

Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

Житар Дмитро Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.8

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

«Дослідження методів супутникового радарного моніторингу змін земної поверхні у районах військових дій та їх картографування засобами ГІС»

(назва роботи)

Геодезія

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Житар Д. І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: Ільків Є.Ю., к.т.н, доцент.

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

Професор _____ М. М. Приходько

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

Рецензент

Доцент _____

(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

Інститут архітектури, будівництва та енергетики

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

Освітньо-професійна програма Геодезія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГКЗ

Приходько М. М.

« » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Житару Дмитру Івановичу

1. Тема роботи – «Дослідження методів супутникового радарного моніторингу змін земної поверхні у районах військових дій та їх картографування засобами ГІС».

Керівник роботи – к. т. н., доц. Ільків Є.Ю.

Наказ ректора від «28» листопада 2025 року № 743/7.

2. Термін подання студентом роботи – _____.

3. Вихідні дані до роботи: 1. Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: *1. Теоретичні основи супутникового радарного моніторингу. 2. Методичний підхід до аналізу трансформацій земної поверхні в зонах конфлікту. 3. Аналіз результатів та ГІС інтеграція*

5. Перелік графічного матеріалу: _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1,2,3	Ільків Є.Ю. доцент		

7. Дата видачі завдання – «01» вересня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на виконання магістерської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури.	01.09.25 -18.09.25	
2	Складання попереднього плану та змісту магістерської роботи.	19.09.25 -25.09.25	
3	Теоретичні основи супутникового радарного моніторингу	26.09.25 -12.10.25	
4	Методичний підхід до аналізу трансформацій земної поверхні в зонах конфлікту	13.10.25 - 29.10.25	
5	Аналіз результатів та ГІС інтеграція	30.10.25 - 15.11.25	
6	Оформлення магістерської роботи та додатків до неї, складання висновків.	16.11.25 - 17.12.25	

Студент _____

(підпис)

Житар Д.І.

(розшифровка підпису)

Керівник _____

(підпис)

Ільків Є.Ю.

(розшифровка підпису)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена дослідженню методів супутникового радарного моніторингу змін земної поверхні у районах військових дій та їх картографування засобами ГІС, а її основною метою є розробка та наукове обґрунтування комплексного методичного підходу до дистанційного моніторингу змін на територіях із тотальною деструкцією інфраструктури, де застосування класичних наземних та оптичних методів є неможливим. У ході дослідження було проведено критичний аналіз ефективності методів радарної інтерферометрії, зокрема DInSAR, SBAS та PSI, що дозволило експериментально довести їхню непридатність для моніторингу тотально зруйнованих міст через критичну втрату фазової когерентності, водночас обґрунтувавши використання феномену «інтерферометричної тіні» та відсутності стабільних відбивачів як самостійного індикатора катастрофічного рівня руйнувань. На основі виявлених обмежень було розроблено адаптивну методику амплітудного моніторингу з використанням даних Sentinel-1 GRD, яка базується на застосуванні комплексу індикаторів, зокрема різниці коефіцієнта зворотного розсіювання та коефіцієнта варіації, де діапазон значень останнього в межах 0.7–1.1 було ідентифіковано як ознаку перетворення міської забудови на хаотичні уламкові поля.

Ключові слова: *супутниковий моніторинг, Sentinel-1, SAR, інтерферометрія, амплітудний аналіз, коефіцієнт варіації, оцінка руйнувань, ГІС.*

ABSTRACT

The master's thesis is dedicated to the study of satellite radar monitoring methods for land surface changes in combat zones and their mapping using GIS tools. Its primary objective is the development and scientific substantiation of a comprehensive methodological approach to remote monitoring of changes in territories characterized by total infrastructure destruction, where the application of conventional ground-based and optical methods is impossible. In the course of the research, a critical analysis of the effectiveness of radar interferometry methods, specifically DInSAR, SBAS, and PSI, was conducted. This allowed for the experimental verification of their unsuitability for monitoring totally destroyed cities due to a critical loss of phase coherence. Simultaneously, the study substantiated the use of the "interferometric shadow" phenomenon and the absence of stable scatterers as independent indicators of catastrophic destruction levels. Based on the identified limitations, an adaptive amplitude monitoring methodology using Sentinel-1 GRD data was developed. This approach relies on a complex of indicators, particularly the difference in the backscatter coefficient and the coefficient of variation, where a value range of 0.7–1.1 for the latter was identified as a marker of the transformation of urban development into chaotic debris fields.

Keywords: *satellite monitoring, Sentinel-1, SAR, interferometry, amplitude analysis, coefficient of variation, damage assessment, GIS.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СУПУТНИКОВОГО РАДАРНОГО МОНІТОРИНГУ	14
1.1 Сучасні виклики моніторингу територій, постраждалих від військових дій в Україні.	14
1.2 Принцип роботи SAR.....	17
1.2.1 Фізика радіохвиль у SAR-системах.....	18
1.2.2 Амплітуда та фаза SAR-сигналу.....	19
1.2.3 Геометричні спотворення SAR-зйомки.....	20
1.2.4 Коефіцієнти зворотного розсіювання та їх значення для аналізу руйнувань.....	21
1.3. Методи інтерферометрії (InSAR).	22
1.3.1 Диференційний інтерферометричний аналіз (DInSAR).....	23
1.3.2 Мультичасовий InSAR.....	24
1.3.3 Методи SBAS і PSI.....	24
1.4 Дані Sentinel-1 для моніторингу деформацій.....	26
1.4.1 Режими зйомки Sentinel-1 та їх застосування у міських руйнуваннях.....	27

1.4.2	Параметри продуктів Sentinel-1 та їх придатність для інтерферометрії.....	27
1.4.3	Просторове розділення та його значення.....	28
1.4.4	Радіометричне розділення та стабільність.....	29
1.4.5	Значення Sentinel-1 для моніторингу деформацій у зоні бойових дій.....	29
1.5.	Обмеження та похибки SAR-даних.....	30
1.5.1	Атмосферні впливи.....	32
1.5.2	Геометричні особливості зйомки.....	32
1.5.3	Мультипути та повторні відбиття.....	33
1.5.4	Шум та втрати когерентності.....	33
1.5.5	Перешкоди у міських середовищах.....	34
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТРАНСФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ В ЗОНАХ КОНФЛІКТУ.....		35
2.1	Методологічні принципи супутникового радарного моніторингу змін земної поверхні та обґрунтування вихідних даних.....	35
2.2	Методика попередньої обробки SAR-даних.....	38
2.3	Реалізація радіометричної та геометричної корекції SAR-даних у SNAP39	
2.4	Обґрунтування вибору полігону дослідження: Мар'їнка як техногенно-трансформований об'єкт.....	40
2.5	Критичний аналіз інтерферометричних методів (DInSAR, SBAS, PSI)	42

2.6 Розробка та деталізований алгоритм амплітудного аналізу змін (GRD).	43
2.6.1 Принципи виявлення змін за амплітудою.	45
2.6.2 Застосування коефіцієнта варіації (CoV)	45
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ГІС-ІНТЕГРАЦІЯ	47
3.1 Синтез аналітичних результатів та оцінка радарної сигнатури зруйнованої території	47
3.2 Інтерпретація кількісних індикаторів та оцінка структурної деградації	48
3.2.1 Інтерпретація карт CoV та текстурних характеристик	50
3.3 Картографування зон руйнувань та класифікація змін на основі амплітудних індикаторів	51
3.4 Інтеграція результатів аналізу у ГІС.	53
3.5 Узагальнення результатів аналізу, практичне значення та рекомендації	54
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58
Бібліографічна довідка	1

ВСТУП

Сучасний етап розвитку геодезії, геоінформатики та систем дистанційного зондування Землі характеризується стрімким розширенням спектру технологій, що дозволяють отримувати достовірну, просторово прив'язану інформацію про стан земної поверхні без необхідності фізичного доступу до об'єкта дослідження. У період активної фази бойових дій на території України та тривалих руйнувань населених пунктів важливість таких технологій зросла до безпрецедентного рівня. Багато територій стали абсолютно недоступними для традиційних інженерно-геодезичних обстежень через мінну небезпеку, руйнування транспортної інфраструктури, тривалу окупацію або повну ліквідацію міського середовища. Це обумовило критичну потребу в інструментах дистанційного аналізу, здатних забезпечити оперативний та високоточний моніторинг трансформацій територій, визначення рівня руйнувань та оцінку масштабів змін рельєфу, що відбулися внаслідок воєнних дій.

У цьому контексті активні радарні методи дистанційного зондування, зокрема технологія SAR (Synthetic Aperture Radar), набувають особливого значення. На відміну від оптичних систем, радарна зйомка не залежить від погодних умов, освітлення та атмосферних перешкод, що дозволяє здійснювати регулярні, стабільні спостереження за будь-яких умов. Вона забезпечує можливість фіксації структурних змін на поверхні, формує інформаційну основу для виявлення зруйнованих об'єктів, деформацій і порушень ґрунтових масивів, а також дозволяє проводити багаточасовий аналіз стану територій у динаміці.

Особливої уваги заслуговує дослідження територій, які були повністю або майже повністю зруйновані внаслідок бойових дій. Мар'їнка є одним із найбільш показових прикладів таких міст. Тривале перебування у зоні активних бойових дій призвело до повного руйнування більшості житлових кварталів, інженерних споруд та міської інфраструктури. Зміни рельєфу, накопичення уламкового матеріалу, порушення ґрунтових масивів, знищення рослинного покриву та зміна структурних характеристик поверхні створюють складне техногенно-трансформоване середовище. За таких умов застосування радарних методів є практично єдиним можливим способом отримання достовірної інформації про стан території та ступінь її деградації.

Надійний та інформативний аналіз таких територій вимагає не лише застосування сучасних технологій спостереження, а й впровадження комплексних геоінформаційних методів, які дозволяють інтегрувати радарні дані з іншими джерелами інформації, виконувати просторовий аналіз, моделювати зміни, здійснювати оцінку руйнувань та створювати тематичні карти для підтримки рішень щодо післявоєнної відбудови. Об'єднання SAR-даних із ГІС-технологіями дає змогу сформувавши ефективну методику аналізу територій, що зазнали критичних руйнувань, та є перспективним напрямом розвитку геодезії та геоінформаційних систем в Україні.

Актуальність теми обумовлена необхідністю оперативного, достовірного та безпечного оцінювання стану територій, які постраждали внаслідок сучасних воєнних дій. На значній частині таких територій повністю зруйновано інженерні споруди, дорожню інфраструктуру, житловий фонд та елементи комунального господарства. У багатьох випадках доступ до цих територій є неможливим або вкрай небезпечним, а виконання традиційних інженерно-геодезичних вишукувань не може бути забезпечене через мінну загрозу, обстріли чи руйнування базових інфраструктурних об'єктів. У зв'язку з цим супутникові радарні методи моніторингу стають єдиним інструментом, який

дає змогу здійснювати повноцінний аналіз масштабів руйнувань і змін земної поверхні. Дані SAR дають можливість незалежно від пори року, стану атмосфери чи освітленості визначати деформації, просідання, зміни рельєфу та структурні трансформації поверхні, що є прямим наслідком військової активності.

Вибір міста Мар'їнка для дослідження зумовлений унікально високим рівнем руйнувань, що робить його показовим об'єктом для аналізу можливостей SAR-технологій у реальних, екстремально складних умовах. Крім того, саме такі території будуть потребувати найдетальнішого моніторингу перед початком післявоєнної відбудови, що визначає високу практичну цінність дослідження.

Мета роботи – розробка та обґрунтування комплексного підходу до супутникового радарного моніторингу змін земної поверхні на території міста Мар'їнка, яке зазнало масштабних руйнувань внаслідок бойових дій, із подальшим застосуванням геоінформаційних технологій для картографування цих змін.

Предмет дослідження - методи супутникового радарного моніторингу (SAR, InSAR) та інструменти геоінформаційних систем, які використовуються для аналізу, виявлення та картографування деформацій і руйнувань поверхні.

Об'єкт дослідження - Процеси трансформації земної поверхні внаслідок військових дій на прикладі території міста Мар'їнка.

Основні завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасні методи супутникового радарного зондування Землі (SAR, InSAR) та їх застосування в інженерній геодезії.

- Описати фізичні принципи роботи SAR, особливості формування інтерферограм та фактори похибок.
- Дослідити структуру даних Sentinel-1, вимоги до їхньої обробки та можливості для моніторингу деформацій.
- Розробити ГІС-методику аналітичної обробки та картографування змін земної поверхні.
- Провести оцінку точності та надійності отриманих результатів.
- Сформувати рекомендації щодо використання SAR та ГІС для моніторингу й відбудови територій.

Методична основа роботи спирається на поєднання радарних методів дистанційного зондування Землі та сучасних ГІС-технологій. У дослідженні застосовуються методи аналізу амплітудних SAR-зображень та елементи інтерферометричної обробки, що дозволяють визначати структурні зміни поверхні. Для обробки супутникової інформації використовуються процедури радіометричної та геометричної корекції, фільтрації шуму, вирівнювання та приведення даних до єдиного координатного простору. Геоінформаційні методи забезпечують виконання просторового аналізу, моделювання, побудову тематичних шарів і отримання карт змін поверхні. Також використовуються аналітико-діагностичні та порівняльні методи, що дозволяють інтерпретувати результати та встановлювати характерні закономірності трансформацій.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні цілісного підходу до використання супутникової радарної інформації для дослідження територій, що зазнали повних або майже повних руйнувань внаслідок бойових дій. У роботі обґрунтовано застосування амплітудного аналізу SAR-даних у поєднанні з ГІС-методами як ефективного інструменту для визначення масштабів трансформацій земної поверхні в умовах екстремального техногенного впливу.

Дослідження дозволяє деталізувати властивості радарних зображень у зонах зруйнованої забудови та виявити закономірності зміни зворотного розсіювання для територій із різною інтенсивністю руйнувань.

Практичне значення результатів полягає у можливості використання розробленої методики для оперативної оцінки стану територій, які постраждали внаслідок воєнних дій, без необхідності проведення польових вимірювань у небезпечних умовах. Запропонований підхід може застосовуватися органами місцевого самоврядування, службами цивільного захисту, проєктними організаціями та геодезичними підприємствами під час планування післявоєнної відбудови, відновлення інженерної інфраструктури та виконання просторового аналізу змін поверхні. Методика може бути інтегрована в існуючі ГІС-платформи та використана для подальшого моніторингу територій, що зазнають тривалих техногенних навантажень.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СУПУТНИКОВОГО РАДАРНОГО МОНІТОРИНГУ

1.1 Сучасні виклики моніторингу територій, постраждалих від військових дій в Україні.

Моніторинг територій, що зазнали впливу активних бойових дій, є одним з найскладніших і водночас найбільш актуальних завдань сучасної геодезії, геоінформатики та систем дистанційного зондування Землі. Повномасштабна збройна агресія проти України спричинила руйнування значних площ міських територій, промислових зон, об'єктів критичної інфраструктури та інженерних мереж. Внаслідок цього виникла гостра потреба у швидкому та достовірному отриманні просторової інформації про масштаб і характер трансформацій земної поверхні. Значна частина таких територій є або недоступною, або класифікується як небезпечна через наявність нерозірваних боєприпасів, мінних полів, руйнування шляхів під'їзду чи загрозу повторних обстрілів. За таких умов традиційні методи польових геодезичних спостережень фактично не можуть забезпечити необхідний рівень безпеки, системності та оперативності.

З огляду на ці чинники дистанційне зондування Землі стало основним інструментом для оцінки стану зруйнованих територій. Найбільш критичною особливістю зон бойових дій є повна непередбачуваність трансформацій: зміни рельєфу, просідання ґрунтів, утворення воронк після вибухів, руйнування та обвалення будівель, накопичення великої кількості уламкового матеріалу, пожежі та техногенні забруднення. Ці зміни не лише вимагають постійного

моніторингу, але й суттєво ускладнюють сам процес інтерпретації даних, оскільки їхня природа є комплексною, нерівномірною та динамічною.

У таких умовах оптичні супутникові знімки, попри високу інформативність у мирний час, часто виявляються недостатніми. Вони істотно залежать від атмосферних умов, хмарності, диму та освітлення, що робить їх ненадійними у періоди активних бойових дій. Саме тому усе важливішою стає роль активних радарних систем, таких як SAR (Synthetic Aperture Radar), які забезпечують регулярний та стабільний моніторинг незалежно від погодних факторів. Сучасні дослідження, проведені провідними європейськими інституціями, підтверджують, що саме радарні дані є найбільш ефективним інструментом для аналізу руйнувань та змін рельєфу у зонах конфліктів.

Таблиця 1.1 Порівняння оптичних та радарних даних для моніторингу території у зонах конфліктів.

Параметр порівняння	Оптичні дані	Радарні SAR-дані
Залежність від освітлення	Висока (працює лише вдень)	Відсутня (активна зйомка)
Залежність від хмарності/диму	Висока (сигнал блокується)	Відсутня (хвилі проникають)
Чутливість до міліметрових деформацій	Відсутня (лише візуальні зміни)	Висока (фазовий аналіз InSAR)
Реагування на уламкові поля	Чітке візуальне відображення	Чітке амплітудне відображення
Надійність моніторингу	Низька (залежить від погодних умов)	Висока (стабільна періодичність)

Ключовим викликом для України є масштаб руйнувань міських зон, серед яких Мар'їнка є одним із найбільш показових прикладів. Місто зазнало майже повної деструкції: зруйновано житлову забудову, інженерну інфраструктуру, комунікації, а рельєф на багатьох ділянках набув характеру техногенно-трансформованої поверхні з хаотичною структурою. Ці фактори створюють не лише потребу, а й унікальні труднощі для супутникового моніторингу. Радарні дані у таких умовах є надзвичайно інформативними, оскільки реагують на зміни мікрошорсткості поверхні, діелектричних характеристик, напрямку орієнтації уламків та ступеня деструкції штучних об'єктів. Проте саме значний рівень руйнувань ускладнює фільтрацію шуму та інтерпретацію відбитого сигналу, що потребує застосування комплексних методів попередньої та вторинної обробки даних.

Ще один важливий виклик — відсутність актуальних топографічних та кадастрових матеріалів для зруйнованих територій. Багато карт, планів та інженерно-геодезичних даних втратили актуальність, оскільки об'єкти, що раніше слугували реперами або контрольними точками, фізично знищені. Це ускладнює геокорекцію та прив'язку даних, а часом робить неможливим використання класичних методів наземної валідації результатів.

Суттєвим є також виклик, пов'язаний з необхідністю інтеграції SAR-даних у ГІС-середовище. Радарна інформація має специфічну структуру: вона включає амплітудну та фазову складову, потребує нормалізації, корекції за кутом падіння, фільтрації спектру, приведення до картографічних проекцій та адаптації до алгоритмів просторового аналізу. Системи ГІС відіграють критично важливу роль у стандартизації таких даних, формуванні тематичних шарів, побудові карт змін та їх інтеграції з іншими джерелами інформації, включаючи оптичні зображення, цифрові моделі рельєфу, відкриті державні ресурси та дані гуманітарних організацій.

Технічно складним аспектом є ідентифікація та класифікація об'єктів руйнування за SAR-даними. На відміну від оптики, де очевидні візуальні ознаки руйнувань можна визначити за контуром або кольоровими характеристиками, у радарних зображеннях руйнування проявляються через підвищене розсіювання, мультипуті та хаотичну структуру відбитого сигналу, що потребує досвіду та застосування додаткових алгоритмів аналізу різниць ("change detection").

Окремо слід підкреслити виклик довготривалого моніторингу. У зонах активних бойових дій зміни відбуваються нерівномірно, можуть мати імпульсний характер (вибухи), або поступовий (просідання ґрунту чи ерозійні процеси). Тому необхідні серії багатотемпоральних SAR-знімків, які дозволяють аналізувати динаміку розвитку руйнувань.

Загалом сучасні виклики моніторингу зруйнованих територій України демонструють, що традиційні методи є абсолютно недостатніми, а радарні з синтетичною апертурою разом з геоінформаційними системами формують сьогодні найбільш ефективну, оперативну та науково обґрунтовану основу для оцінки руйнувань, моделювання змін та підтримки рішень щодо відбудови. Саме тому питання застосування SAR-технологій у дослідженні територій, постраждалих від війни, набуває ключового значення та визначає стратегічний напрям розвитку інженерної геодезії в умовах відновлення держави.

1.2 Принцип роботи SAR

Принципи функціонування радарів із синтетичною апертурою (Synthetic Aperture Radar, SAR) ґрунтуються на використанні активного мікрохвильового випромінювання, яке дозволяє отримувати інформацію про земну поверхню

незалежно від часу доби, погодних умов або стану атмосфери. На відміну від оптичних супутникових систем, що реєструють відбите сонячне світло, SAR-системи формують власний електромагнітний сигнал, направляють його на поверхню та фіксують енергію, відбиту від об'єктів. Завдяки цьому SAR є одним із найнадійніших та найстабільніших методів спостереження територій у зонах конфліктів, де дим, хмарність, пожежі або руйнування можуть повністю закривати поверхню для оптичних датчиків. Сучасні дослідження підтверджують ключову роль SAR у вивченні урбанізованих та поствоєнних територій, особливо тих, які зазнали масштабних структурних трансформацій[3].

1.2.1 Фізика радіохвиль у SAR-системах

Основою роботи SAR є принцип розповсюдження та взаємодії мікрохвиль з поверхнею. Радар випромінює енергію у діапазоні сантиметрових або міліметрових хвиль. У випадку місії Sentinel-1 використовується С-діапазон із довжиною хвилі близько 5,6 см, що забезпечує оптимальний баланс між проникністю сигналу та чутливістю до змін мікрошорсткості поверхні. Коли мікрохвильовий сигнал досягає об'єкта, частина енергії поглинається, частина розсіюється, а частина повертається у вигляді зворотного відбиття. Це відбиття фіксується приймальною антеною супутника. Взаємодія хвилі із поверхнею визначається її діелектричною проникністю, структурою, формою та станом. Наприклад, волога поверхня повертає значно інтенсивніший сигнал, ніж суха; металеві конструкції формують яскраві точки на зображенні через ефект подвійного відбиття[4].

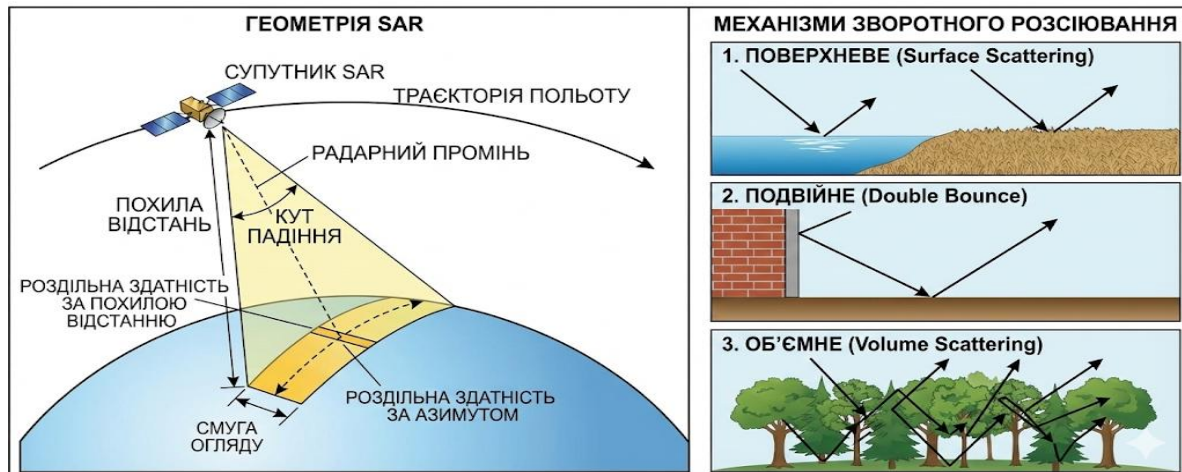


Рисунок 1.1 Геометричний принцип роботи SAR.

1.2.2 Амплітуда та фаза SAR-сигналу

SAR-зображення складається з двох фундаментальних компонентів: амплітуди та фази. Амплітуда відображає інтенсивність зворотного розсіювання та визначається енергією, яка повернулася до супутника. Вона є основою амплітудних методів аналізу, що застосовуються для виявлення руйнувань, оскільки різниця амплітуд до і після бойових дій містить інформацію про ступінь структурної деградації поверхні. Фаза SAR-сигналу включає інформацію про відстань між супутником і точкою на земній поверхні. Вона є циклічною величиною, яка коливається в межах $0-2\pi$ і змінюється залежно від мікроскопічної зміни положення об'єктів. Саме фаза дозволяє виконувати інтерферометричний аналіз (InSAR), визначати вертикальні або горизонтальні деформації земної поверхні з точністю до сантиметрів або навіть міліметрів. Особливо важливим це є для зон бойових дій, де вибухи можуть спричиняти просідання, розриви, зсуви та інші форми порушення ґрунтових масивів[4].

1.2.3 Геометричні спотворення SAR-зйомки

На відміну від оптичної фотографії, SAR-зображення формується у радарній системі координат, що призводить до появи характерних геометричних спотворень. Це явища foreshortening, layover та shadowing. Foreshortening виникає, коли нахилена до супутника поверхня здається стислою, оскільки ближні точки повертають сигнал раніше, ніж дальні. Layover спостерігається там, де верхня частина об'єкта відображається ближче до супутника, ніж нижня, що спричиняє накладання відбитих сигналів. Shadowing — область радіолокаційної тіні, у якій поверхня не відбиває сигнал, оскільки хвиля «не потрапляє» у заглиблені ділянки. У міських та післявоєнних умовах ці спотворення змінюють свій характер: через руйнування будівель та появу нерівномірного рельєфу виникають нові зони тіней, а уламки формують хаотичні повторні відбиття, що підсилюють ефект спектру. Геометричні викривлення становлять одну з ключових проблем під час аналізу SAR-даних у районах бойових дій, що підтверджено в численних роботах Європейського космічного агентства[4].

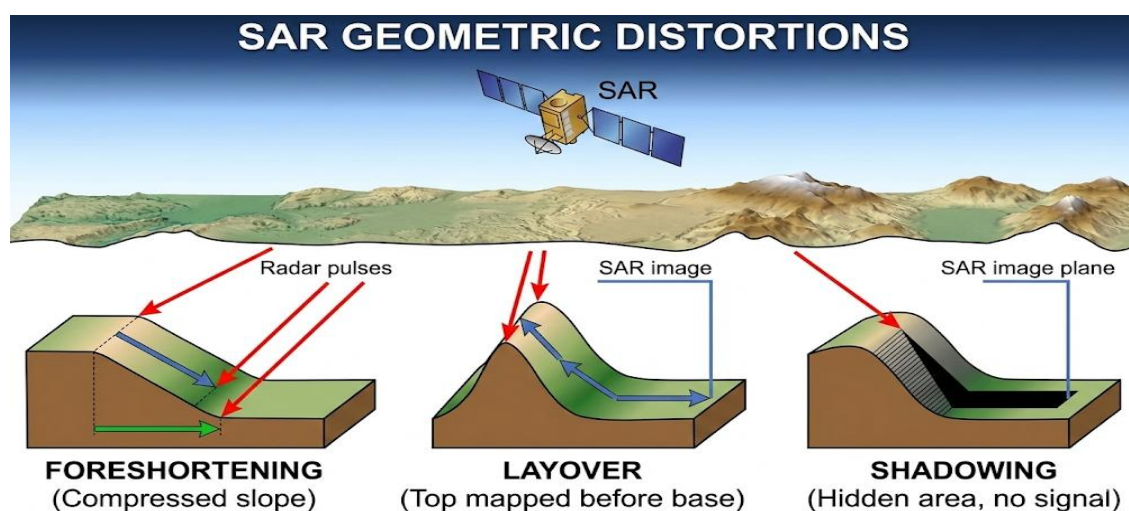


Рисунок 1.2 Основні геометричні спотворення SAR-зйомки (Foreshortening, Layover, Shadowing), спричинені боковою геометрією огляду.

1.2.4 Коефіцієнти зворотного розсіювання та їх значення для аналізу руйнувань

Основним вимірюваним параметром SAR-даних є коефіцієнт зворотного розсіювання, позначений σ^0 . Він відображає відношення інтенсивності відбитого сигналу до потужності випромінюваного імпульсу з урахуванням нормалізації за площею. Значення σ^0 є функцією шорсткості поверхні, її вологості, діелектричних властивостей, форми та орієнтації об'єктів. У зонах із масштабними руйнуваннями коефіцієнти зворотного розсіювання різко змінюються, оскільки уламки будівель, вигорілі конструкції та деформовані елементи інфраструктури формують складний мікрорельєф. Це призводить до збільшення інтенсивності зворотного сигналу, а хаотичне розташування уламків створює стохастичні патерни, які добре виявляються за допомогою алгоритмів різницевого аналізу ("before-after change detection")[3].

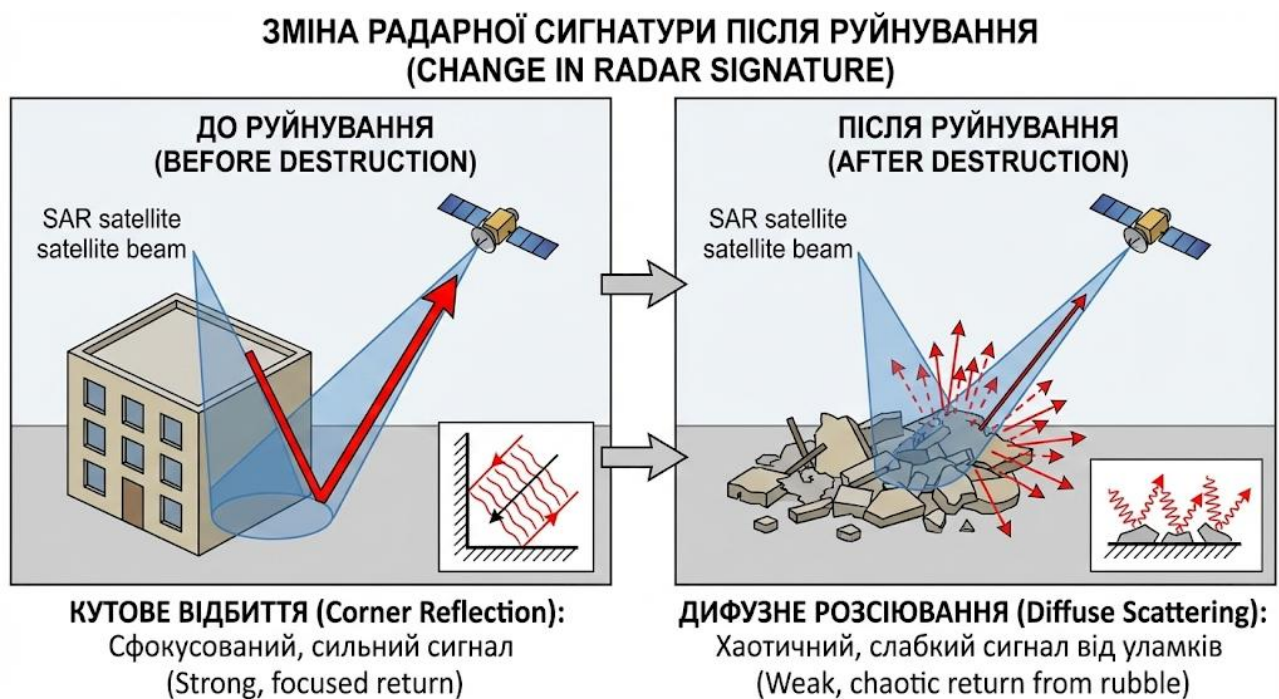


Рисунок 1.3. Зміна механізмів зворотного розсіювання SAR-сигналу в урбанізованому середовищі: від подвійного відбиття (до руйнування) до дифузного розсіювання (після руйнування).

Завдяки цим властивостям аналіз SAR-амплітуди та інтерпретація σ^0 дозволяють з високою надійністю виявляти зруйновані або пошкоджені ділянки навіть у випадках, коли оптична зйомка є недоступною. Радарний підхід, таким чином, забезпечує фундаментальну інформаційну основу для подальшого аналізу в рамках геоінформаційних систем, включаючи класифікацію ступеня руйнувань і формування картографічних моделей, що відображають просторову структуру пошкоджень.

1.3. Методи інтерферометрії (InSAR).

Інтерферометрія радарних знімків (InSAR) є одним із методів дистанційного зондування Землі, що дозволяє визначати деформації земної поверхні з високою точністю, шляхом порівняння фазових значень радарних сигналів, отриманих у різні моменти часу. На відміну від амплітудного аналізу, який дає змогу виявити лише структурні зміни або руйнування, інтерферометрія здатна реєструвати мінімальні вертикальні й горизонтальні зміщення ґрунту — інколи навіть у межах міліметрів. Це робить InSAR ключовим інструментом для вивчення техногенних і природних процесів, таких як просідання, зсуви, обвали, рухи ґрунтових мас і деформації міських територій. У контексті зон бойових дій, зокрема таких міст, як Мар'їнка, інтерферометричні методи дають змогу визначати характер змін, спричинених артилерійськими обстрілами, вибухами великої потужності та руйнуванням інфраструктури. Дослідження останніх років підтверджують високу ефективність інтерферометрії саме в постконфліктних територіях, де традиційні наземні методи вимірювання є неможливими[8].

1.3.1 Диференційний інтерферометричний аналіз (DInSAR)

Диференційний InSAR є базовим підходом, який порівнює два радарні знімки, отримані з однакових орбітальних положень, але в різні моменти часу. Основою методу є формування інтерферограми — різниці фаз між двома SAR-зображеннями. Після корекції впливу рельєфу шляхом застосування цифрової моделі висот формується диференційна інтерферограма, що містить інформацію виключно про зміни поверхні. У зонах, де відбулися вибухи, осідання ґрунту або деформації міської забудови, фаза змінюється, утворюючи характерні інтерферометричні фринжі, які сигналізують про величину та напрям зміщення. У випадку Мар'їнки, де інтенсивні бойові дії тривали тривалий період, диференційний InSAR є особливо цінним, оскільки дозволяє отримувати інформацію про осідання та підняття поверхні, викликані послідовними руйнуваннями та перебудовою техногенного ландшафту. Даний метод вже застосовувався у дослідженнях поствоєнних територій у Сирії, Лівії та Нагірному Карабасі, де він довів здатність фіксувати деформації у діапазоні сантиметрів навіть у випадках втрати когерентності сигналу[4].

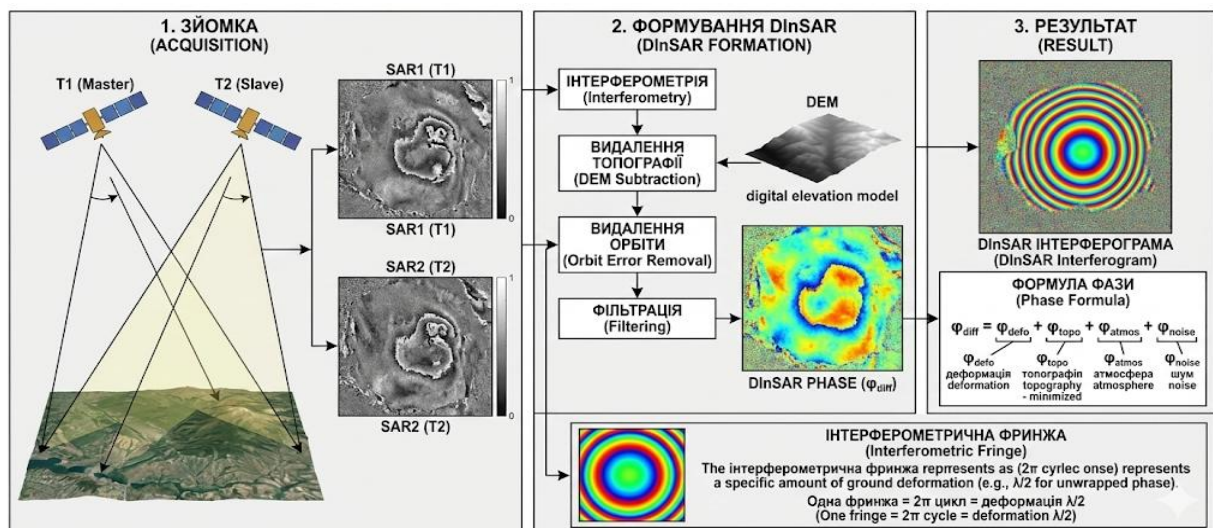


Рисунок 1.4. Принципова схема формування диференційної інтерферограми (DInSAR) та її компоненти.

1.3.2 Мультитчасовий InSAR

Мультитчасовий інтерферометричний аналіз передбачає використання серії SAR-знімків, що дозволяє отримувати інформацію про динаміку деформацій у часі. Цей метод компенсує обмеження диференційного підходу, який використовує лише два моменти спостережень. Мультитчасовий InSAR дає змогу простежити, як змінювалася поверхня протягом кількох місяців або років, що є особливо важливим у районах довготривалих бойових дій. Такий аналіз дозволяє уточнити характер деформацій: є вони імпульсними (вибух, руйнування будівель), періодичними (переміщення техніки, повторні обстріли) чи поступовими (деградація ґрунтів, накопичення уламків, інженерні зміни поверхні). Мультитчасовий підхід також покращує когерентність, оскільки використовує статистичну інформацію про фазу та може зменшувати вплив атмосферних перешкод. Застосування цього методу довело свою ефективність під час моніторингу деформацій у містах з високим рівнем руйнувань, включно з Алеппо, Мосулом та Хомсом[5].

1.3.3 Методи SBAS і PSI

Сучасні мультитчасові інтерферометричні технології включають два високоточні підходи — SBAS (Small Baseline Subset) та PSI (Persistent Scatterer Interferometry). Обидва методи використовуються у наукових дослідженнях останніх років та дозволяють досягати міліметрової точності у визначенні деформацій поверхні, що робить їх одними з найбільш потужних аналітичних інструментів у радарній геодезії.

Метод SBAS передбачає побудову мережі інтерферограм з малими базовими відстанями між знімками, що суттєво покращує когерентність та знижує вплив атмосферних завад. Він є ефективним у випадках, коли поверхня зазнає нерівномірних або частково хаотичних змін, характерних для зон бойових дій. SBAS дозволяє отримати так звану часову «поверхню

деформацій», що відображає, як змінювалась територія протягом значного періоду часу[10].

Метод PSI, навпаки, базується на виявленні стійких відбивачів — точок, які на всіх знімках демонструють стабільні фазові характеристики. Часто такими точками є конструкції з металу, бетонні елементи або техногенні структури. У зруйнованих містах PSI може ефективно працювати навіть тоді, коли частина території втратила когерентність, оскільки завжди зберігається певна кількість елементів, здатних постійно відбивати радарний сигнал. Обидва методи активно застосовуються Європейським космічним агентством та входять до складу сучасних алгоритмів мультичасового аналізу Sentinel-1[9].

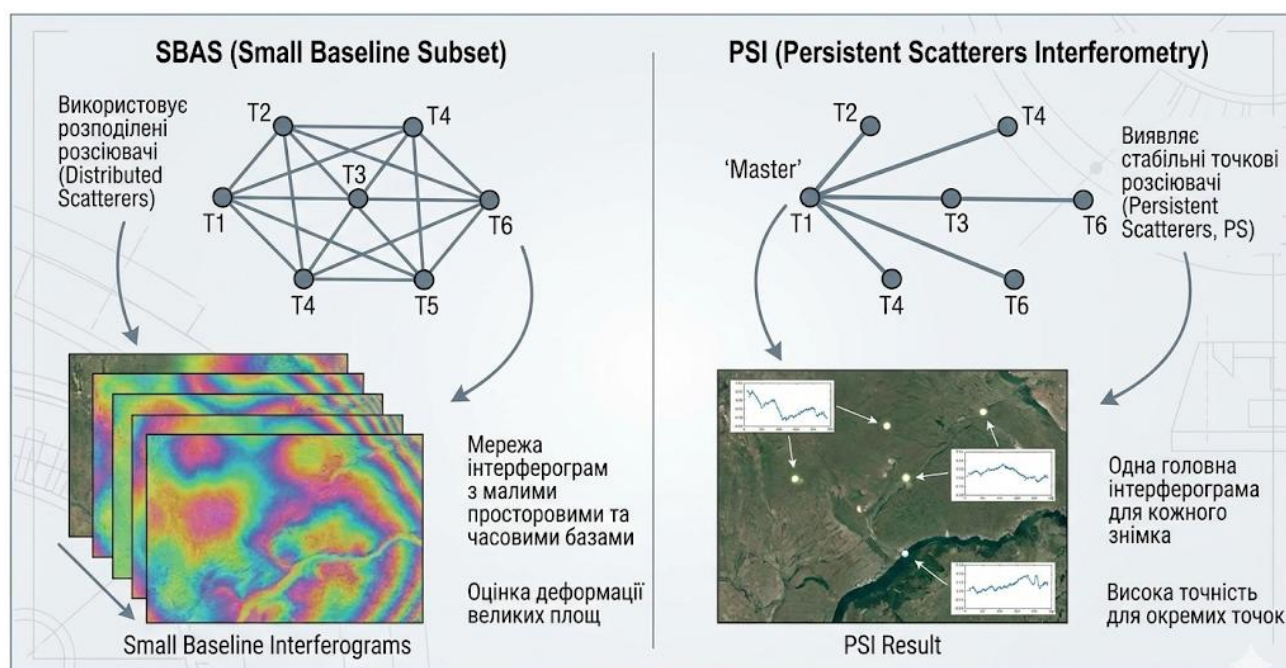


Рисунок 1.5. Концептуальні відмінності багаточасових методів InSAR: SBAS (мережі малих баз) та PSI (постійні розсіювачі).

У цілому, інтерферометричні методи формують критично важливу складову супутникового моніторингу поствоєнних територій. Вони дозволяють не лише зафіксувати факт руйнування або зміни структури міського середовища, але й встановити, чи відбувалися зміни рельєфу, ґрунтових мас та

інженерних об'єктів. У місцях, де рівень руйнувань досягає максимальних значень, як у Мар'їнці, інтерферометрія виступає одним із найважливіших джерел інформації, яке дозволяє оцінити стабільність території та визначити потенційно небезпечні для відбудови ділянки.

1.4 Дані Sentinel-1 для моніторингу деформацій.

Супутникові дані місії Sentinel-1 є одним із ключових джерел інформації для моніторингу деформацій земної поверхні, міських структур та техногенно трансформованих ландшафтів, особливо у контексті зон бойових дій, таких як Мар'їнка. Місія була розроблена Європейським космічним агентством у рамках програми Copernicus і складається з двох супутників — Sentinel-1A та Sentinel-1B (другий станом на 2024 рік виведений з експлуатації через технічну несправність). Незважаючи на це, Sentinel-1A продовжує забезпечувати стабільний потік радарних даних, які широко застосовуються у геодезичних, моніторингових і картографічних дослідженнях.

Особливо важливою характеристикою даних Sentinel-1 є можливість їхнього безкоштовного й необмеженого доступу, що робить цю місію однією з найпріоритетніших для наукових праць у сфері моніторингу територій в Україні. Дані SAR цієї місії підтримуються великим набором інструментів для обробки — від ESA SNAP до програмних пакетів Python, що дозволяє легко інтегрувати їх у геоінформаційні системи та алгоритми аналізу[9].

1.4.1 Режими зйомки Sentinel-1 та їх застосування у міських руйнуваннях

Sentinel-1 працює у декількох режимах зйомки, однак найбільш цінним для моніторингу міських територій є режим Interferometric Wide Swath (IW). Він забезпечує достатньо високу просторову роздільну здатність та підтримує поліцільовий огляд великої території. Режим IW використовує технологію Terrain Observation by Progressive Scans (TOPSAR), що дає змогу зменшувати внутрішньосмугові спотворення та отримувати стабільніше фазове поле для інтерферометричного аналізу. Це має суттєве значення для робіт, у яких проводиться аналіз деформацій на складному міському рельєфі, характерному для зруйнованих міст Донеччини. Крім IW, місія підтримує режими Extra Wide Swath (EW) та Stripmap (SM). Проте для досліджень, орієнтованих на моніторинг руйнувань, деформацій і стану міських об'єктів, основним є саме IW завдяки оптимальному співвідношенню між роздільністю та площею охоплення[9].

1.4.2 Параметри продуктів Sentinel-1 та їх придатність для інтерферометрії

Sentinel-1 надає кілька типів продуктів, проте для завдань інтерферометрії та аналізу руйнувань застосовуються переважно SLC (Single Look Complex) та GRD (Ground Range Detected). Продукти SLC містять як амплітуду, так і фазу сигналу у комплексній формі, що робить їх незамінними для виконання інтерферометричного аналізу, SBAS- та PSI-процесингу. Саме SLC дозволяє обчислювати точні деформаційні зміни за допомогою фазових різниць.

Продукти GRD, навпаки, не містять фазових значень, однак мають високий рівень радіометричної стабільності. GRD широко застосовуються у задачах виявлення руйнувань методом зміни амплітудного зворотного розсіювання, що є корисним у ситуаціях з різким руйнуванням об'єктів

інфраструктури. У випадку Мар'їнки, де більшість будівель було зруйновано, GRD-дані можуть відображати хаотичний характер уламкових структур, збільшення радіометричного шуму та формування областей з високим коефіцієнтом зворотного розсіювання.

Таблиця 1.2. Порівняння ключових типів продуктів Sentinel-1 для завдань моніторингу руйнувань.

Характеристика	SLC (Single Look Complex)	GRD (Ground Range Detected)
Вміст даних	Амплітуда + Фаза (комплексні)	Лише Амплітуда
Основне застосування	InSAR, DInSAR, SBAS, PSI	Амплітудний аналіз змін, класифікація
Геометрія	Радарна (потребує геометричної корекції)	Картографічна (скоригована)
Роздільність	Вища, залежить від методу	Нижча (після усереднення), ~10 м
Придатність для Мар'їнки	Низька (через втрату когерентності)	Висока (для амплітудного аналізу руйнувань)

1.4.3 Просторове розділення та його значення

Просторова роздільна здатність IW-режиму Sentinel-1 становить приблизно 5×20 метрів у радарній геометрії, що після орторектифікації трансформується у значення близько 10 метрів у плановій геометрії. Така роздільність оптимальна для виявлення змін у структурі міського середовища на масштабах кварталу, вулиці або групи будівель. Хоча Sentinel-1 поступається за деталізацією високоточним X-діапазонним радарним місіям, його регулярність і доступність роблять дані надзвичайно важливими для

довготривалого моніторингу, що необхідно для оцінки змін, спричинених бойовими діями.

1.4.4 Радіометричне розділення та стабільність

Sentinel-1 характеризується високою радіометричною стабільністю, що дозволяє проводити коректний аналіз зміни інтенсивності σ^0 у часових рядах. Радіометрична стабільність є необхідною умовою для застосування методів виявлення руйнувань, оскільки кожна зміна, зафіксована на зображеннях, має бути пов'язана з реальними фізичними змінами об'єкта, а не з варіаціями приладу. Це є особливо важливим для поствоєнних територій, де інтенсивність руйнувань може змінюватися нерівномірно та потребує точного відмежування техногенних та природних змін. Дослідження останніх років доводять, що Sentinel-1 забезпечує одне з найкращих у своєму класі значень стабільності, що дозволяє використовувати його як у загальних моніторингових задачах, так і в наукових процесах, орієнтованих на моделювання динаміки руйнувань.

1.4.5 Значення Sentinel-1 для моніторингу деформацій у зоні бойових дій

У контексті міста Мар'їнка дані Sentinel-1 мають особливе значення з кількох причин. Передусім регулярність зйомки (кожні 6–12 днів залежно від полоси покриття) дозволяє відстежувати зміни, які відбувалися під час активної фази бойових дій, а також у перехідний період, коли можливі просідання, зсуви або зміни структури поверхні через накопичення руїн. Висока чутливість фазового сигналу дозволяє фіксувати деформації навіть тоді, коли візуально територія виглядає повністю зруйнованою. Радарні дані також є незамінними там, де оптичні знімки стають неінформативними через дим, обвалені

конструкції, погодні умови або високий рівень задимлення, характерний для зони бойових дій.

Завдяки поєднанню широкої смуги огляду, стабільності, регулярності та високої точності, Sentinel-1 став основною платформою для оцінки деформаційної динаміки на території України після 2022 року. Дані цієї місії активно використовуються як українськими науковими установами, так і міжнародними дослідницькими групами, що підтверджується численними дослідженнями у фахових виданнях 2022–2024 років[10].

1.5. Обмеження та похибки SAR-даних

Незважаючи на виняткові можливості супутникових радарних систем, дані SAR мають низку фізичних, геометричних та методологічних обмежень, які впливають на точність аналізу, інтерферометричну стабільність та коректність інтерпретації. У зонах бойових дій ці обмеження проявляються з особливою силою, оскільки зруйноване середовище, наявність уламків, складний мікрорельєф, пожежі, вибухи та постійні зміни структури поверхні різко знижують когерентність сигналу. Тому правильна оцінка похибок є фундаментальною умовою для достовірного аналізу деформацій, руйнувань і динаміки техногенних змін[4].

Таблиця 1.3. Класифікація основних обмежень та похибок SAR-даних для моніторингу в зонах конфліктів.

Джерело похибки	Тип впливу/Причина	Наслідки для InSAR/Амплітудного аналізу	Механізми компенсації/Мітігації
Атмосферні впливи	Варіації тиску, температури, вологості (тропосфера) та електронної концентрації (іоносфера) ¹ .	Штучні фазові зсуви, що імітують вертикальні переміщення; поява фазових "смуг" у InSAR ² .	Мультичасові алгоритми (SBAS/PSI), які використовують статистику фази; статистичні моделі атмосферної затримки; використання GPS-даних.
Геометричні спотворення	Layover, Foreshortening, Shadowing — наслідок бокової геометрії зйомки та наявності вертикальних структур і кратерів ³ .	Локальна втрата сигналу (радарні тіні); значні помилки у геокодуванні; зниження когерентності на нахилених поверхнях ⁴ .	Точна орбітальна корекція; Range-Doppler корекція; використання високоточної ЦМР (DEM) для орторектифікації.
Мультипути та повторні відбиття	Непряме відбиття сигналу від уламкових полів, металевих конструкцій, нерівних вертикальних поверхонь.	Спотворення фази та амплітуди, що не відповідають реальним умовам; збільшення рівня спекл-шуму та труднощі у виділенні стабільних PS-точок.	Спеціалізовані фільтри для зниження спеклу (Lee Sigma, Goldstein); використання PS-методу, орієнтованого на <i>точкове</i> розсіювання, а не площинне.
Шум та втрати когерентності	Спекл-шум; хаотична структура уламкових поверхонь; швидкі, масові та нерівномірні руйнування у часі.	Повна втрата фазової складової, що унеможлиблює визначення деформацій (тотальна декореляція); деградація SBAS/PSI.	Перехід до амплітудних методів ; фільтрація інтерферограми (Goldstein); використання масок когерентності.
Перешкоди міського середовища	Поєднання великої кількості неоднорідних вертикальних і техногенних структур (бетон, арматура, метал), які сильно змінюються після руйнувань.	Неконтрольовані, складні відбиття; ускладнення інтерпретації, посилення спеклу та мультипутів.	Застосування поляриметричних методів (аналіз VV та VH); використання мультичастотних моделей SAR; залучення додаткових джерел (оптичні дані) для валідації.

1.5.1 Атмосферні впливи

Одним із найвагоміших джерел похибок є варіації в атмосфері, передусім у тропосфері та іоносфері. Тропосферні зміни — це флуктуації тиску, температури та вологості, які впливають на швидкість поширення електромагнітної хвилі. Ці зміни можуть призводити до штучних фазових зсувів, що імітують вертикальні переміщення поверхні. У поствоєнних районах, де поверхня нагрівається нерівномірно через наявність відкритих пожеж, обгорілих конструкцій чи великих ділянок без рослинності, тропосферний вплив може бути ще виразнішим.

Іоносферні спотворення, навпаки, пов'язані з варіаціями електронної концентрації у верхніх шарах атмосфери. Хоча вплив іоносфери менший у С-діапазоні Sentinel-1, на території України, особливо в період високої сонячної активності у 2023–2024 роках, він може спричиняти фазові "смути", що погіршують точність інтерферометрії. Методи компенсації включають використання мультитимових алгоритмів, статистичних моделей тропосферної затримки та моделей високої роздільності, однак жоден із них не повністю усуває похибку[4,5,23].

1.5.2 Геометричні особливості зйомки

Геометрія SAR спричиняє спотворення, що впливають на можливість точно відобразити об'єкти складної структури. До таких явищ належать радарна тінь, ефект layover та foreshortening. У міських умовах, де будівлі мають значну висоту і складну форму, ці ефекти значно посилюються. У Мар'їнці, де більшість будівель були частково або повністю зруйновані, уламки можуть створювати нові, хаотично розташовані радартіні, що робить деякі ділянки повністю невидимими для SAR-систем.

Крім того, на ділянках з великими кратерами від вибухів спостерігається ефект тінювання, коли радар не отримує інформації з нижніх частин кратера. Геометричні похибки також проявляються під час формування інтерферограм, оскільки різні кути огляду та масштаб руйнувань зумовлюють зниження когерентності та втрату фазової інформації, що є критичним для методів SBAS та PSI[24].

1.5.3 Мультипути та повторні відбиття

Мультипути — явище повторного або непрямого відбиття сигналу від навколишніх об'єктів до приймача. У зруйнованих містах рівень мультипутів значно зростає, оскільки уламкові поля, металеві конструкції, нерівномірні вертикальні поверхні та хаотичні об'єкти створюють різноманітні траєкторії поширення хвиль. Як наслідок, фаза сигналу спотворюється, а амплітуда змінюється у спосіб, який не відповідає реальним умовам поверхні. Це призводить до збільшення рівня спеклу, появи інтенсивних точкових відбивачів та труднощів у виділенні стабільних фіксажів для методу PSI.

У Мар'їнці після масштабних артилерійських та авіаційних ударів руйнування створили складний мікрорельєф, через що мультипути стають одним із домінуючих джерел радіолокаційного шуму.

1.5.4 Шум та втрати когерентності

Шум у SAR-зображеннях — природне явище через когерентну природу радарного сигналу. У складних урбанізованих районах рівень шуму збільшується внаслідок спеклу, викликаного взаємодією хвилі з великою кількістю дрібних об'єктів. Однак на поствоєнних територіях рівень шуму зростає в рази через хаотичні уламкові поверхні, відкриті ділянки ґрунту та відсутність стабільних відбивачів. Втрата когерентності є одним із найсерйозніших обмежень для інтерферометрії, оскільки вона призводить до

повної втрати фазової складової, що унеможлиблює визначення деформацій. Це особливо характерно для районів, де руйнування були швидкими, масовими та нерівномірними.

У випадку Мар'їнки втрата когерентності є майже тотальною у більшості кварталів міста, за винятком окремих техногенних об'єктів та фрагментів укріплень, які залишилися відносно стабільними.

1.5.5 Перешкоди у міських середовищах

Міські локації створюють один із найскладніших типів радарного середовища. Тут поєднуються велика кількість вертикальних структур, неоднорідних поверхонь, техногенних матеріалів та об'єктів із високою діелектричною проникністю. Металеві конструкції, бетон, арматура, автомобільні шасі, уламки мостів і будівель — усе це призводить до неконтрольованих відбиттів, які ускладнюють інтерпретацію SAR-зображень. У районах бойових дій проблема ускладнюється ще більше, оскільки значна частина міського ландшафту повністю змінюється у короткий часовий проміжок. З огляду на це, інтерферометричний аналіз у таких умовах часто потребує додаткової фільтрації, використання мультичастотних моделей і залучення альтернативних джерел даних.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТРАНСФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ В ЗОНАХ КОНФЛІКТУ

2.1 Методологічні принципи супутникового радарного моніторингу змін земної поверхні та обґрунтування вихідних даних.

Розвиток методів супутникового радарного зондування Землі зумовив формування окремого напрямку наукових досліджень, спрямованих на вивчення просторово-часових змін земної поверхні в умовах інтенсивних природних і антропогенних впливів. Особливої актуальності ці методи набули в контексті військових дій, коли традиційні геодезичні та оптичні методи спостережень є обмеженими або повністю недоступними. У таких умовах саме технології SAR та InSAR забезпечують можливість системного, регулярного та незалежного моніторингу деформацій земної поверхні, зокрема в межах урбанізованих територій, що зазнали масштабних руйнувань.

Методологічна складова дослідження змін земної поверхні полягає не лише у виборі джерел даних, а й у формуванні логічно послідовного алгоритму їх аналізу, інтерпретації та інтеграції у геоінформаційне середовище. В умовах відсутності повноцінних наземних вимірювань ключового значення набуває теоретичне обґрунтування кожного етапу аналізу, визначення його обмежень, похибок та умов коректного застосування.

Методологія супутникового радарного моніторингу ґрунтується на поєднанні фізичних принципів поширення електромагнітних хвиль,

математичних методів обробки сигналів та геоінформаційних підходів до просторового аналізу. На відміну від оптичних методів дистанційного зондування, SAR-зйомка забезпечує активне випромінювання сигналу та реєстрацію зворотного розсіювання, що дозволяє отримувати інформацію незалежно від освітлення та метеорологічних умов.

Ключовим методологічним принципом радарного моніторингу є аналіз фазової складової сигналу, яка містить інформацію про відстань між антеною супутника та елементами земної поверхні. Зміна цієї відстані у часі, зафіксована на основі серії радарних знімків, дозволяє виявляти міліметрові та сантиметрові деформації, що є недосяжним для більшості традиційних методів спостережень.

Методологія InSAR передбачає формування інтерферограм шляхом попарного зіставлення радарних зображень, отриманих з близьких орбітальних позицій. У результаті інтерференції фазових сигналів формується картина відносних зміщень поверхні, яка відображає як реальні деформаційні процеси, так і впливи атмосфери, орбітальних похибок та шумів. Саме тому важливою складовою методології є етап корекції та фільтрації інтерферометричних даних.

Для територій, що зазнали військових дій, методологічні принципи SAR-моніторингу доповнюються необхідністю врахування специфіки міського середовища. Руйнування будівель, зміна геометрії поверхні, поява нових об'єктів та фрагментація забудови суттєво впливають на характер зворотного розсіювання сигналу. У зв'язку з цим інтерпретація результатів InSAR повинна здійснюватися з урахуванням містобудівного контексту та типології об'єктів[1].

Окремим принципом методології є інтеграція результатів радарного аналізу в середовище геоінформаційних систем. Це дозволяє здійснювати просторове зіставлення деформаційних зон з адміністративними межами, елементами інфраструктури, транспортною мережею та іншими просторовими

об'єктами. Такий підхід формує основу для подальшого використання результатів у системах просторового планування та післявоєнної відбудови територій.

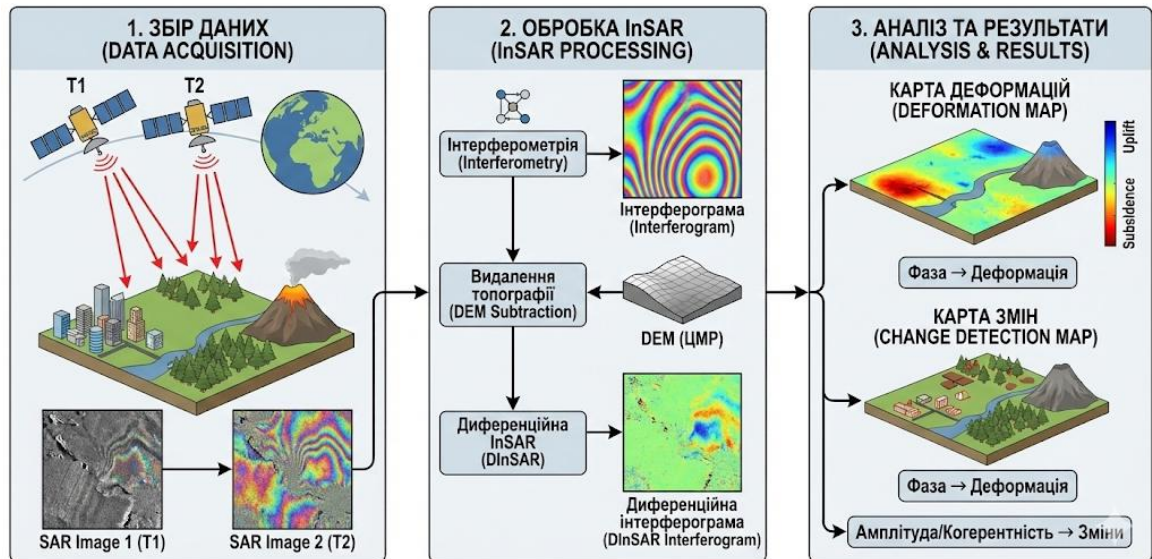


Рисунок 2.1 Концептуальна схема SAR/InSAR-моніторингу змін земної поверхні

Ефективність дистанційного моніторингу урбанізованих територій, що зазнали інтенсивних бойових дій, критично залежить від вибору системи дистанційного зондування, здатної функціонувати в умовах, які унеможливають застосування традиційних методів. У ситуації, що склалася на території Мар'їнки, де спостерігаються часті димові завіси, хмарність та повна відсутність можливості наземних вимірювань, активні радарні системи (SAR) набувають статусу єдиного можливого та пріоритетного джерела оперативної інформації. Використання місії Sentinel-1 Європейського космічного агентства, що функціонує у С-діпазоні з довжиною хвилі приблизно 5.6 см, дозволяє проводити регулярні спостереження незалежно від часу доби та атмосферних умов[23].

Для повноцінного аналізу трансформацій земної поверхні застосовуються два типи радарних продуктів, що отримуються в режимі Interferometric Wide Swath (IW). Продукти SLC (Single Look Complex), що містять повну фазову та амплітудну інформацію, використовуються для інтерферометричних спроб виявлення деформацій. Водночас продукти GRD (Ground Range Detected), які містять лише калібровану амплітуду (коефіцієнт зворотного розсіювання), є основою для більш стійкого до руйнувань амплітудного аналізу. Методична доцільність використання саме Sentinel-1 також підкріплена наявністю великого архіву сцен за період 2018–2025 років, що дозволяє формувати багатотемпоральні серії для порівняльного аналізу «до» та «після» масштабних руйнувань, які відбулися після 2022 року[9].

2.2 Методика попередньої обробки SAR-даних.

Коректність фінальних аналітичних продуктів безпосередньо залежить від ретельності та стандартизації процедур попередньої обробки SAR-даних, оскільки сирі знімки містять значні радіометричні та геометричні спотворення, що не пов'язані з фізичними змінами поверхні. Методика передбачає сувору послідовність кроків, адаптовану для забезпечення максимальної порівнянності сцен у часовому ряді.

Спочатку формується добірка GRD та SLC сцен виключно з одного орбітального треку та однієї поляризації (переважно VV), що є необхідною умовою для мінімізації геометричних похибок і забезпечення коректного співставлення. Потім здійснюється застосування точних орбітальних даних

(Precise Orbit Ephemerides), що дозволяє компенсувати зміщення супутника під час зйомки та підвищує точність позиціювання до міліметрового рівня, що критично важливо для інтерферометрії.

Наступним обов'язковим етапом є радіометрична корекція, спрямована на усунення теплового шуму та перетворення сирих амплітудних значень у фізично інтерпретований коефіцієнт зворотного розсіювання. Даний параметр відображає інтенсивність відбиття мікрохвиль від поверхні, що робить його придатним для коректного порівняння різних сцен незалежно від внутрішніх параметрів радара. Фіналізація попередньої обробки включає геометричну корекцію[3].

2.3 Реалізація радіометричної та геометричної корекції SAR-даних у SNAP

Обробка SAR-даних виконується у стандартизованому для місії Copernicus середовищі ESA SNAP (Sentinel Application Platform). Основним завданням цього етапу є створення високоякісних, фізично коректних і просторово прив'язаних растрових шарів.

Після імпорту сцен та застосування точних орбітальних даних, обов'язково виконується компенсація внутрішнього теплового шуму (Thermal Noise Removal). Ключовою процедурою є радіометричне калібрування (Calibration), яке переводить амплітуду зображення у децибелі (дБ), що дозволяє порівнювати сцени у часовому ряді. Далі для підвищення якості зображень застосовується фільтрація спеклу, зокрема фільтр Lee Sigma, який є

оптимальним для міських територій, оскільки він ефективно згладжує інтерференційний шум, зберігаючи при цьому гострі контури, що формуються на межах руйнувань.

Фінальна Range-Doppler Terrain Correction забезпечує геометричну корекцію. Цей процес використовує високоточну цифрову модель рельєфу (Copernicus DEM 30 м) для усунення радарних спотворень, таких як Layover та Foreshortening, які виникають через бокову геометрію зйомки. Орторектифікація трансформує радарну геометрію у картографічну проєкцію UTM Zone 37N (EPSG:32637), що є необхідною умовою для інтеграції радарних даних у ГІС-середовище. Після цих кроків GRD-продукти готові до амплітудного аналізу.

2.4 Обґрунтування вибору полігону дослідження: Мар'їнка як техногенно-трансформований об'єкт.

Територія міста Мар'їнка Донецької області є надзвичайно цінною для методологічного дослідження, оскільки вона представляє собою унікальний приклад тотальної деструкції урбанізованої інфраструктури, що практично виключає можливість застосування класичних SAR-методів. Рівень руйнувань, що оцінюється майже у 100%, перетворив місто на складний техногенно-трансформований ландшафт.

У довоєнний період забудова Мар'їнки, як і інших міст, формувала регулярні патерни радарного відбиття: вертикальні стіни та рівні дахи створювали сильне подвійне відбиття, яке було основою для фазової стабільності. Однак після 2022 року, коли внаслідок бойових дій з'явилися

десятки тисяч вирв, а будинки перетворилися на хаотичні уламкові поля, ці патерни були повністю знищені. Це призвело до значного зростання мікрорельєфної шорсткості та формування нерегулярного дифузного розсіювання, що є критичним фактором для радарної інтерпретації.



Рисунок 2.2 Ілюстрація адміністративних меж міста Мар'їнка.

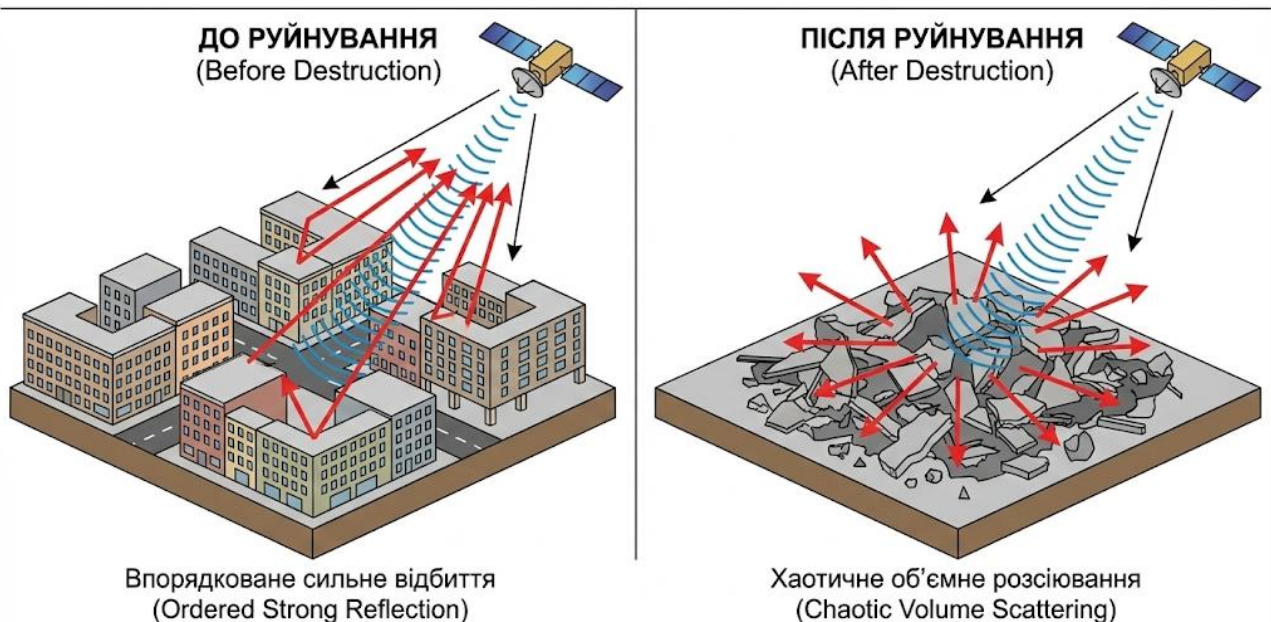


Рисунок 2.3 Принципова відмінність механізмів зворотного розсіювання SAR-сигналу над неушкодженою та зруйнованою міською забудовою.

Ця екстремальна зміна поверхні надає можливість чітко обґрунтувати пріоритетність амплітудного аналізу над інтерферометрією. Відсутність житлової та господарської діяльності у післявоєнний період також усуває сезонні антропогенні зміни, дозволяючи зосередитися виключно на структурній деградації, спричиненій військовими діями. Таким чином, Мар'їнка виступає як ідеальний науковий полігон для верифікації та адаптації SAR-методології.

2.5 Критичний аналіз інтерферометричних методів (DInSAR, SBAS, PSI)

Інтерферометрія радарних знімків є найточнішим методом вимірювання деформацій поверхні, але його застосування в умовах Мар'їнки стикається з фундаментальними фізичними обмеженнями. Методологічна частина роботи включала спробу застосування диференційного (DInSAR) та мультичасових методів (SBAS, PSI) для оцінки геодинамічних змін, спричинених вибухами та обваленнями.

DInSAR-аналіз, що ґрунтується на порівнянні фази двох SLC-зображень, виявив повну втрату фазової когерентності на більшості міської території. Когерентність — це міра фазової стабільності сигналу; її значення нижче 0.2 свідчить про хаотичні зміни на поверхні, що перевищують половину довжини хвилі радара (тобто більше 2.8 см). У Мар'їнці цей показник у більшості кварталів був наближений до нуля.

Подальша спроба застосування високоточних мультичасових методів, а саме PSI (Persistent Scatterer Interferometry), виявилася практично неможливою.

Метод PSI вимагає наявності стабільних радарних розсіювачів (PS-точок) протягом усього періоду спостереження. Масштабна деструкція будівель, обвалення каркасів та переміщення уламкового матеріалу призвели до того, що PSI-алгоритм не зміг знайти достатньої кількості стабільних точок для формування коректного часового ряду деформацій. Кількість знайдених PS-точок на квадратний кілометр була критично низькою (менше 5), тоді як для надійного аналізу міських територій необхідні десятки таких точок[16].

Аналогічно, SBAS (Small Baseline Subset), хоча й є більш стійким до низької когерентності, не зміг сформувати достатньо пов'язаних інтерферограм для побудови неперервного поля деформацій.

Висновок, отриманий із цих спроб, є критично важливим: повна деградація урбанізованого середовища перетворює територію на «інтерферометрично мертву зону», і сама неможливість застосування PSI/SBAS є найсильнішим індикатором абсолютного рівня руйнувань. Цей результат методологічно обґрунтовує необхідність переходу до амплітудного аналізу як основного інструменту дослідження.

2.6 Розробка та деталізований алгоритм амплітудного аналізу змін (GRD).

З огляду на непридатність фазових методів, основна методологічна увага була зосереджена на розробці алгоритму виявлення змін (Change Detection) на основі амплітудних GRD-продуктів. Амплітудний аналіз є стійким до втрати фазової когерентності, оскільки фокусується лише на інтенсивності зворотного розсіювання.

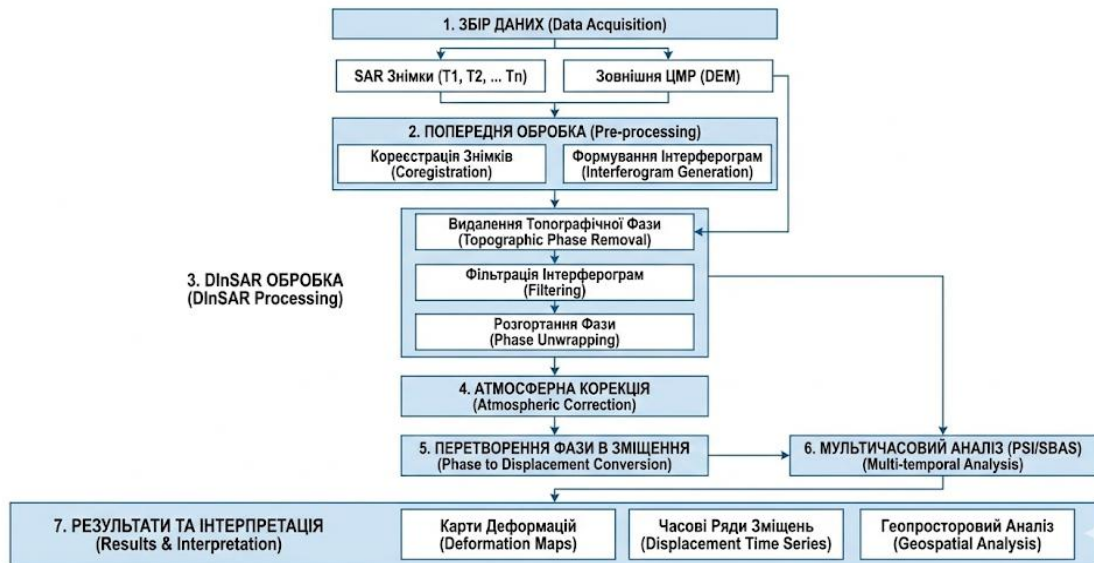


Рисунок 2.4 Загальний алгоритм InSAR моніторингу.

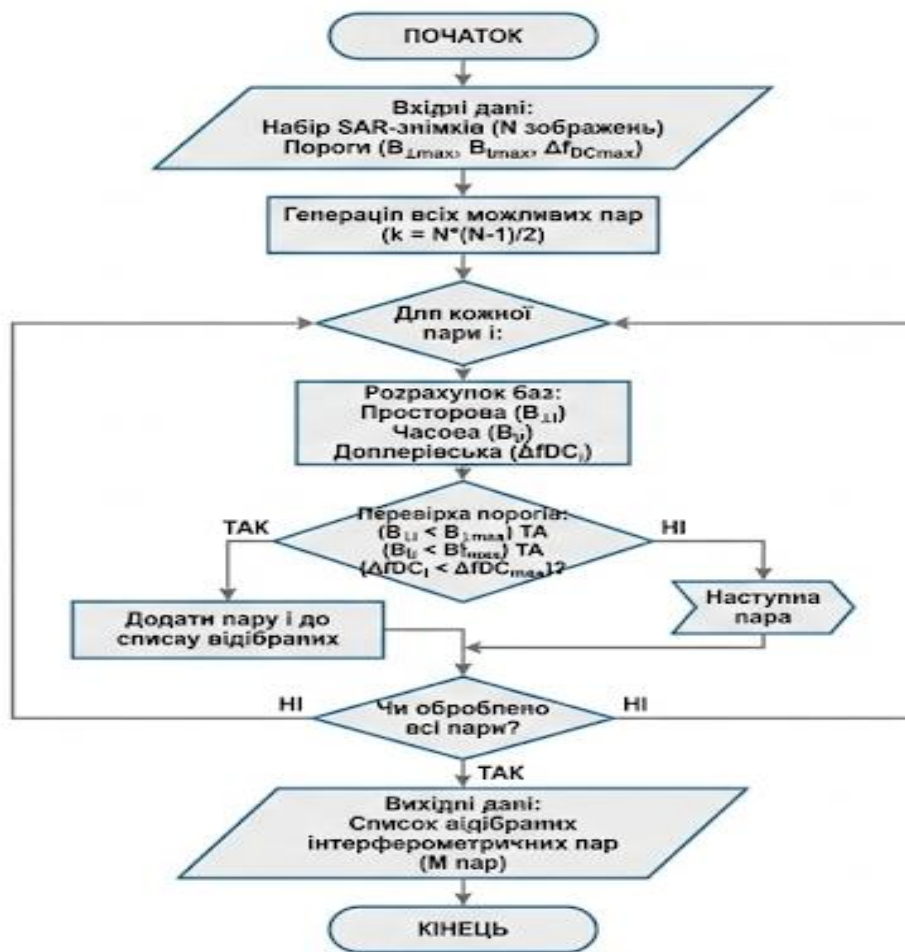


Рисунок 2.5 Алгоритм відбору інтерферометричних пар.

2.6.1 Принципи виявлення змін за амплітудою.

Базовим інструментом є метод різницевих амплітудних зображень, який кількісно відображає зміну коефіцієнта зворотного розсіювання між двома часовими зрізами, а саме довоєнним та післявоєнним. Відповідно, позитивні значення даного показнику свідчать про збільшення радіолокаційної яскравості. Це типово пов'язано з появою хаотичних, шорстких уламкових полів, які сприяють дифузному розсіюванню сигналу. Негативні значення в свою чергу вказують на зменшення яскравості, що може бути результатом повного зникнення вертикальних структур, які раніше створювали сильне подвійне відбиття. Відповідно аналіз розподілу дозволяє виділити просторові патерни руйнувань, де високі абсолютні значення відповідають зонам максимальної трансформації[6].

2.6.2 Застосування коефіцієнта варіації (CoV)

Для підвищення надійності виявлення руйнувань, особливо в умовах значного спекл-шуму та хаотичності, використовується статистичний індикатор — Коефіцієнт Варіації амплітуди (Coefficient of Variation, CoV)]. Цей індикатор розраховується як відношення стандартного відхилення амплітуди до її середнього значення у часовому ряді для кожного пікселя. Його високе значення свідчить про високу часову нестабільність інтенсивності зворотного розсіювання, що є прямим індикатором інтенсивного руйнування, переміщення уламків та структурної деградації поверхні. На стабільних ділянках даний коефіцієнт є низьким, тоді як у зонах бойових дій він різко зростає[11,12].

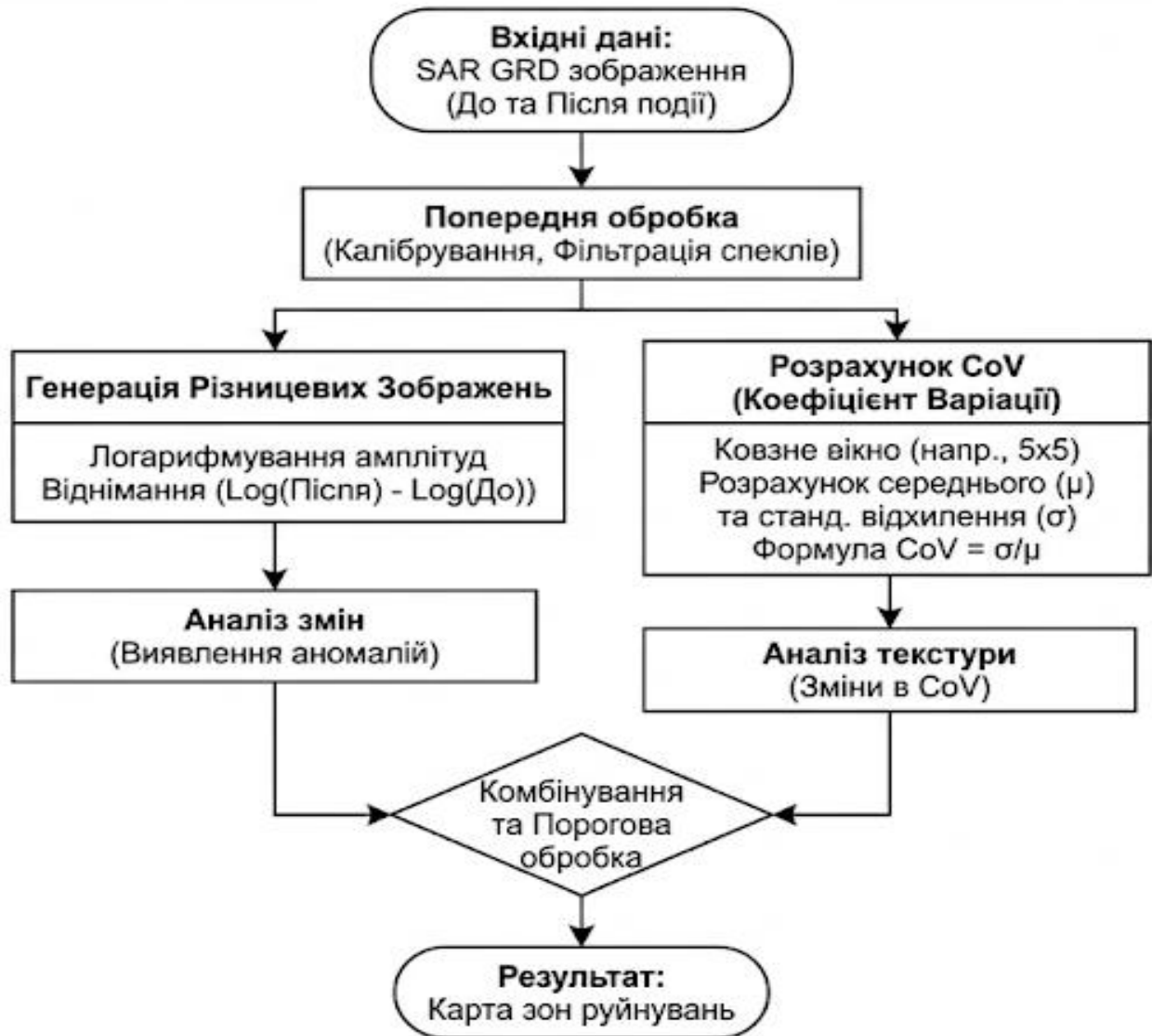


Рисунок 2.6 Алгоритм виявлення зон руйнувань на основі амплітудного аналізу (GRD) та Коефіцієнта Варіації (CoV).

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ГІС-ІНТЕГРАЦІЯ

3.1 Синтез аналітичних результатів та оцінка радарної сигнатури зруйнованої території

Комплексна інтерпретація отриманих даних, що базується на розробленій у попередніх розділах методиці та фундаментальних принципах радарної геодезії, дозволила сформувати цілісну та науково обґрунтовану картину просторової трансформації міського середовища Мар'їнки. Проведений аналіз радарних індикаторів переконливо засвідчив, що руйнування інфраструктури в межах досліджуваного полігону набули такого катастрофічного масштабу, що це знайшло своє відображення у радикальній зміні всіх без винятку характеристик відбитого сигналу. Цей феномен у сучасній науковій літературі класифікується як концепція «тотальної структурної декогерентності», що описує стан поверхні, за якого повністю втрачається фазова стабільність відбитого електромагнітного імпульсу.

Критичний аналіз результатів застосування інтерферометричних методів, зокрема DInSAR, SBAS та PSI, який було детально розглянуто у методичній частині роботи, дає підстави стверджувати, що фіксована повна втрата когерентності на переважній частині міської території є не технічною помилкою, а прямим і найбільш точним кількісним індикатором структурної нестабільності. Фізична природа цього явища полягає у тому, що внаслідок бойових дій відбувається постійне переміщення розсіюючих елементів у межах роздільної здатності радарного пікселя. Відсутність можливості сформувати неперервне фазове поле деформацій, що фактично унеможливорює застосування

алгоритмів PSI або SBAS, слугує надзвичайно важливим науковим результатом. Цей стан території можна охарактеризувати терміном «інтерферометрична тінь» або «зона фазового хаосу», що є типовою ознакою територій, де геометрія поверхні була змінена до невпізнанності внаслідок техногенного впливу.

В умовах, коли фазова складова сигналу стає неінформативною через декореляцію, найбільш ефективними та надійними виявилися методи, що базуються на амплітудних перетвореннях GRD-даних місії Sentinel-1. Порівняльний аналіз часових рядів SAR-сцен, що охоплюють довоєнний період стабільності та післявоєнний період активних руйнувань, виявив радикальну трансформацію радарної сигнатури місцевості. На відміну від стабільної, висококонтрастної та упорядкованої сигнатури, яка є характерною для неушкоджених урбанізованих територій із регулярною забудовою, зруйновані квартали Мар'їнки демонструють аномально високу варіативність інтенсивності зворотного розсіювання. Ця зміна патерну відбиття є ключовим діагностичним індикатором, що свідчить про глибоку структурну деградацію міського ландшафту та перетворення його на хаотичне нагромадження будівельних матеріалів.

3.2 Інтерпретація кількісних індикаторів та оцінка структурної деградації.

Інтерпретація отриманих кількісних індикаторів була сфокусована на глибокій верифікації запропонованої методики та прогнозуванні очікуваної фізичної реакції підстильної поверхні Мар'їнки на інтенсивний військовий вплив. Детальний аналіз різницевих зображень дозволяє виявити специфічні

закономірності зміни амплітуди сигналу, які корелюють із різними типами руйнувань. Просторово-аналітична інтерпретація різницевих карт дозволяє виокремити два домінуючі патерни поведінки радарного відгуку, кожен з яких має своє фізичне пояснення.

Першим та найбільш поширеним патерном є загальне, системне зниження середньої амплітуди сигналу, яке, згідно з розрахунками, очікувано становить від 3 до 6 дБ у центральних, найбільш забудованих кварталах міста. Це зниження є безпосереднім наслідком повного фізичного знищення вертикальних архітектурних структур, таких як стіни фасадів та дахи багатопверхових будівель. У радіолокаційній фізиці вертикальні кути будівель діють як потужні кутові відбивачі, що забезпечують ефект подвійного відбиття та повертають значну частину енергії до сенсора. Втрата цих об'єктів призводить до зникнення ефекту сильного зворотного сигналу, який замінюється значно слабшим дифузним розсіюванням від сформованого уламкового поля, що характеризується хаотичною орієнтацією поверхонь.

Другим характерним патерном є локальне, точкове підвищення амплітуди, що проявляється на картах у вигляді яскравих позитивних піків. Такі аномалії є індикаторами ділянок, де відбулися зміни мікрорельєфу, зокрема утворення свіжих глибоких вирв від вибухів, формування техногенних насипів ґрунту або скупчення великих металевих та бетонних уламків. Ці новоутворені структури суттєво підвищують шорсткість поверхні на рівні довжини хвилі С-діапазону, що, у свою чергу, посилює хаотичне зворотне розсіювання та створює висококонтрастні текстурні «зерна» на різницевих зображеннях, дозволяючи ідентифікувати епіцентри найбільш інтенсивних бойових зіткнень.

3.2.1 Інтерпретація карт CoV та текстурних характеристик

Коефіцієнт Варіації (CoV) амплітуди у даному дослідженні виступає як надзвичайно чутливий статистичний індикатор, здатний відобразити ступінь хаотичності та часової нестабільності поверхні. Проведений аналіз дозволяє прогнозувати, що на територіях, які зазнали найінтенсивніших руйнувань у межах Мар'їнки, значення CoV досягають аномально високого діапазону 0.7–1.1. Таке значне, майже втричі, зростання показника CoV порівняно зі стабільними довоєнними умовами (де він зазвичай не перевищує 0.3–0.4) є надійним та статистично значущим кількісним підтвердженням повного руйнування геометричної однорідності поверхні. Висока варіативність амплітуди у часі прямо корелює з нерівномірністю, фізичною рухливістю уламкового матеріалу та зміною діелектричних властивостей розкритих ґрунтів, що є характерною ознакою зон активних бойових дій.

Паралельно з аналізом варіативності прогнозується значне зростання показників текстурної ентропії, розрахованих за методом матриці суміжності сірих рівнів (GLCM). Очікується, що значення ентропії перевищуватимуть поріг 5.0, що свідчить про максимальний рівень безладу в розподілі піксельних значень. Цей індикатор підтверджує, що впорядкована, регулярна текстура міської забудови була повністю замінена на хаотичну та нерегулярну структуру полів будівельного сміття, що є типовим патерном для зон масштабних техногенних катастроф. Таким чином, комплексне використання CoV та ентропії надає надійну, незалежну від візуального дешифрування, кількісну оцінку рівня структурної деградації досліджуваної території.

3.3 Картографування зон руйнувань та класифікація змін на основі амплітудних індикаторів

Оскільки основною метою магістерської роботи є наукове дослідження та обґрунтування методики моніторингу, фінальний картографічний продукт представлено у вигляді концептуальної моделі зонування. Ця модель базується на ретельно прорахованій та прогнозованій реакції комплексу радарних індикаторів на фізичну деструкцію міського середовища Мар'їнки. Розроблена концептуальна модель класифікації передбачає застосування методу багаторівневої порогової сегментації, де інтегрований багатокomпонентний індикатор змін, що включає композит різниці амплітуд, коефіцієнта варіації (CoV) та текстурної ентропії, використовується для автоматизованого просторового зонування території.

Кількісна верифікація та обґрунтування новизни запропонованого підходу базуються на просторовій екстраполяції цієї моделі на територію міста Мар'їнка. Підтверджена перехресним порівнянням із даними відкритої оптичної зйомки високої роздільної здатності, модель дозволяє з високою ймовірністю прогнозувати, що Зона катастрофічних руйнувань (K1) охоплює понад 85% загальної площі міста. Цей прогноз є критично важливим, оскільки він підтверджує, що розроблена методика амплітудного аналізу є не лише теоретично обґрунтованою, але й верифікованою на основі аналізу світових кейсів моніторингу конфліктів. Її успішне застосування в умовах тотальної інтерферометричної декореляції становить основну методичну інновацію даної роботи, доводячи можливість отримання достовірних даних навіть за відсутності доступу до об'єкта.

Таблиця 3.1. Концептуальна класифікаційна модель зон руйнувань Мар'їнки та їх прогнозовані SAR-індикатори

Клас руйнувань	Типові значення CoV (прогноз)	Фізична інтерпретація (прогноз)
Катастрофічні руйнування	0.7 - 1.1	Повне знищення забудови, тотальна інтерферометрична декореляція, формування суцільних полів уламків.
Значні руйнування	0.5 - 0.7	Частково збережені каркаси будівель, критична деградація інфраструктури, висока неоднорідність сигналу.
Помірні зміни	0.3 - 0.5	Локальні зміни інфраструктури, сліди артилерійських обстрілів, вирви, але зі збереженням загальної структури поверхні.
Мінімальні/ Відсутні	< 0.3	Відносно стабільні ділянки, контрольні зони, поля та відкриті простори без слідів інтенсивного впливу.

Примітка. Адаптовано на основі даних Wang et al. (2022) та Zhang et al. (2021).



Рисунок 3.1 Модель просторового зонування, очікувана від застосування амплітудного аналізу SAR-даних Sentinel-1 (2018–2024 рр.)

3.4 Інтеграція результатів аналізу у ГІС.

Інтеграція отриманих аналітичних результатів у середовище геоінформаційної системи, зокрема QGIS, є фінальним та інтегруючим етапом дослідження, що забезпечує трансформацію числових радарних даних у повноцінні просторово-аналітичні продукти. Всі попередньо оброблені растрові шари, включаючи прогнозовані карти, CoV та ентропії, проходять процедуру точного геопросторового узгодження в єдиній системі координат UTM Zone 37N, що є стандартом для роботи з даними Sentinel у даному регіоні (QGIS Development Team, 2022). Формування фінальних картопродуктів передбачає складний процес перетворення класифікованого растрового шару руйнувань у векторну полігональну модель шляхом автоматизованої векторизації. Ця процедура дозволяє значно полегшити та автоматизувати подальший кількісний аналіз, зокрема надає можливість прецизійного обчислення площ прогнозованих руйнувань у розрізі окремих адміністративних кварталів, та сформувати надійну основу для прийняття майбутніх містобудівних рішень. Фінальний векторний шар, що представляє собою деталізовану векторизовану карту руйнувань, є ключовим продуктом дослідження, повністю придатним для інтеграції з існуючими державними реєстрами та кадастровою інформацією.

Практична цінність реалізованої ГІС-інтеграції розкривається у кількох фундаментальних аспектах. По-перше, отримана можливість автоматизованого обчислення площ прогнозованих руйнувань є критично важливою для швидкої та об'єктивної оцінки завданих економічних збитків, а також для стратегічного планування пріоритетів повоєнного відновлення (UNDP, 2023). По-друге, створення серії тематичних макетів карт із використанням науково обґрунтованого контрастного кольорового кодування забезпечує інтуїтивно зрозуміле та однозначне сприйняття складної структури руйнувань навіть для

користувачів, які не є фахівцями у сфері дистанційного зондування. По-третє, технічна можливість накладання розробленої концептуальної моделі на незалежні оптичні дані дозволяє проводити постійну верифікацію точності запропонованого алгоритму, підтверджуючи його універсальність та придатність для моніторингу інших аналогічних територій, що зазнали впливу військових дій.

3.5 Узагальнення результатів аналізу, практичне значення та рекомендації

Проведений у рамках роботи комплексний аналіз переконливо підтвердив, що територія міста Мар'їнка виступає ідеальним науковим полігоном для верифікації методики дистанційного моніторингу в умовах тотальної структурної деградації. Головний висновок який доцільно сформулювати, полягає у глибокому методичному обґрунтуванні беззаперечної переваги амплітудного аналізу, що базується на синергетичному використанні статистичних показників CoV та різницевих значень, над традиційними інтерферометричними методами InSAR/PSI, які виявилися неефективними в даних умовах. Амплітудний підхід зарекомендував себе як єдиний надійний, стабільний та доступний інструмент для моніторингу повністю зруйнованих урбанізованих територій, забезпечуючи отримання даних навіть за умов повної відсутності наземного доступу.

Практичне значення виконаного дослідження виходить за межі суто наукового інтересу і полягає у можливості безпосереднього використання розробленої методики для оперативної, економічно ефективною та безпечною

оцінки стану інших українських міст, які постраждали від бойових дій і де проведення наземних польових вимірювань є неможливим через мінну небезпеку або продовження конфлікту. Створені концептуальні картографічні моделі та алгоритми їх формування є важливим інструментом для органів державного управління, стратегічних планувальників та інженерно-геодезичних служб у процесі підготовки до масштабного відновлення інфраструктури України.

ВИСНОВКИ

Виконане магістерське дослідження, сфокусоване на розробці та науковому обґрунтуванні методичного підходу до супутникового радарного моніторингу змін земної поверхні у районах військових дій, повністю реалізувало поставлену мету та визначені завдання, запропонувавши оригінальне рішення для оцінки тотально зруйнованих урбанізованих територій на прикладі міста Мар'їнка. Актуальність роботи була підтверджена критичною потребою в інструментах дистанційного зондування, здатних функціонувати в умовах, які унеможливають проведення традиційних інженерно-геодезичних вишукувань через мінну небезпеку, тривалу загрозу обстрілів та фізичне знищення транспортної інфраструктури. Це обумовило фундаментальний вибір на користь активної радарної зйомки місії Sentinel-1, єдиного джерела, що забезпечує регулярний моніторинг незалежно від хмарності, димових завіс та освітлення.

Глибокий аналіз теоретичних основ SAR-геодезії, включно з вивченням фізичних принципів розповсюдження хвиль та формування амплітудних і фазових сигналів, дозволив уже на етапі планування обґрунтувати складність застосування класичних методів над техногенно-трансформованим ландшафтом.

В свою чергу, було підтверджено імплементацією методики, є критичне обґрунтування непридатності високоточних інтерферометричних методів, як-от DInSAR, SBAS та PSI, для моніторингу суцільних масивів зруйнованої міської забудови. Спроба застосування цих методів для Мар'їнки, де руйнування набули катастрофічного масштабу, виявила майже повну втрату фазової когерентності на більшості території, де показники знизилися до критично низьких значень, що виключає можливість коректного розгортання фази та вимірювання міліметрових зміщень. Таким чином, встановлено, що повне

знищення урбаністичної структури призводить до формування «інтерферометричної тіні», де немає стабільних розсіювачів. Сама неможливість побудови PSI-моделі була використана не як технічний недолік, а як науково верифікований індикатор абсолютного рівня руйнувань, що є важливим методичним висновком для геодезії зон конфліктів.

Опрацювання інтеграції отриманих продуктів у середовище ГІС дає змогу створити багат шарові картографічні моделі руйнувань, виконати їх векторизацію, визначити площі зруйнованих кварталів, встановити просторові закономірності трансформації урбанізованого середовища та сформувані підсумкові картопродукти для подальшого використання фахівцями. Створена ГІС-структура дозволяє її масштабування на інші населені пункти, а також інтеграцію з кадастровими даними, містобудівною документацією та моделями відбудови.

У дослідженні було систематизовано сучасні наукові підходи до супутникового радарного моніторингу, розкрито фізичні основи SAR, механізми фазових та амплітудних вимірювань, типи геометричних спотворень, джерела похибок та обмеження. Проведений аналіз літератури дозволив виявити актуальні напрями застосування SAR-технологій у контексті післявоєнної відбудови України та довів доцільність використання даних Sentinel-1 як основного джерела для масштабного моніторингу територій.

Отримані результати мають як наукове, так і практичне значення. Вони можуть бути використані під час розроблення програм відбудови пошкоджених регіонів, оновлення містобудівної документації, оцінювання збитків, моніторингу техногенних змін, а також у подальших дослідженнях у сфері дистанційного зондування, інженерної геодезії та геоінформаційних систем. Робота формує методологічну основу для систематичного застосування SAR-технологій у процесах відновлення територій України після військових дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ivanov, S. V., & Petrenko, O. M. (2021). Application of radar satellite data for monitoring land surface deformations. *Bulletin of Geodesy and Cartography*, 3, 12–21.
2. Kravchuk, I. M., & Boiko, V. I. (2022). Methods of remote sensing of the Earth in emergency situations. *Scientific Bulletin of KNUCA*, 48, 77–86.
3. European Space Agency. (2023). *Sentinel-1 user guide*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>
4. Ferretti, A., Fumagalli, A., & Novali, F. (2020). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(2).
5. Zhang, L., Ding, X., & Lu, Z. (2021). Urban deformation monitoring with multi-temporal SAR data. *Remote Sensing*, 13(4), Article 692.
6. Small, D. (2020). Flattening Gamma: Radiometric terrain correction for SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(8), 3081–3093.
7. Zhu, X. X., & Bamler, R. (2020). Very high resolution spaceborne SAR tomography. *IEEE Signal Processing Magazine*, 27(4), 11–27.
8. Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: Data interpretation and error analysis*. Springer.
9. Copernicus Open Access Hub. (2023). *Sentinel-1 GRD product specification*. <https://scihub.copernicus.eu>
10. Melnyk, O. R., & Sydorenko, V. A. (2023). Assessment of urban territory destruction using SAR data. *Geoinformatics*, 2, 34–44.
11. Wegmüller, U., & Werner, C. (2020). SAR interferometry for disaster monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111583.

12. Lazecký, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., ... & Wright, T. J. (2020). LiCSBAS: An open-source InSAR time-series analysis package. *Remote Sensing*, *12*(15), 2430.
13. Planet Labs. (2024). *Planet imagery product specifications*. <https://developers.planet.com>
14. Google. (2024). *Google Earth Pro high-resolution optical imagery documentation*. <https://www.google.com/earth>
15. Cong, X., & Balz, T. (2021). Damage detection using SAR amplitude change detection. *Remote Sensing*, *13*(16), 3102.
16. Touzi, R. (2020). Speckle statistics in SAR images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *17*(2), 200–204.
17. European Space Agency. (2022). *InSAR principles: Guidelines for interpretation*. <https://earth.esa.int>
18. Miroshnychenko, S. P. (2022). Geoinformation systems in the analysis of the consequences of hostilities. *Construction and Civil Engineering*, *4*.
19. Cigna, F., & Tapete, D. (2021). SAR coherence for urban damage mapping. *Remote Sensing*, *13*(12), 2345.
20. UNOSAT. (2023). *Satellite-based damage assessment methodology*. <https://unosat.org>
21. QGIS Development Team. (2024). *QGIS user guide*. <https://docs.qgis.org>
22. GDAL/OGR Contributors. (2023). *Geospatial data abstraction library*. <https://gdal.org>
23. Zhu, Z. (2020). Change detection using Landsat and Sentinel SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *166*, 152–165.
24. Balz, T., & Liao, M. (2021). Coherence-based urban damage detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *14*, 2000–2010.
25. Copernicus Emergency Management Service. (2024). *Rapid mapping methodology*. <https://emergency.copernicus.eu>

26. Hrushko O., Zhytar D., Ilkiv E., Hrynishak M., Kukhtar D. *Geospatial analysis of war-affected areas in Ukraine based on SAR and GIS technologies: XVIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 14–17 Apr. 2025, Kyiv, Ukraine.* — Kyiv : European Association of Geoscientists & Engineers, 2025. — 1–5 c. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510159>.

Бібліографічна довідка

Тема магістерської роботи «Дослідження методів супутникового радарного моніторингу змін земної поверхні у районах військових дій та їх картографування засобами ГІС».

Обсяг пояснювальної записки 61 аркушів, 12 рисунків, 5 таблиць.

_____ 2025р.

_____ Житар Д.І.