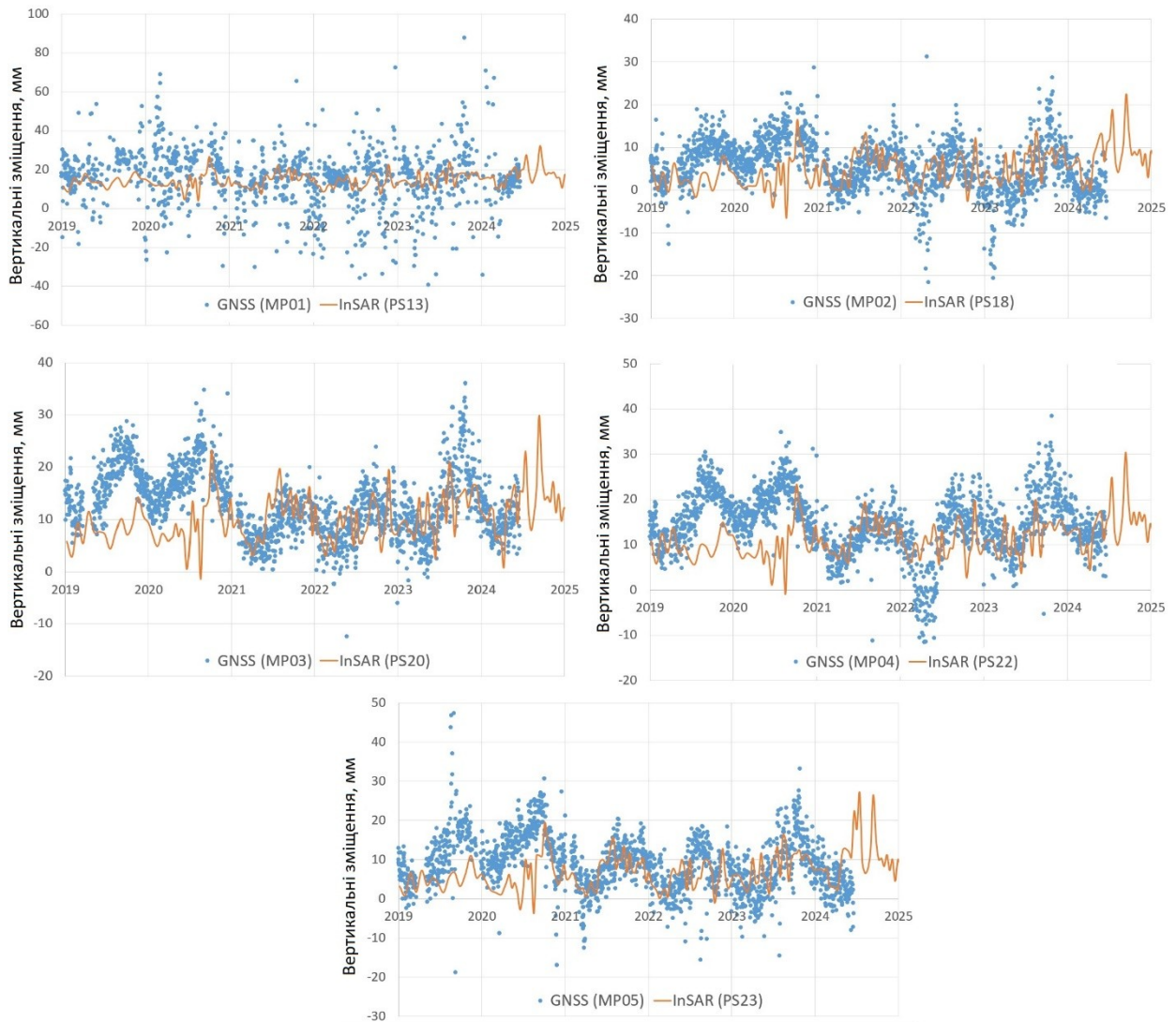


Рисунок 3.3 – Часові ряди вертикальних рухів точок мережі GNSS MP01-06 та відповідних постійних розсіювачів на нижній частині дамби

Верифікація результатів InSAR з результатами спостережень на пунктах GNSS мережі дозволяє використовувати усі інші дані, отримані для поверхні греблі, для згущення мережі точок з надійно визначеними значеннями деформацій та проведенням подальшого аналізу.

Отримані часові серії даних значною мірою спотворені шумовими компонентами (measurement noise), які притаманні усім застосованим методам. Тому, для подальшого спільного опрацювання та аналізу набрів даних, виконано фільтрацію даних та їхню оптимізацію із застосуванням математичних методів.

3.3 Фільтрація та оптимізація даних часових рядів

Часові серії даних, отримані для постійних розсіювачів на бетонній частині греблі методом InSAR, мають виражену гармонічну функцію з амплітудою не менше 4-5 мм і щорічним проявом максимуму функції приблизно у серпні-вересні та мінімуму – у лютому місяці. Дані, отримані від постійних розсіювачів на ґрунтовій частині греблі, утворюють часові серії з малою амплітудою коливань, яка близька до статистичного шуму без чітких максимумів та мінімумів функції.

Гармонічний характер часових серій зміщень є свідченням того, що в деформаціях бетонних конструкції домінують періодичні процеси, тісно пов'язані з температурними коливаннями середовища. Такі періодичні сигнали добре узгоджуються з фізичною природою теплового розширення та стискання бетону, що проявляється у циклічних добових і сезонних деформаціях. Це дозволяє застосовувати методи радіолокаційної інтерферометрії (InSAR), які, завдяки високій чутливості до малих вертикальних і горизонтальних зміщень, здатні відтворювати ці закономірності. Відомі результати підтверджують таку інтерпретацію. Зокрема, у дослідженні [Lorenz et al., 2024] показано ефективність технології InSAR для оцінювання температурно зумовлених деформацій бетонних споруд, де було зафіксовано виразні гармонічні компоненти у часових серіях зміщень. Додатково у роботі [Hastaoglu et al., 2023] проведено спектральний аналіз часових серій за допомогою швидкого перетворення Фур'є, що дозволило виокремити періодичні ефекти та підтвердити їх зв'язок із температурними циклами. Таким чином, наявність гармонічних складових у часових серіях зміщень не лише свідчить про вплив термічних процесів, а й обґрунтовує доцільність використання InSAR як дієвого інструменту для їхнього виявлення та кількісного аналізу.

З метою автоматизованого розпізнавання характеристик відбиваючої поверхні за часовими серіями даних супутникового радіолокаційного

знімання, виконаємо наступні дослідження із застосуванням апарату трансформації Фур'є.

Часові серії деформаційних вимірів демонструють істотні відхилення від ідеальної гармонічної функції. Застосування процедур фільтрації дозволяє зменшити вплив грубих похибок та покращити точність апроксимації гармонічною моделлю. Водночас надмірна фільтрація може привести до втрати статистично значущих спостережень, які відображають реальну динаміку поведінки системи і не є похибками. Це створює ризик спотворення інтерпретації фізичних процесів.

При апроксимації часових рядів InSAR-вимірів рядом Фур'є точність моделі закономірно зростає зі збільшенням кількості використаних гармонік. Проте цей процес має обмеження: використання невеликої кількості гармонік відображає лише домінуючі фактори, що визначають сезонні та періодичні зміни, тоді як залучення надмірної кількості гармонік може призводити до відтворення випадкових коливань, які не мають суттєвого фізичного змісту. Таким чином, постає необхідність знаходження компромісу між складністю моделі та її інтерпретаційною цінністю.

Оптимізація кількості гармонік та рівня фільтрації даних може бути формалізована у вигляді задачі нелінійного програмування. Цільова функція у цьому випадку визначається як залежність середньоквадратичної похибки апроксимації m від двох ключових параметрів: кількості відфільтрованих точок часового ряду n та кількості застосованих гармонік ряду Фур'є k . Такий підхід дозволяє отримати оптимальне співвідношення між точністю відтворення часової серії, збереженням статистично важливої інформації та мінімізацією випадкових шумових впливів.

Для формування цільової функції використовуємо поняття ентропійного об'єму, що часто використовується в задачах оптимізації з багатьма параметрами, де необхідно знайти оптимальний баланс між точністю і складністю моделі [Tretyak, 1993].

Ентропійна інтерпретація це функція яка оцінює загальну складність моделі при виборі параметрів n і k та значень цільової функції. У нульовому наближенні цільова функція має вид:

$$f(m, n, k) = \ln \left(\frac{m_n - m_0}{m_N - m_0} \right) + \ln \left(\frac{N - n}{N} \right) + \ln \left(\frac{K - k}{K} \right) \quad (3.1)$$

де n – кількість відфільтрованих точок; N – допустима кількість вилучених (відфільтрованих) точок (емпірично встановлено); K – допустима кількість гармонік ряду Фур'є (емпірично встановлено); k – кількість гармонік ряду Фур'є; m_0 , m_n , m_N – середня квадратична похибка апроксимації часової серії відповідно без вилучення вимірів, при вилученні n вимірів та при вилученні допустимої кількості вимірів N . Перший член відображає відносне зменшення похибки після вилучення точок; другий – частку збережених даних; третій – частку спрощення моделі (менша кількість гармонік відносно максимально можливої). Разом ці три складові задають «інформаційний обсяг» моделі, який треба оптимізувати. Для обчислення цільової функції відношення у кожному члені рівняння (3.1) зручно представляти у відсотках.

Вибрана цільова функція дозволяє знаходити баланс між точністю апроксимації, кількістю відфільтрованих точок і кількістю гармонік часової серії.

Алгоритм оптимізації часових серій методом Фур'є реалізований у вигляді циклічної процедури, що базується на балансі між кількістю вилучених спостережень, кількістю використаних гармонік та точністю апроксимації.

1. *Вхідні дані.* Часова серія вимірів (наприклад, InSAR-спостережень), граничні значення допустимої кількості вилучених точок N , максимальної кількості гармонік K .

2. *Ініціалізація.* Нульова ітерація виконується без фільтрації ($n=0$) з використанням однієї гармоніки ($k=1$). Будується базова апроксимаційна

модель та визначається похибка апроксимації m_0 і початкове значення цільової функції $f(m,n,k)_0$.

3. *Оцінка моделі.* Циклічною процедурою для $n \in 1..N$, $k \in 1..K$ для поточних параметрів (n, k) виконується апроксимація часової серії рядом Фур'є та обчислюється її середньоквадратична похибка m_n . Після цього визначається значення цільової функції $f(m,n,k)$ згідно з формулою (3.1). Результати визначення цільової функції записуються до матриці зміни цільової функції від $f(m,n,k)$.

4. *Визначення оптимальних параметрів апроксимації.* Для кожної точки у межах для $n_0 \in n_0+1.. N-1$, $k_0 \in k_0+1.. K-1$ j , визначаються різниці:

$$\begin{aligned} & f(m,n,k) - f(m,n-1,k), \\ & f(m,n,k) - f(m,n+1,k), \\ & f(m,n,k) - f(m,n,k-1), \\ & f(m,n,k) - f(m,n,k+1), \\ & f(m,n,k) - f(m,n-1,k-1), \\ & f(m,n,k) - f(m,n+1,k+1), \\ & f(m,n,k) - f(m,n-1,k+1), \\ & f(m,n,k) - f(m,n+1,k-1). \end{aligned}$$

Оскільки функція $f(m,n,k)$ є унімодальною то точка, для якої усі різниці є додатними відповідає екстремуму цільової функції і її параметри n і k є оптимальними. За оптимальними параметрами обчислюється похибка апроксимації m .

В таблиці 1 представлено фрагмент матриці розрахованих значень цільової функції (1) при відповідних значеннях n і k для часової серії постійного розсіювача на бетонній дамбі PS27.

З таблиці 3.1 чітко виділяється максимум цільової функції (3.1) для PS27 при фільтрації 31-ї точки часової серії та застосуванні 2-ох гармонік ряду Фур'є. Досягнення максимуму функції при 2-ох гармоніках вказує на те, що часова серія сигналу постійного розсіювача на бетоні не містить значних

сторонніх шумових компонент, а її варіації пояснюються гармонічними складовими низького порядку. Для порівняння, максимум функції для постійного розсіювача на ґрунтовій частині греблі отримуємо при фільтруванні 40-а точок та застосуванні 5-ти гармонік. Це свідчить про наявність складнішої спектральної структури та більшої кількості випадкових чи локальних факторів, що впливають на деформації ґрунтової основи у порівнянні з бетонною частиною споруди.

Таблиця 3.1 – Фрагмент значень матриці цільової функції (3.1) часової серії постійного розсіювача PS27 на бетонній греблі

Кількість відфільтрованих значень, n	Кількість гармонік Фур'є, k			
	1	2	3	4
1	4.0117	4.0020	3.8707	3.8403
5	6.7753	6.7624	6.6484	6.6192
10	7.1257	7.0752	6.9687	6.9435
15	7.8788	7.2480	7.1245	7.0921
20	7.9947	7.7305	7.2269	7.1977
25	8.0668	8.1226	7.2778	7.2476
26	8.0703	8.1593	7.2848	7.2542
27	8.0730	8.1594	7.2917	7.2592
28	8.0764	8.1598	7.2945	7.2630
29	8.0788	8.1854	7.2944	7.2630
30	8.0789	8.1859	7.2969	7.2640
31	8.1212	8.2124	7.2944	7.2613
32	8.1486	8.2117	7.2915	7.2601
33	8.1720	8.2107	7.2886	7.6044
34	8.1713	8.2066	7.6145	7.6042

На рис. 3.4 представлено часові серії даних радіолокаційного моніторингу для точок на бетонній греблі (PS27) та ґрунтовій греблі (PS21) і їхню апроксимацію рядом Фур'є з оптимальною кількістю гармонік:

$$m = a_0 + \sum_{i=1}^n c_i \sin(s_i t), \quad (3.2)$$

де n – оптимальна кількість гармонік ряду Фур'є; a_0 , c_i , s_i – постійні коефіцієнти, визначені методом апроксимації, $f = \Delta T / 2\pi$, (ΔT – інтервал часу між першим і останнім виміром у долях року).

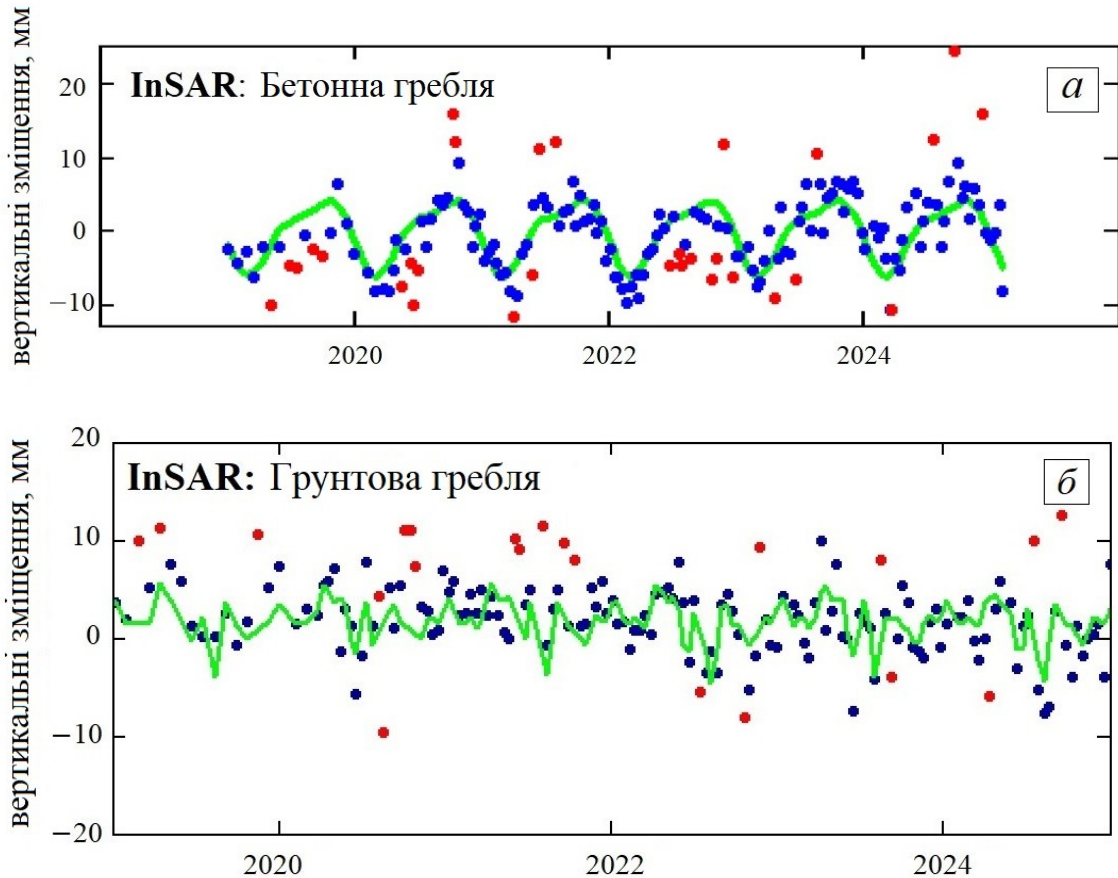


Рисунок 3.4 – Часові серії вертикальних рухів за даними радіолокаційного моніторингу та їх апроксимаційні криві: а – для постійного розсіювача PS27 на бетонній греблі (вхідна кількість даних – 163; кількість відфільтрованих даних $n=31$; відсоток фільтрації – 19 %); б – для постійного розсіювача PS21 на ґрунтовій греблі (вхідна кількість даних – 163; кількість відфільтрованих даних $n=21$; відсоток фільтрації – 13 %). ●●● – дані, що були видалені у результаті фільтрації; ●●● – дані після повної фільтрації; — – апроксимаційна крива

На рис. 3.5 зображено гістограму, яка представляє кількість значень часової серії для постійного розсіювача PS27, що відхиляються від апроксимаційної кривої, в межах визначеного діапазону, до та після фільтрації даних.

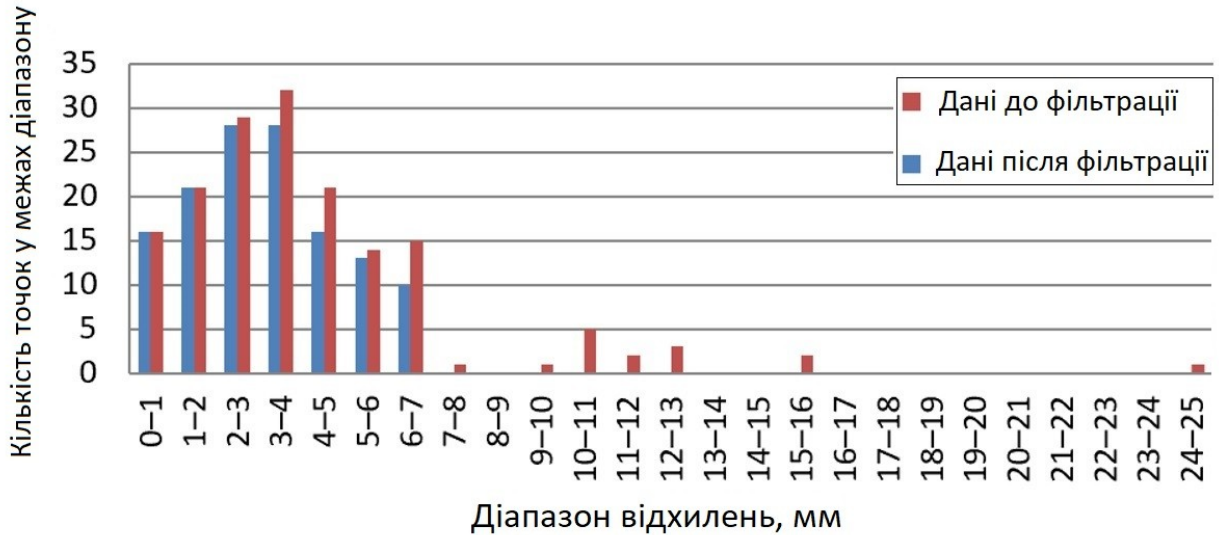


Рисунок 3.5 – Гістограма відхилень значень часових серій від апроксимаційних кривих до та після фільтрації даних для постійного розсіювача PS27

З гістограми бачимо, що до фільтрації даних відхилення від оптимальної апроксимуючої кривої досягають 25 мм, а після фільтрації – не перевищують 7 мм. Отримані дані свідчать про ефективність застосування підходу з фільтрацією даних часової серії.

У результаті апроксимації часових серій результатів InSAR на бетонній греблі, отримуємо плавні криві на яких чітко прослідковуються сезонні максимуми та мінімуми функцій. Послідовна річна періодичність рядів та мінімальна кількість гармонік, якими вони описуються ($k=2$ для PS27), підтверджує можливість застосування результатів InSAR для дослідження систематичних температурних деформацій конструктивних елементів бетонної греблі. Апроксимація часових серій для постійних розсіювачів на ґрунтовій греблі вказує на відсутність сезонної складової вертикальних рухів. Таким чином, застосований алгоритм може використовуватись для оцінки

наявності циклічних сезонних та температурних деформацій за даними радіолокаційного моніторингу та диференціації відбиваючих поверхонь (постійних розсіювачів): бетон, ґрунт, покрівлі та ін..

В таблиці 3.2 представлено фрагмент матриці розрахованих значень середньої квадратичної похибки m апроксимації часової серії для постійного розсіювача PS27 бетонної греблі. Обчислене значення середньої квадратичної похибки апроксимації часової серії без фільтрації вимірів становить $m_0=4.67$ мм.

Таблиця 3.2 – Фрагмент матриці значень середньої квадратичної похибки апроксимації часової серії m , мм

Кількість відфільтрованих значень, n	Кількість гармонік Фур'є, k			
	1	2	3	4
1	4.67*	4.58	4.57	4.57
10	4.17	4.11	4.08	4.08
20	3.34	3.55	3.42	3.34
30	3.02	2.73	2.71	2.69
31	2.93	2.66	2.61	2.58
32	2.85	2.63	2.60	2.55
33	2.78	2.60	2.57	2.50
34	2.76	2.58	2.55	2.48

(* – значення СКП без вилучення вимірів)

За попередньо отриманими значеннями $n=31$ та $k=2$, визначено для точки PS27 середню квадратичну похибку оптимальної апроксимації часового ряду $m=2.66$ мм, що відповідає максимуму цільової функції (3.1). Слід зауважити, що збільшення кількості відфільтрованих точок і збільшення кількості гармонік апроксимації суттєво не підвищує точність мережі відносно оптимального розв'язку.

Використаний алгоритм дозволяє одночасно врахувати точність апроксимації та складність моделі, забезпечуючи вибір оптимального балансу між кількістю відфільтрованих спостережень і кількістю гармонічних складових.

Описаний вище алгоритм застосовано для опрацювання часових серій вертикальних зміщень, отриманих за даними ССМПЗС Дністровської ГЕС-1. Як і для результатів InSAR, за даними часових серій ГНСС-станцій та пунктів мережі RTS отримано апроксимаційні криві на яких прослідковуються сезонні максимуми та мінімуми, спричинені температурними деформаціями бетонної греблі [Tretyak and Palianytsia, 2021; 2022; 2023, Tretyak, Serant, Bisovetskyi, 2024].

На рис. 3.6 та рис. 3.7 відповідно представлено часові серії вертикальних рухів ГНСС пунктів MP05 та пункту лінійно кутової мережі CP08 (див. рис. 1.4 а) встановлених на бетонній греблі і оптимальні криві апроксимації рядами Фур'є. Максимум цільової функції при апроксимації часової серії пункту MP05 досягнуто у результаті фільтрації 31-ї точки та застосуванні 6-ти гармонік ряду Фур'є. Для пункту лінійно-кутової мережі CP08 ці значення становлять відповідно $n=47$ та $k=5$.

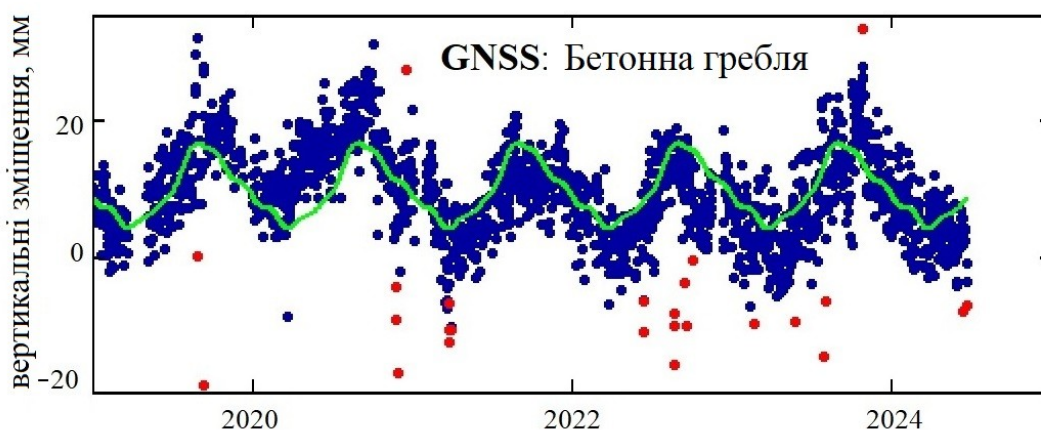


Рисунок 3.6 – Часова серія вертикальних рухів ГНСС станції MP05, розташованої на гребені греблі та її апроксимаційна крива (вхідна кількість даних – 3056; кількість відфільтрованих даних $n=31$; відсоток фільтрації – 1,0%). ●●● – дані, що були видалені у результаті фільтрації; ●●● – дані після повної фільтрації; — — — — — апроксимаційна крива

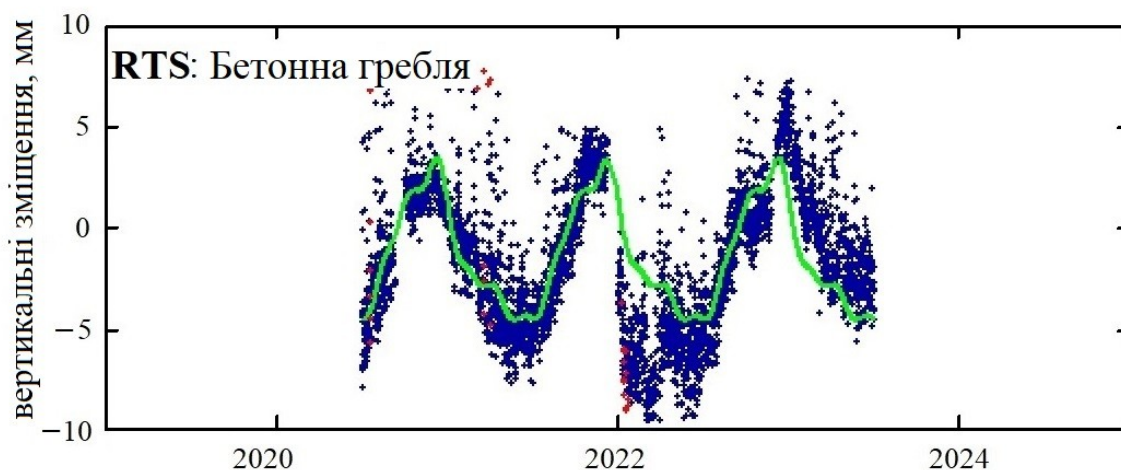


Рисунок 3.7 – Часова серія вертикальних рухів пункту мережі CP08, розташованого біля нижнього б’єфу греблі та її апроксимаційна крива (вхідна кількість даних – 4596; кількість відфільтрованих даних $n=47$; відсоток фільтрації – 1%). ●●● – дані, що були видалені у результаті фільтрації; ●●● – дані після повної фільтрації; ——— – апроксимаційна крива

Уніфікований підхід до опрацювання трьох наборів даних дозволяє представити сумісні результати визначення сезонних вертикальних рухів бетонної греблі Дністровської ГЕС-1 на основі результатів ГНСС-вимірів, лінійно-кутових вимірів мережі RTS та InSAR.

3.4 Результати визначення вертикальних зміщень бетонної частини греблі Дністровської ГЕС

Результати супутникового радіолокаційного моніторингу та представлений алгоритм опрацювання часових серій вертикальних рухів дозволили збільшити кількість контрольних точок на бетонній частині греблі Дністровської ГЕС-1 та уточнити модель температурних деформацій. Апроксимація часових серій вертикальних рухів споруду за даними ГНСС-вимірів, вимірів мережі RTS та InSAR дозволили визначити епохи максимального підйому та опускання контрольних точок, а також амплітуду їх коливань.

На рис. 3.8 представлено схему епох досягнення максимального вертикального підйому контрольних точок на бетонній греблі. Підписи на схемі відображають відповідні епохи у долях року.

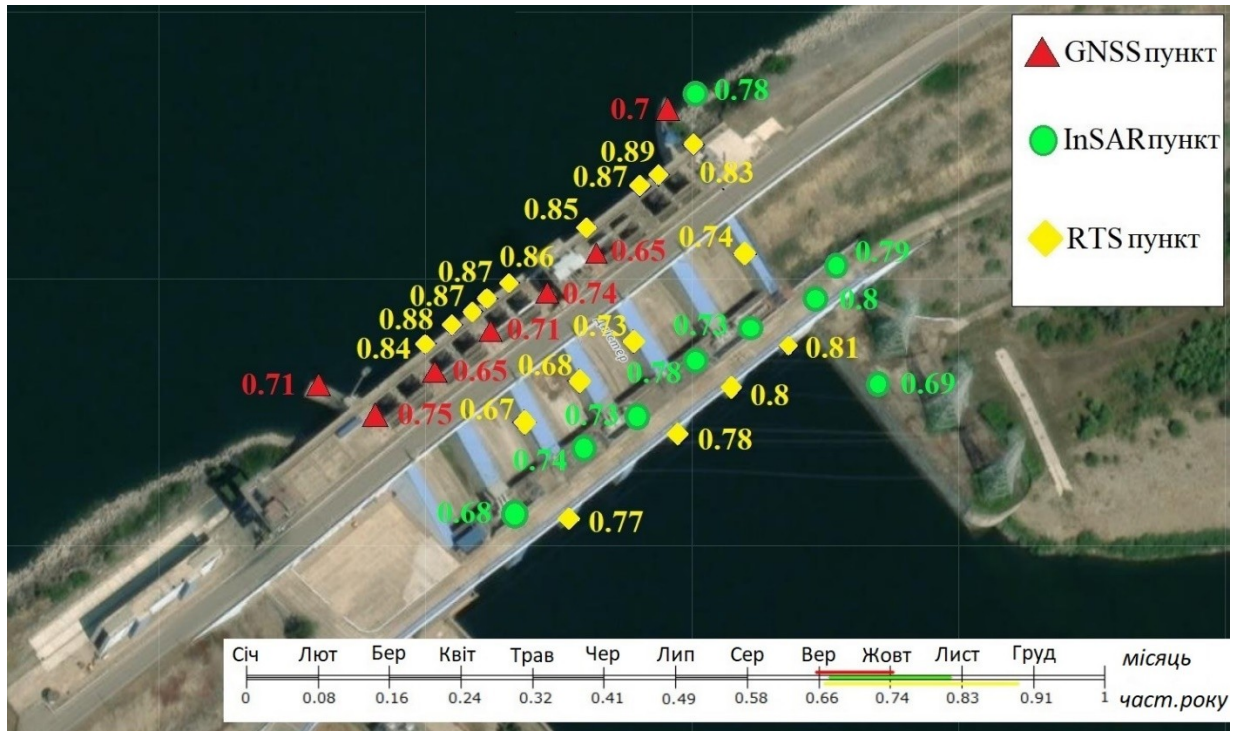


Рисунок 3.8 – Просторово-часовий розподіл максимального вертикального підйому контрольних точок бетонної греблі визначених методами GNSS, RTS, InSAR

Представлена схема просторово розподілу епох максимального вертикального підйому греблі показує, що ці моменти настають в період з другої половини серпня до кінця листопада. Епоха настання максимуму залежить від місяця розміщення контрольної точки на споруді. Гребінь греблі, на якому розташовані GNSS-приймачі, є горизонтальною і відкритою для впливу сонячної радіації ділянкою. Тому максимум амплітуди тут настає найшвидше і триває з серпня до вересня. На контрфорсах нижнього укосу, де розміщені пункти мережі RTS, максимум амплітуди настає з початку вересня до початку жовтня. Берма низового укосу також є постійно освітленою горизонтальною ділянкою бетонної греблі. Дані про вертикальні переміщення тут отримані завдяки InSAR точкам. Епоха настання максимуму амплітуди триває з початку вересня до кінця жовтня. Максимум амплітуди на опорах

водовипуску, де розміщені контрольні точки мережі RTS, настає дещо пізніше і триває з середини жовтня до кінця листопада. Найпізніше максимум амплітуди проявляється на конструкція верхового укосу (між верхнім б'єфом та гребенем греблі). Це зумовлено близькістю розташування бетонних конструкцій до поверхні води. Вплив температури води створює додаткову інерційну затримку системи.

На рис. 3.9 представлено схему просторового розподілу значень амплітуд (мм) вертикальних зміщень контрольних точок. Векторне представлення значень амплітуд вертикальних зміщень контрольних точок наведено на рис. 3.10.



Рисунок 3.9 – Просторовий розподіл амплітуд вертикальних зміщень контрольних точок бетонної греблі визначених методами GNSS, RTS, InSAR (мм)

Сумісне опрацювання даних моніторингу вертикальних рухів бетонної греблі методами ГНСС, TPS та InSAR дало змогу сформувати щільну мережу контрольних точок для побудови температурної моделі та оцінки величини сезонних деформацій. Розраховані амплітуди вертикальних рухів знаходяться

в діапазоні 6-13 мм, а їх величина чітко корелює з умовами розташування контрольних точок.

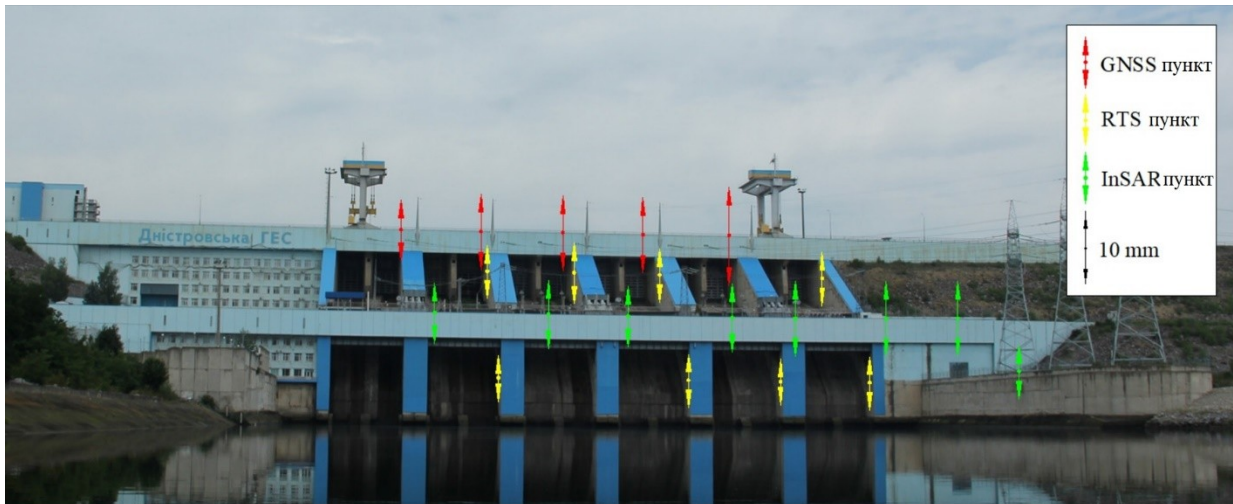


Рисунок 3.10 – Просторовий розподіл амплітуд вертикальних зміщень контрольних точок бетонної греблі визначених методами GNSS, RTS, InSAR у векторній формі

Точки GNSS та InSAR, встановлені на відкритих конструкціях, зазнають інтенсивного сонячного опромінення, що призводить до значних температурних деформацій. Так, горизонтальні ділянки на гребені греблі, де розміщені пункти GNSS-мережі, протягом року фіксують амплітуди вертикальних рухів у межах 8–13 мм. Аналогічно, точки InSAR, розташовані на бермі нижнього укосу, також знаходяться на відкритих майданчиках і характеризуються амплітудами 8–10 мм.

Натомість пункти TPS встановлені на затінених конструкціях, переважно на опорах водовипуску та верхового укосу з боку водосховища. Таке розташування знижує вплив сонячної радіації, а додатковий охолоджувальний ефект води верхнього та нижнього б'єфів обмежує розвиток температурних деформацій. Відповідно, для пунктів TPS спостерігаються найменші амплітуди вертикальних рухів – у межах 6-7 мм.

Таким чином, порівняльний аналіз трьох методів показує просторову залежність температурних деформацій бетонної греблі: максимальні

амплітуди характерні для відкритих ділянок із прямим сонячним впливом, а мінімальні – для затінених зон, близьких до води.

Висновки до розділу 3

Результати супутникового радіолокаційного моніторингу в поєднанні з даними GNSS-спостережень та вимірювань мережі роботизованих тахеометрів підтвердили ефективність інтегрованого підходу до визначення вертикальних зміщень бетонної частини греблі Дністровської ГЕС. Застосований алгоритм опрацювання часових серій дозволив істотно збільшити кількість контрольних точок, забезпечити їх рівномірний просторовий розподіл та уточнити модель температурних деформацій споруди.

Апроксимація часових рядів вертикальних переміщень, отриманих різними методами, дала змогу надійно визначити епохи максимального підйому та опускання контрольних точок, а також оцінити амплітуди сезонних коливань. Встановлено, що максимальні вертикальні підйоми бетонної греблі загалом припадають на період від другої половини серпня до кінця листопада, при цьому момент досягнення максимуму суттєво залежить від просторового положення контрольної точки та конструктивних особливостей елементів греблі.

Найраніше настання максимальних вертикальних зміщень зафіксовано на гребені греблі, який є горизонтальною та відкритою до сонячного опромінення ділянкою. Для контрфорсів нижнього укосу та берм характерне пізніше досягнення максимумів, тоді як на опорах водовипуску та конструкціях верхнього укосу максимальні амплітуди проявляються із додатковою часовою затримкою. Така інерційність зумовлена зменшеним впливом прямої сонячної радіації та близькістю бетонних конструкцій до водної поверхні, де температура води відіграє компенсуючу роль.

Аналіз просторового розподілу амплітуд показав, що сезонні вертикальні зміщення бетонної греблі перебувають у межах 6–13 мм і чітко корелюють з умовами теплового навантаження. Максимальні амплітуди характерні для відкритих горизонтальних ділянок греблі та берм нижнього укосу, де розміщені точки GNSS та InSAR, тоді як мінімальні значення зафіксовані на затінених конструкціях, контрольованих мережею RTS.

Отримані результати свідчать про домінуючий вплив температурних чинників на формування сезонних вертикальних деформацій бетонної греблі Дністровської ГЕС та підтверджують доцільність спільного використання GNSS, роботизованих тахеометрів і супутникової InSAR для побудови детальних і надійних моделей деформацій гідротехнічних споруд.

ВИСНОВКИ

1. Комплексний геодезичний моніторинг, виконаний за даними GNSS, лінійно-кутових вимірювань та дистанційного зондування методом InSAR, підтвердив узгодженість у визначенні сезонної складової та довготермінового тренду деформацій. Часові серії вертикальних зміщень демонструють синхронність фаз сезонних коливань і спільний тренд розвитку, а амплітуди добре співпадають, що свідчить про однакове відтворення масштабу зміщень наземними та дистанційними методами.

2. Підтвердження надійності InSAR моніторингу виконано шляхом порівняння результатів наземних спостережень та дистанційного зондування на спільних пунктах геодезичної мережі. Тому доцільно розширювати мережу комплексних геодезичних пунктів, в яких конструктивно поєднують кутові відбивачі для відбиття радіолокаційного сигналу, GNSS-антена та призмовий відбивач для лінійно-кутових вимірювань.

3. Застосування алгоритму фільтрації часових серій InSAR та апарату трансформації Фур'є, дозволяє диференціювати характеристики відбиваючих поверхонь та виявляти циклічні температурні деформації бетонних конструкцій греблі. Такий підхід дозволяє отримати оптимальне співвідношення між точністю відтворення часової серії, збереженням статистично важливої інформації та мінімізацією випадкових шумових впливів. Встановлено, що застосування процедур фільтрації дозволяє зменшити вплив грубих похибок та покращити точність апроксимації гармонічною моделлю. При цьому середня квадратична похибка апроксимації зростає з 4,7 мм до 2,7 мм.

4. Сумісне опрацювання результатів GNSS-вимірів, лінійно-кутових та радіолокаційних спостережень формує цілісну і обґрунтовану модель температурних деформацій бетонної частини греблі Дністровської ГЕС. Представлена схема просторово розподілу епох максимального вертикального

підйому греблі показує, що ці моменти настають в період з другої половини серпня до кінця листопада. Епоха настання максимуму залежить від місця розміщення контрольної точки на споруді. Найбільші значення амплітуди вертикальних зміщень зафіксовані на горизонтальних ділянках греблі, які отримують максимальну кількість сонячної радіації. Розраховані значення амплітуд вертикальних рухів бетонної греблі знаходяться у діапазоні 6-13 мм.

На даному об'єкті температура є визначальним фактором, що впливає на виявлені вертикальні рухи. Фактор гідрологічного навантаження очевидно присутній, проте через низьку кореляцію між просторовими зміщеннями контрольних точок та зміною рівня води у водосховищі, він не може бути виділений із загального тренду деформацій.

5. Верифіковані результати InSAR-моніторингу, що узгоджуються з наземними вимірюваннями (GNSS, RTS), дали змогу суттєво згустити мережу контрольних точок та удосконалити температурну модель Дністровської ГЕС. Це забезпечило отримання додаткової інформації про стан як бетонної греблі, так і ґрунтових елементів гідровузла.

6. Інтегроване використання GNSS, RTS та InSAR дозволяє не лише підвищити просторову роздільність спостережень, але й виявити закономірності температурних деформацій, зумовлених відмінними мікрокліматичними умовами. Такий підхід створює підґрунтя для більш точного прогнозування довгострокової динаміки конструкцій у змінних кліматичних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Reguzzoni, M., Rossi, L., De Gaetani, C. I., Caldera, S., & Barzaghi, R. (2022). GNSS-Based Dam Monitoring: The Application of a Statistical Approach for Time Series Analysis to a Case Study. *Applied Sciences*, 12(19), 9981. <https://doi.org/10.3390/app12199981>
2. Zhao, S., Kang, F., Li, J., Ma, C. (2021). Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction. *Automation in Construction*. Volume 130. 103832. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103832>
3. Sevieri, G., Falco, A., Andreini, M., Matthies, H. G. (2021). Hierarchical Bayesian framework for uncertainty reduction in the seismic fragility analysis of concrete gravity dams. *Engineering Structures*. Volume 246.113001. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113001>
4. Konakoglu, B. (2021). Deformation Analysis Using Static, Kinematic and Dynamic Geodetic Deformation Models with GNSS: Deriner Dam, Artvin, Turkey. *Experimental Techniques*. 45. 645–660. <https://doi.org/10.1007/s40799-020-00435-z>
5. Bolzon, G., Frigerio, A., Hajjar, M., Nogara, C., Zappa, E. (2025). Structural health assessment of existing dams based on non-destructive testing, physics-based models and machine learning tools. *NDT & E International*. Volume 150. 103271. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103271>
6. 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*, Volume 3, Issue 2, 160-171, ISSN 2666-7592. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.12.007>
7. Wang, Q., Gao, Y., Gong, T., Liu, T., Sui, Z., Fan, J., & Wang, Z. (2023). Dam Surface Deformation Monitoring and Analysis Based on PS-InSAR

- Technology: A Case Study of Xiaolangdi Reservoir Dam in China. *Water*, 15(18), 3298. <https://doi.org/10.3390/w15183298>
8. Pang, Z., Jin, Q., Fan, P., Jiang, W., Lv, J., Zhang, P., Cui, X., Zhao, C., & Zhang, Z. (2023). Deformation Monitoring and Analysis of Reservoir Dams Based on SBAS-InSAR Technology—Banqiao Reservoir. *Remote Sensing*, 15(12), 3062. <https://doi.org/10.3390/rs15123062>
 9. Xie, W., Wu, J., Gao, H., Chen, J., He, Y. (2023). SBAS-InSAR Based Deformation Monitoring of Tailings Dam: The Case Study of the Dexing Copper Mine No.4 Tailings Dam. *Sensors (Basel)*. 23(24): 9707. doi: 10.3390/s23249707
 10. Ruiz-Armenteros, A. M., Delgado Blasco, J. M., Bakoň, M., Lamas-Fernández, F., Marchamalo, M., Gil, A. J., Papčo, J., González-Rodrigo, B., Lazecký, M., Perissin, D., Sousa, J. J. (2022). Monitoring embankment dams from space using satellite radarinterferometry: Case studies from RemoDams project. *5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. 20-22 June 2022. Valencia, Spain. DOI: <http://doi.org/10.4995/JISDM2022.2022.13883>
 11. Darvishi, M., Destouni, G., Aminjafari, S., & Jaramillo, F. (2021). Multi-Sensor InSAR Assessment of Ground Deformations around Lake Mead and Its Relation to Water Level Changes. *Remote Sensing*, 13(3), 406. <https://doi.org/10.3390/rs13030406>
 12. Rana, N.M., Delaney, K.B., Evans, S.G. *et al.* (2024). Application of Sentinel-1 InSAR to monitor tailings dams and predict geotechnical instability: practical considerations based on case study insights. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 83, 204. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03680-3>
 13. Yang, J., Wang, J., Pan, J. (2024). An intelligent method for temperature load of arch dams. *Engineering Structures*. Volume 321,118918. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118918>

14. Yu, H., Wang, F., Mao, D., Chen, J., Xiong, X., Song, R., Liu, J. (2024). Temperature monitoring and simulation analysis of the bottom orifices of Baihetan arch dam when outflowing. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Volume 150. 107200. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107200>
15. Tretyak, K., Serant, O. & Bisovetskyi, Y. (2024). Modeling of temperature deformations on the Dnister HPP dam (Ukraine). *Journal of Applied Geodesy*, 19(2), 247-264. <https://doi.org/10.1515/jag-2024-0060>
16. Tretyak, K., Palianytsia, B. (2021). Research of seasonal deformations of the Dnipro HPP dam according to GNSS measurements. *Geodynamics*. 1: 5–16.
17. Tretyak, K., Palianytsia, B. (2022). Research of the environmental temperature influence on the horizontal displacements of the Dnieper hydroelectric station dam (according to GNSS measurements). *Rep Geodesy Geoinf*. 113: 1–10.
18. Tretyak, K. and Palianytsia, B. (2023). Dam Spatial Temperature Deformations Model Development Based on GNSS Data. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Volume 37, Issue 4. <https://doi.org/10.1061/JPCFEV.CFENG-4312>
19. Ruiz-Armenteros, A. M., Marchamalo-Sacrsitán, M., Bakoň, M., Lamas-Fernández, F., Delgado, J. M., Sánchez-Ballesteros, V., Papco, J., González-Rodrigo, B., Lazecky, M., Perissin, D., Sousa, J. J. (2021). Monitoring of an embankment dam in southern Spain based on Sentinel-1 Time-series InSAR. *Procedia Computer Science*, Volume 181. 353-359. ISSN 1877-0509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.178>
20. Calò, M., Ruggieri, S., Nettis, A., Giuseppina, U. (2024). A MTInSAR-Based Early Warning System to Appraise Deformations in Simply Supported Concrete Girder Bridges, *Structural Control and Health Monitoring*, 8978782, 27 pages, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/8978782>
21. Agapie (Mereuță) I., Luca M., Gherasim P-M., Dominte (Croitoru) V. (2021). Design of GNSS networks for monitoring earth dams

- deformations. *Journal of Applied Life Sciences and Environment*. 54(4). 354-369. <https://doi.org/10.46909/journalalse-2021-031>
22. Scaioni, M., Marsella, M., Crosetto, M., Tornatore, V., & Wang, J. (2018). Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring. *Sensors*, 18(11), 3682. <https://doi.org/10.3390/s18113682>
23. Zolfaghari, M. (2022). Using Geodetic Method to Monitor Dam Deformation: Case Study. *Journal of Progress in Civil Engineering*. Volume 4, Issue 6. 31-36. DOI:10.53469/jpce.2022.04(06).09
24. Zhou, W., Zhang, L., & Lu, Z. (2020). Monitoring dam deformations using time-series InSAR technique: A review. *Earth-Science Reviews*, 208. 103267. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103267>
25. Ziemer, J., Jänichen, J., Stein, G., Liedel, N., Wicker, C., Last, K., Denzler, J., Schullius, C., Shadaydeh, M., & Dubois, C. (2025). Identifying Deformation Drivers in Dam Segments Using Combined X- and C-Band PS Time Series. *Remote Sensing*, 17(15), 2629. <https://doi.org/10.3390/rs17152629>
26. Hastaoglu, K.O., Poyraz, F., Erdogan, H., Tiryakioglu, I., Ozkaymak, C., Duman, H., Gül, Y., Guler, S., Dogan, A., Gul, Y. (2023). Determination of periodic deformation from InSAR results using the FFT time series analysis method in Gediz Graben. *Nat Hazards (Dordr)*.117(1). 491-517. doi: 10.1007/s11069-023-05870-w
27. Lorenz, R., Petryna, Y., Lubitz, C. et al. (2024). Thermal deformation monitoring of a highway bridge: combined analysis of geodetic and satellite-based InSAR measurements with structural simulations. *Journal Civil Structural Health Monitoring*. 14. 1237–1255. <https://doi.org/10.1007/s13349-024-00779-9>
28. Tretyak, K. (1993). Generalized criterion for optimization of geodetic networks. *Geodesy, cartography and aerial photography*. Volume 55. 93-102. (in Ukrainian)

- 29.** Tretyak, K., Kukhtar, D., Prykhodko, M., Yatsyk, V. (2023). Deployment Technique of Radar Corner Reflector for SAR Observations. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023»*, 2-4 October 2023, Lviv, Ukraine. DOI: 10.3997/2214-4609.2023510038

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи «Методичні основи архівування даних для довготривалого супутникового радіолокаційного моніторингу інженерних об'єктів». Робота складається із двох частин: пояснювальної записки і презентаційного матеріалу.

1. Пояснювальна записка містить 58 аркушах машинописного тексту, таблиць 3 шт., 15 рисунків, бібліографічних посилань 29 назв.

2. Презентаційний матеріал.

Дата закінчення роботи: _____ Підпис _____