

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ГЕОІНФОРМАТИКИ

Реєстрац. № 171-12/25

На правах рукопису

УДК 528.8.044.2

«Допущено до захисту»

- Завідувач кафедри геодезії,
землеустрою та геоінформатики
к.н. з д.у., доц.

Владислав ПЕРЕСОЛЯК

« 8 » грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему :

**«МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ТЕРИТОРІЇ З
ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ
РАДАРНИХ ВИМІРЮВАНЬ»**

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Виконавець роботи :

студент

Марко Євгеній Володимирович

Науковий керівник :

д.т.н., проф.

Каблак Наталія Іванівна

Ужгород – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ГЕОІНФОРМАТИКИ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи магістра
на тему :

«МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ТЕРИТОРІЇ З
ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ
РАДАРНИХ ВИМІРЮВАНЬ»

Виконав:
студент 2 курсу магістратури денної форми навчання
зі спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»

Виконав :  Свгеній МАРКО

Керівник :  Наталія КАБЛАК

Рецензент :  Леонід ШЕВЧУК



Святослав ПОЛЩУК
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

к.н.з д.у., доц. Владислав ПЕРЕСОЛЯК

Рецензент

(науковий ступінь, вчене звання)

ДВНЗ «УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет: географічний

Кафедра: геодезії, землеустрою та геоінформатики

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
геодезії, землеустрою та
геоінформатики
доц. Владислав ПЕРЕСОЛЯК

« 30 » травня 2025 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Марку Євгенію Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема кваліфікаційної роботи: «Моніторинг вертикальних зміщень території з використанням супутникових інтерферометричних радарних вимірювань»

Керівник роботи – д. т. н., проф. Каблак Наталія Іванівна.

Затверджено розпорядженням вищого навчального закладу № 21 від «30» жовтня 2025 р.

Строк подання студентом кваліфікаційної роботи «8» грудня 2025 р.

1. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

2. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

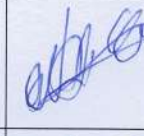
1) Вивчення теоретичних засад формування екзогенних процесів:

а) визначення природно-техногенних умов формування вертикальних деформацій;

б) аналіз геодезичних методів дослідження;

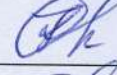
- с) аналіз чинників, що зумовлюють екзогенні процеси в Карпатському регіоні;
- 2) Дослідження природно-технічних умов (аналогічно до "опрацювання проєктних рішень"):
- а) характеристика геолого-геоморфологічних особливостей
 - б) кліматичні умови регіону дослідження;
 - с) визначення впливу гірничих робіт на формування вертикальних зміщень;
- 3) визначення методики та результатів супутникового інтерферометричного аналізу:
- а) аналіз принципів роботи радарної інтерферометрії;
 - б) створення карти вертикальних швидкостей;
 - с) просторова динаміка просідань за шахтами в с. Солотвино;
- 3. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):**

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, Ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розділ 1. Теоретичні засади моніторингу вертикальних зміщень	д. т. н., проф., Каблак Н.І.		
Розділ 2. Фізико - географічна характеристика регіону дослідження	д. т. н., проф., Каблак Н.І.		
Розділ 3. Методика та результати супутникового інтерферометричного аналізу вертикальних зміщень	д. т. н., проф., Каблак Н.І.		

Дата видачі завдання: « 30 » квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання роботи	Термін виконання етапів роботи	Підпис керівника
1.	Вивчення законодавчих джерел, довідкова й періодична література з теми дослідження	1.10.2025 - 11.10.2025	
2.	Збір вихідних даних	12.10.2025 - 20.10.2025	
3.	Написання розділу 1	21.10.2025 - 30.10.2025	
4.	Написання розділу 2	1.11.2025 - 15.11.2025	
5.	Робота над розділом 3	16.11.2025 - 27.11.2025	
8.	Здача на перевірку та виправлення кваліфікаційної роботи	30.11.2025 - 05.12.2025	
9.	Проведення рецензування та здача готової роботи на кафедрі	05.12.2025 - 08.12.2025	

Студент



Євгеній МАРКО

Керівник дипломного проекту



д.т.н, проф., Наталія КАБЛАК

Як автор несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення захищеної кваліфікаційної роботи бакалавра на офіційних web-ресурсах ДВНЗ «УжНУ».

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Студент



Євгеній МАРКО

АНОТАЦІЯ

Марко Є. М. – «Моніторинг вертикальних зміщень території з використанням супутникових інтерферометричних радарних вимірювань»

Дослідження присвячене оцінці точності супутникових інтерферометричних радарних вимірювань для моніторингу вертикальних переміщень земної поверхні в районі Солотвино, Закарпаття, Україна. У роботі застосовано методику InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) для виявлення та аналізу незначних деформацій поверхні з часом. Основною метою було оцінити надійність і точність інтерферометричних даних у визначенні вертикальних змін, пов'язаних із геологічними процесами та антропогенними впливами. Отримані результати сприяють кращому розумінню процесів деформації земної поверхні в тектонічно активних і екологічно вразливих районах, а також підтримують прийняття рішень щодо геотехнічних ризиків і сталого землекористування.

Ключові слова: InSAR, вертикальні переміщення, оцінка точності

ANNOTATION

Marko E. – «Monitoring vertical displacements of the territory using satellite interferometric radar measurements»

The study focuses on assessing the accuracy of satellite-based interferometric radar measurements for monitoring vertical ground displacements in the Solotwyno region, Ukraine. The research utilizes InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) techniques to detect and analyze subtle surface deformations over time. The primary goal was to evaluate the reliability and precision of interferometric data in identifying vertical movements related to geological processes and anthropogenic impacts. The findings contribute to improving the understanding of ground deformation processes in tectonically active and environmentally sensitive regions, supporting future applications in geotechnical risk assessment and sustainable land-use management.

Keywords: InSAR, vertical displacements, accuracy assessment

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МОНІТОРИНГУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ.....	13
1.1. Природно-техногенні передумови вертикальних деформацій	13
1.2. Геодезичні методи дослідження вертикальних деформацій	20
1.3. Природні та техногенні чинники вертикальних зміщень у Карпатському регіоні	26
Висновки до 1-го розділу.	30
РОЗДІЛ 2. ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГІОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ	31
2.1. Геолого-геоморфологічні та інженерно-геологічні особливості	31
2.2. Кліматичні особливості району як передумова утворення зсувних процесів	37
2.3. Вплив гірничих робіт і затоплення шахт на формування провалів	39
Висновки до 2-го розділу.	44
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ СУПУТНИКОВОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ...	45
3.1. Принцип роботи радарної інтерферометрії (InSAR).....	45
3.2. Формування інтерферометричних пар та створення карти вертикальних швидкостей.....	55
3.3. Просторова динаміка просідань над шахтами в с. Солотвино.....	69
Висновки до 3-го розділу.	80
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	82

ВСТУП

Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні є однією з найбільш актуальних проблем сучасної геодезії, геотехніки та геодинаміки, особливо в регіонах із складною геологічною будовою, активними природно-техногенними процесами та густою зосередженістю об'єктів соціальної та промислової інфраструктури.

Солотвино є унікальним рекреаційно-оздоровчим центром із соляними озерами та спелеотерапевтичними можливостями. Деградація геологічного середовища та розвиток карстових провалів загрожують знищенню об'єктів туристичної інфраструктури. Вивчення вертикальних зміщень дозволить розробити заходи щодо стабілізації ситуації та збереження рекреаційного потенціалу території.

Актуальність. Розвиток методів супутникового моніторингу. Спеціалізована супутникова радарна інтерферометрія (InSAR) є одним з найперспективніших методів дистанційного зондування Землі для виявлення та дослідження вертикальних деформацій земної поверхні. На відміну від традиційних геодезичних методів, супутникова інтерферометрія дозволяє отримувати дані про деформації в режимі реального часу на великих площах із високою просторовою роздільністю (кілька сантиметрів) та можливістю архівних досліджень за історичні періоди.

Практичне застосування InSAR методики для геомоніторингу в гірських умовах матиме значення для розвитку дистанційного зондування Землі, вдосконалення методів обробки даних та розширення можливостей їх застосування у науці і промислі.

Метою даної роботи є вивчення екзогенних процесів та знаходження методів їх виявлення за допомогою супутникових інтерферометричних радарних вимірювань.

Завдання:

- Описати геологічну будову та гідрогеологічні умови території Солотвино, включаючи характеристику Солотвинської солянокупольної структури;
- Проаналізувати геоморфологічні особливості рельєфу та їх вплив на розвиток геологічних процесів;
- Провести аналіз теоретичних основ супутникової радарної інтерферометрії (InSAR) та її фізичних принципів роботи;
- Розглянути переваги та обмеження методу InSAR порівняно з традиційними геодезичними методами (нівелювання, GNSS);
- Побудувати карту вертикальних швидкостей зміщень землі для території Солотвино

Об'єктом дослідження є територія с. Солотвино Тячівського району.

Предметом дослідження є методи дослідження та обробка даних за для виявлення вертикальних зміщень на досліджуваній території.

Практична цінність роботи

Робота пропонує комплексний багатометодний підхід до моніторингу вертикальних деформацій в умовах техногенно активних гірських територій. Розробка методики синтезу даних супутникової інтерферометрії створює наукову основу для розвитку вітчизняної геодезії та геодинаміки. Результати дослідження поповнюють наявні знання про геодинаміку Закарпатського регіону, його тектонічну активність та взаємовплив тектонічних, кліматичних та техногенних факторів на формування вертикальних деформацій. Результати досліджень слугуватимуть науковою основою для розробки програм екологічної реабілітації території Солотвинського родовища, включаючи рекультивацію гірничих відвалів, консервацію затоплених шахт та стабілізацію деградованих ділянок.

Апробація результатів дослідження. Основні результати дослідження було представлено на XII Міжнародній науково-практичній конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні» GeoTech Zakarpattya 2025, (23–25 жовтня 2025 року, м. Ужгород).

Робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Містить 3 таблиць та 28 рисунків, загальна кількість сторінок 86.

Перший розділ присвячений теоретичним основам щодо визначенню екзогенних процесів, а саме методології дослідження вертикальних зміщень, причин їх виникнення та методів, котрі дають змогу виконувати точні спостереження за змінами.

Другий розділ характеризує природно-технічні умови території дослідження, а саме с. Солотвино Тячівського району. Окрему увагу було приділено геологічним та геоморфологічним особливостям.

Третій розділ містить опис методики обробки супутникових InSAR даних, їх атмосферної та орбітальної корекції, розгортання фазових зсувів та побудови карт вертикальних швидкостей. Представляються результати аналізу просторової динаміки вертикальних деформацій у межах Солотвинського родовища та прилеглої території, визначаються основні зони просідань та їх кількісні характеристики.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МОНІТОРИНГУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

1.1. Природно-техногенні передумови вертикальних деформацій

Оцінка ймовірності прояву небезпечних явищ природного характеру, а саме карсту, зсувів, осідання лесових ґрунтів, високий рівень ґрунтових вод, обмежує використання території для містобудування й вимагає додаткових інженерних заходів.

Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» чітко позначає поняття території як найважливішого містобудівного фактора у процесі містобудівного проектування. Територія — поверхня землі з внутрішніми й прибережними водами у визначених границях, що має певне географічне положення, природні та створені в результаті діяльності людей умови є провідним фактором, що визначає можливість і доцільність проведення тих чи інших заходів із реконструкції міської території, розміщення основних функціональних зон тощо [14].

Зсувні процеси – це один із різновидів схилових геологічних явищ, пов'язаних із переміщенням гірських порід під дією сили тяжіння. За класичним визначенням, зсув – це «процес зміщення масиву гірських порід, що відокремився від схилу, з утворенням стінки відриву і збереженням зв'язку з ним». Іншими словами, це переміщення частини схилу вниз по поверхні ковзання. Зазвичай зсувний масив рухається поступово (від годин і днів до років) і характеризується сповільненим набором швидкості перед можливим катастрофічним перебігом. В українській літературі та навчальних матеріалах зсуви також описують як «повільний рух мас гірських порід, що складають відкос, який відбувається по нерухомому масиву». Типовою ознакою зсуву є поява уступу (стінки відриву) у верхній частині схилу і накопичення переміщеного матеріалу в його низу (мовою зсувного тіла) [6].

Вертикальні зміщення – це переміщення ділянки гірських порід чи ґрунту у вертикальному напрямку відносно початкового положення. Такі зміщення можуть бути самостійними (наприклад, осідання, набухання чи набухаюче-

усадочні рухи ґрунту) або супроводжуватися горизонтальними зсувами, що зображено на рисунку 1.1.1. Вертикальні рухи зазвичай виникають у зв'язку зі змінами в навантаженні ґрунту чи вологості: наприклад, підвищення ґрунтових вод або надмірне навантаження призводять до осідання слабких порід, а навпаки – вищий гідростатичний тиск у водопоглинальних горизонтах може викликати підйом (гідропіскні деформації). У контексті зсувних процесів вертикальні зміщення часто розглядаються як складова кумулятивних деформацій у нижній частині рухомого тіла.

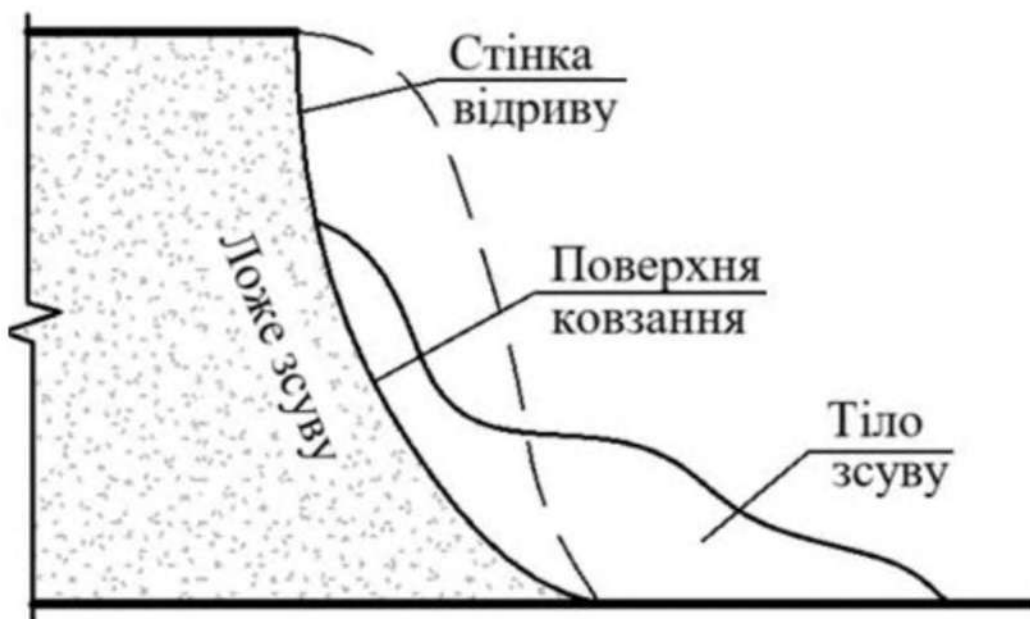


Рис. 1.1.1. Складові частини зсуву

За умовами виникнення та середовищем можна виокремити:

- **зсуви природних схилів;**
- **гірничо-розробних відвалів;**
- **кар'єрних відкосів.**

Так, у гірських спорудах чи кар'єрах розглядають окремо «зсуви бортів і уступів», «зсуви відвалів» та «зсуви природних схилів».

Шантукова Д.А. [1] зазначає, що поверхня, по якій відбувається відрив і зсув, є поверхнею ковзання.

По формі поверхні ковзання та характеру переміщення виділяють такі підгрупи:

- контактні зсуви (по площині нашарування);
- зсуви ізотропних масивів;
- глибинні зсуви;
- насувні/видавлювальні зсуви;
- фільтраційні зсуви.

Поверхня ковзання може бути пласкою або криволінійною – наприклад, сферичною чи ламаною. У однорідних ґрунтах вона часто набуває форму близьку до круглоциліндричної.

По глибині залягання поверхні ковзання зсуви класифікують на поверхневі (дрібні) та глибокі. Зокрема, за однією з класифікацій виділяють:

- глибокі (до 20 м);
- дуже глибокі (понад 20 м);
- поверхневі (до 1 м, як-от опливини та спливи);
- дрібні (<5 м).

Поверхневі зсуви звичайно захоплюють лише верхню частину схилу (зони сезонних змін вологості ґрунту), а глибинні охоплюють товщу до гірничого живлення (від бровки до подошви). За швидкістю руху розрізняють повільноплинні (повзучі) зсуви та катастрофічні (швидкі) зсуви, які при переході до фази руйнування можуть здійснюватися за кілька годин або хвилин. До того ж існують зсуви-потоки (земляні потоки) – це різновид текучих зсувів з подовженим «язиком» матеріалу, що тече вздовж поглиблень рельєфу (шириною десятки метрів і більше), подібно до річкового потоку. Інші автори пропонують термінологічно враховувати «спливи» (локальне зміщення на невеликій глибині при насиченні верхнього шару) та «зсуви-обвали» (гібрид ковзання й обвалу для крутих схилів). Відзначимо, що різноманітність природних умов і підходів призвела до численних класифікацій зсувів, а «загальноприйнятої класифікації на сьогодні немає».

Геологічна будова – це стратиграфія та літологія схилу, наявність слабких прошарків чи зони розмиву, ступінь тріщинуватості та контакти між породами.

Наприклад, чергування водопроникних та малопроникних шарів створює пружинні умови: водовідштовхувальні товщі змушують ґрунтові води накопичуватися перед проникаючими пластами, що знижує суцільність опору і може слугувати поверхнею ковзання. Значну роль відіграють також тип ґрунтів – у будівництві часто враховують слабкі піщані суглинки, пилуваті суглинки або лесоподібні відклади.

За даними дослідників, на більше ніж 80 % території України розповсюджені нестійкі породи ґрунтів — леси (лесоподібні суглинки й супіски). У сухому стані лес має значну міцність, але при зволоженні втрачає значну її частину. Вода, зазвичай, порушує зчеплення часток і пористу структуру відкладень. Леси під дією зовнішнього навантаження або навіть від власної ваги при замочуванні водою або іншою водною речовиною зазнають вертикальної деформації, що, зокрема, викликає порушення рівноваги схилу і розвитку зсувних процесів [4, 7].

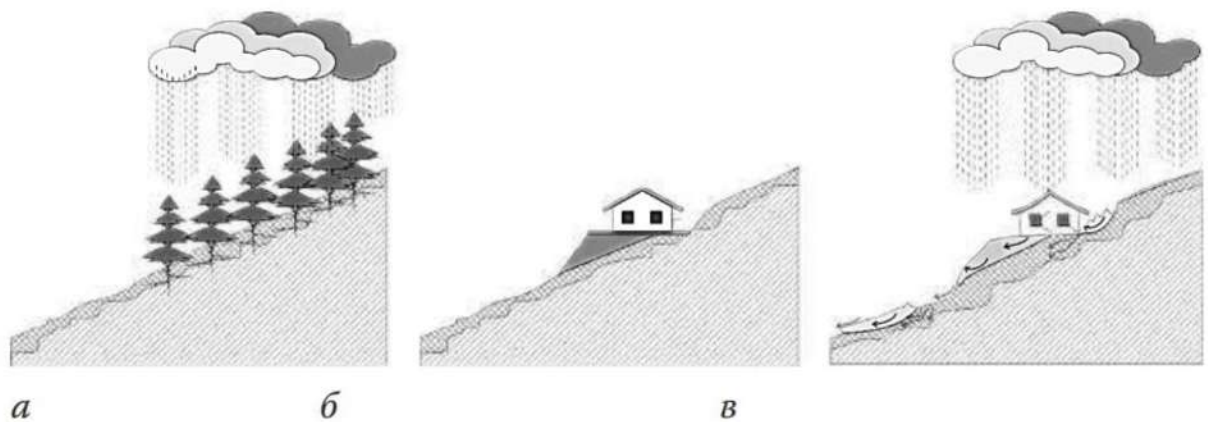


Рис. 1.1.2. Зсув на схилах: а — у природних умовах кореневі системи дерев підсилюють міцність порід, що складають схил; б — підрізування схилів для забудови; в — зсув верхнього шару ґрунту через ослаблення міцності (знищення зелених насаджень, забудова)

Підйом рівня ґрунтових вод знижує міцність ґрунтового каркасу (збільшує поровий тиск) і може миттєво привести схил до нестійкого стану. Прикладом є тривале зволоження після рясних дощів або танення снігу: інфільтрація води в проникаючі шари збільшує вагу породи та знижує її опір зсуву. Вироблені водовідвідні (дренажні) споруди, навпаки, спрямовані на зниження цих

негативних ефектів. Кліматичні умови (особливо опади й температурний режим) визначають частоту і інтенсивність зовнішніх зволожуючих та вимерзаючих навантажень.

Людська діяльність може або безпосередньо сприяти появі зсувів, або знижувати їх поріг активації. Серед основних антропогенних чинників згадують:

- проведення вибухових або земляних робіт на схилах (кар'єри, будівництво доріг тощо);
- вирубування дерев та кореневих ґрунтових зв'язок, що зменшує механічну міцність поверхневого шару;
- інтенсивне штучне зволоження чи затоплення (наприклад, прорив водосховищ, витoki водопровідних мереж);
- підрізування схилів під час будівництва (укладання доріг, трубопроводів) – що зменшує опорну площу;
- додаткове вертикальне навантаження зверху (насипи, будівлі, важке обладнання);
- та вібраційні чи динамічні впливи (транспортний рух, будівельні вибухи).

Слід зазначити, що в деяких умовах природні фактори можуть переходити до категорії техногенних або створювати комбінацію.

Таблиця 1.1.1.

Чинники, які впливають на зсувні деформації схилів

Природні чинники	Техногенні чинники
фізико-механічні властивості ґрунту;	підрізання схилів;
висота, крутість, форма, гідрологічні умови схилу;	будівельна діяльність;
опади;	вирубка лісів;
підмив берегів;	вібраційні та вибухові роботи;
землетруси;	випасання худоби;
підвищення зволоженості;	завантаження схилів;

Природні чинники	Техногенні чинники
вивітрювання;	зміна властивостей, стану та обсягу порід, що складають схили;
підземні та поверхневі води;	створення кар'єрів та водосховищ;
сейсмічні поштовхи;	витік вод;
тектонічні рухи;	відвал ґрунту;
клімат;	дренажні та штольневі системи;
рослинність;	заповнення ярів та балок слабкими ґрунтами.
водотоки;	
динамічні дії хвиль;	
фільтраційний тиск;	
видавлювання;	
дія льоду;	
набухання при гідратації порід;	
іонний обмін у глинах;	
вилуговування та розчинення солей;	
гравітаційний вплив;	
зниження міцності;	
винесення частинок ґрунту підземними водами.	

Недостатній або зловживаний дренаж також можна віднести до антропогенних факторів: протилежно до корисного ефекту, неповне відведення вод спричиняє локальне їхнє накопичення і дестабілізацію схилів. Нарешті, підземні розробки (шахти, кар'єри) та інші втручання у геологічний масив призводять до зміни напружено-деформаційного стану ґрунтової основи. Розробка корисних копалин чи будівництво підземних споруд часто супроводжується виведенням або зменшенням об'єму порід, що призводить до просідання порід над виробками (горизонтальні зрушення та вертикальні осідання). Вплив навантажень і змін гідрологічного режиму від таких робіт є характерним техногенним підґрунтям активізації обох – горизонтальних і вертикальних – деформацій.

Нарівні з гравітаційними зсувними рухами, можуть відбуватися вертикальні деформації ґрунту без великомасштабного відриву. Такі вертикальні зміщення, зокрема осідання, часто виникають при поєднанні навантаження зверху та проникненні води.

Найбільшої шкоди розвиток та активізація зсувів завдає міським територіям зі щільною забудовою. На території міст кілька факторів зазвичай діють спільно, що приводить до підвищення частоти проявів зсувних процесів.

На Одещині у курортному місті Чорноморськ фіксують зсуви з 2013 року. Верхній шар ґрунту берегового схилу сповзає у море разом з будинками (рис. 1.1.3). На сьогодні заходи щодо запобігання розвитку зсувів не дають результат [2, 3].



Рис. 1.1.3. Зсувні процеси та руйнування у місті Чорноморську

У слабких пористих ґрунтах (наприклад, лесових) додаткова волога під дією зовнішнього чи собівартості навантаження викликає підвищене ущільнення (вертикальну деформацію). Схожим чином, надмірна вологоємність чи сток у м'яких пісках (просідання підземними потоками) викликають поступове опускання поверхні, що послаблює стійкість схилу. Зворотне явище – набухання і підняття – характерне для розширювальних глин при різкій зміні вологості. У комплексі такі вертикальні зсувні процеси забезпечують плавні (повільні) переміщення без явного руйнування уступу, проте вони є попередниками глибшого зсуву, оскільки змінюють напружений стан ґрунту.

1.2. Геодезичні методи дослідження вертикальних деформацій

Вертикальні деформації земної поверхні вивчаються комплексом геодезичних методів, що дають змогу вимірювати переміщення точок по висоті. Основними з них є нівелювання, GNSS-спостереження (GPS/GLONASS), тахеометричні методи, супутникова радіолокаційна інтерферометрія (InSAR, DInSAR) та інші сучасні методи (лазерне сканування, фотограмметрія, супутникова альтиметрія). Кожен із цих методів має власні принцип роботи, діапазон похибок, переваги та обмеження.

Часто при складних завданнях моніторингу вертикальних зсувів застосовують комбінований підхід, поєднуючи кілька методів для підвищення точності та просторового охоплення спостережень.

Геометричне нівелювання – це класичний метод вимірювання різниці висот між пунктами, що базується на встановленні інструмента (нівелірного приладу) з горизонтальним візирним променем [9].

При геометричному нівелюванні використовують рівень з бульбашковим компенсатором, який забезпечує високоточність горизонту. Зміщення висоти між точками визначаються за відліками рейок на обох сторонах приладу. Тригонометричне нівелювання базується на вимірюванні кута нахилу візирної лінії та довжини похилого променя з приладу, наприклад теодоліта, і обчисленні перевищення за тригонометричними формулами.

Формально: $h = s \cdot \tan v + i - V$,

де v – кут нахилу, s – горизонтальна проекція візирної лінії, i – висота приладу над маркою, V – висота візирної рейки.

Типово для високоякісних приладів та коротких прогонів вертикальна похибка складає декілька міліметрів (залежно від протяжності профілю). Горизонтальну точність при простому нівелюванні не враховують (гор. зміщення = 0). Для тригонометричного нівелювання вертикальні похибки залежать від точності вимірюваних кутів і дистанцій: сучасний геодезичний теодоліт з точністю 1" може дати похибку висоти на рівні кількох міліметрів на сотні метрів

дистанції. Зі збільшенням відстані помилка вертикального перевищення зростає (помилка пропорційна похибці кута і відстані).

Геометричне нівелювання дає найвищу вертикальну точність серед усіх методів і не вимагає зовнішніх референсів (супутників, мереж тощо). Його недолік – трудомісткість (відвід кожної точки інструментом, складність на нерівній місцевості) і обмежена відстань прямої видимості. Тригонометричне нівелювання більш мобільне (можна вимірювати кути на великі відстані), але поступається за точністю простому нівелюванню та залежить від видимості цілей. Обидва методи переважно застосовуються у локальних мережах спостережень (будівельні контролю, інженерно-геологічні дослідження), особливо коли потрібна велика точність вертикальних переміщень.

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) – це супутникові навігаційні системи (GPS, GLONASS, Galileo тощо), що вимірюють положення приймача в тривимірному просторі за допомогою сигналів від кількох супутників [24].

Принцип геодезичного GNSS-моніторингу полягає у статичних або кінематичних спостереженнях координат пунктів: на пункт встановлюють навігаційну антену, яка приймає сигнали, далі виконуються рішення щодо псевдодистанцій та фаз (см. блок-схему устаткування). Схема в приймачі охоплює: антену з підсилювачем, блоки перетворення частоти, аналого-цифрове перетворення, паралельні канали обробки сигналів і блок розрахунку координат, що показано на рисунку 1.2.1.

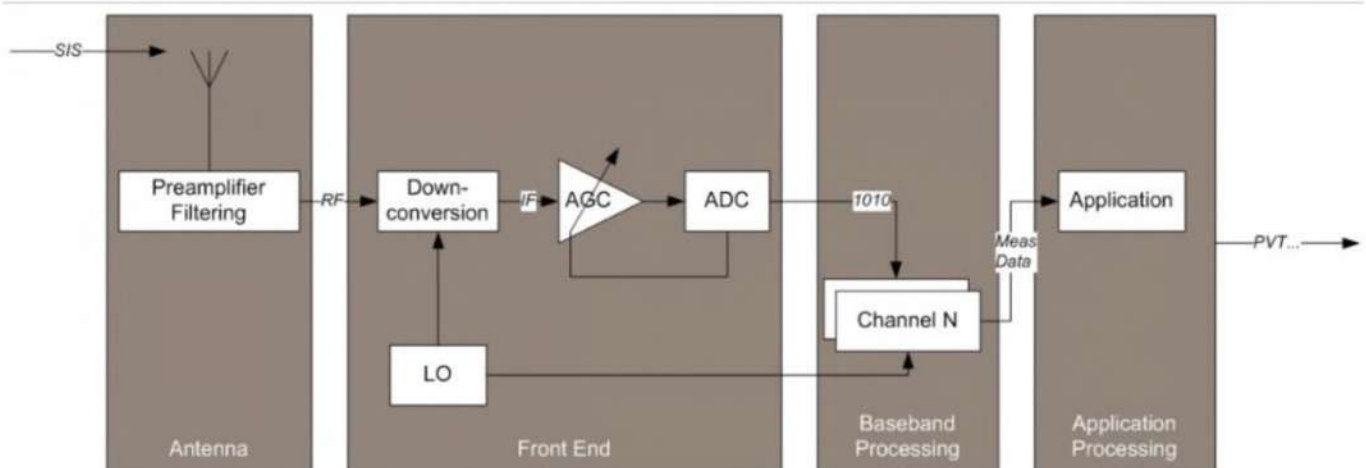


Рис. 1.2.1. Блок-схема роботи

Задані час і місце розташування супутників дозволяють відтворити абсолютні координати точки (RTK, PPP).

Для тривалих статичних спостережень GNSS досягається сантиметровий рівень точності. За даними NASA/NOAA, 24-годинні GNSS-виміри (CORS) дають мережеву точність: горизонталь ≈ 1.4 см, вертикаль ≈ 2.0 см. Відносна точність між сусідніми пунктами (до 1 км) становить ≈ 0.8 см гориз., ≈ 1.8 см вертикалі. Кінематичні режими (RTK) забезпечують похибку позиціонування порядку міліметрів у реальному часі. Недолік GNSS – погіршена вертикальна точність порівняно з горизонтальною (приблизно у 1.7 рази більше), а також залежність від умов спостереження (небажаний мультипас, затінення горизонту). Проте GNSS-моніторинг зручний для постійних мереж великого масштабу. Він дозволяє цілодобово контролювати переміщення точок і визначати як горизонтальні, так і вертикальні складові руху.

Система GNSS забезпечує глобальний масштаб спостережень і автономність – не вимагає місцевої розв'язки (крім довготривалих вимірів для збільшення точності). Це надзвичайно ефективний метод для моніторингу тектонічних рухів, підйомів і просідань ґрунту, роботи з контрольними геодезичними пунктами та безперервними станціями (CORS). Як підкреслено в літературі, GNSS-спостереження є одним з основних методів сучасного геодезичного моніторингу деформацій.

Метод InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) використовує два або більше радіолокаційних знімків однієї ділянки, зроблених у різний час, щоб виявити переміщення поверхні.

Супутники SAR випромінюють мікрохвильові імпульси та фіксують назад відбиті сигнали. Кожне SAR-зображення містить фазову складову, що відповідає відстані до поверхні. Різниця фаз (коли поверхня перемістилася між двома прольотами супутника) проявляється як фазовий зсув. На візуалізації фазового зсуву (інтерферограмі) ці зміни виглядають у вигляді кольорових «кілець» (інтерференційних смуг), що показують зсув у смужці максимумів-фаз. Схематично принцип InSAR пояснюється побудовою інтерферограми (див.

ілюстрацію): геометрично обчислюючи різницю відстаней між двома проходами супутника, можна отримати карту вертикальних переміщень в напрямку до/від супутника.

На базі вихідної інтерферограми («згорнутий» фазовий сигнал) потім застосовують процедуру розгортання, що перетворює періодичний фазовий малюнок на неперервне поле зсувів. На малюнку наведено приклад: зліва – інтерферограма з «обгорнутими» фазовими контурними лініями (Wrapped), справа – після розгортання (Unwrapped), де колір відображає фактичне відхилення земної поверхні. Зауважимо, що InSAR вимірює зміщення у напрямку лінії прямого зору супутника (LOS), тому для однозначного витягнення чисто вертикальної компоненти може потребуватися декомпозиція з урахуванням геометрії польоту та комбінування даних з різними орбітами.

Основна перевага InSAR – можливість досліджувати широкі ділянки з високою просторовою деталізацією без встановлення марок на місцевості. Це робить InSAR незамінним для картування великих зон зсувонебезпечних схилів, тектонічних розломів, усадки ґрунтів під забудовами тощо.

Трьохвимірне лазерне сканування виконує швидкий безконтактний обмір великої кількості точок поверхні за допомогою лазерних променів. Стационарні наземні лазерні сканери (TLS) знімають об'єкти на відстанях від кількох метрів до сотень метрів, дозволяючи отримувати щільні хмари точок точністю до кількох міліметрів [16]. При статичному скануванні у фіксованому положенні досягнуто похибки $\approx 2\text{--}4$ мм за зміщення.

Лазерне сканування дає змогу формувати детальні цифрові моделі поверхні схилу або споруди. Головний недолік – необхідність багатократних виїздів (кількох сканувальних позицій) для покриття усієї зони та обмежена зона видимості між сканером та ціллю. TLS ефективний для моніторингу деформацій на малих ділянках (дамби, будівлі, мости), де потрібно побачити локальні аномалії. Авіаційне (ALS) чи мобільне (MLS) лазерне сканування охоплює великі території, але з дещо меншою точністю (декілька сантиметрів при картографічному зйомленні).

Фотограмметрія. Цей метод базується на обробці стереопар аерофото- чи супутникових знімків для відновлення 3D-моделі поверхні. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) з високою роздільною здатністю камер дають можливість швидко отримувати висотні моделі місцевості. Точність позиціонування 3D-пунктів залежить від відстані польоту та наявності наземних контрольних точок (GCP). Згідно з оцінками, при коректному розташуванні близько десятка GCP горизонтальна точність фотограмметрії становить $\approx 2\text{--}3$ см, а вертикальна – $\approx 5\text{--}6$ см [8].

Для великих ділянок на місцевості або у спорудах фотограмметрія з GCP є ефективною: вона покриває сотні гектарів із відносно невеликими витратами (порівняно з наземними методами). Однак без GCP або при несприятливих умовах (однорідна текстура поверхні) вертикальна точність суттєво погіршується. Фотограмметрія добре працює разом з іншими методами – наприклад, для калібрування інтерферограм або свердовинних даних.

Сучасні дослідження зазвичай комбінують кілька методів для комплементарного моніторингу. Наприклад, нівелювання разом із GNSS забезпечують високоточний контроль обраних пунктів: нівелір дає абсолютні вертикальні зміщення з міліметровою точністю, а GNSS одночасно фіксує їх горизонтальні компоненти. InSAR використовується для картування загальної картини зсуву на великих ділянках, а його результати валідуються локальними наземними вимірами (нівеліром чи GNSS). Так, у практиці геодинаміки зсувних схилів поєднують дані топографічних зйомок, знімків InSAR та GNSS, формуючи тривимірні цифрові моделі руху ґрунту [17]. Це дає можливість підвищити загальну чутливість до змін рельєфу та скоригувати похибки кожного окремого методу.

Для наочності зведемо в таблиці характеристики розглянутих методів за ключовими параметрами: точність (гориз./вертик.), чутливість до мінімальних зсувів та масштаб застосування.

Таблиця 1.2.2.

**Основні характеристики методів спостереження за вертикальними
зміщеннями**

Метод	Точність (вертикальна / горизонтальна)	Чутливість (мін. переміщ.)	Просторовий масштаб та застосування
Нівелювання (геометричне)	$\approx 0.2 \text{ см} \cdot \sqrt{\text{км}} / \pm 0$ (гориз.)	$\sim 1\text{--}5 \text{ мм}$	Локальні ділянки (кілометрові профілі, будівельні об'єкти)
(тригонометричне)	$\approx$ декілька мм на сотні м (залежить від кута)	$\sim$ мм	Аналогічно геометричному (гірництво, гірські схили)
GNSS (GPS/GLONASS)	$\approx 2.0 \text{ см} / 1.4 \text{ см}$ (95%, 24h)	$\sim$ міліметрів (RTK)	Континентальні та регіональні мережі (десятки–тисячі км)
Тахеометричний	$\sim 0.005\text{--}0.01 \text{ м}$ на 100 м (mm/pixel)	$\sim$ мм	Місцеві ділянки (десятки–сотні метрів, будівництва)
InSAR (DInSAR)	$\sim 8\text{--}10 \text{ мм/рік}$ (σ); $\sim$ мм рівень сигналу	$\sim$ мм/рік	Широкомасштабні зони (десятки–сотні км)
Лазерне сканування (TLS)	$\sim 2\text{--}4 \text{ мм}$	$\sim$ мм	Локальні об'єкти (до сотень м)
Фотограмметрія (БПЛА)	$\sim 5\text{--}10 \text{ см}$ (вертик.); $\sim 3 \text{ см}$ (гориз.)	$\sim 5 \text{ см}$	Від сотень м до десятків км (геомодельовання місцевості)
Супутникова альтиметрія	$\sim 1\text{--}2 \text{ см}$ (водна поверхня)	$\sim$ см	Глобальні (океани, льодовики); малий шар пасів (кілометри)

Комплексне застосування цих методів (наприклад, поєднання наземних спостережень та супутникових даних) дозволяє досягнути високої чутливості та надійності в оцінці вертикальних деформацій.

1.3. Природні та техногенні чинники вертикальних зміщень у Карпатському регіоні

Карпатський регіон України репрезентує одну з найбільш геодинамічно активних територій Центральної та Східної Європи. Складна геологічна структура цього регіону, сформована переважно в альпійському орогенезі, визначає його сучасну геодинаміку і зумовлює інтенсивні процеси вертикальних деформацій земної поверхні.

Головними природними чинниками, що зумовлюють вертикальні рухи земної кори в Карпатах, є тектонічні процеси, сейсмічна активність, гідрометеорологічний вплив, а також екзогенні геологічні явища. Карпатський регіон розташовується в межах активної тектонічної зони, що охоплює складчасті Карпати, Передкарпатський та Закарпатський прогини. За даними GNSS-спостережень, у межах цього регіону спостерігається як підняття, так і локальні ділянки просідання земної поверхні. Загальна тенденція вертикальних переміщень (1–2 мм/рік) є наслідком складних взаємодій плитових структур, впливу астеноліту, особливостей глибини залягання фундаменту тощо [31].

Сейсмічна активність, зокрема на території Закарпаття й прилеглих районів, є важливим чинником просторової диференціації вертикальних деформацій. Згідно з результатами наукових досліджень обробки даних GNSS-мережі «GeoTerrace» [31, 26], встановлено дуже складну картину деформацій території Заходу України (див. рис. 1.3.1.). Більшість станцій зазнають висотних просідань, у тому числі й у межах Карпат, що пояснюється активністю денудаційних процесів. Проте на схилах Українського щита спостерігається чітка кореляція між вертикальними зміщеннями й глибиною залягання поверхні кристалічних порід, що вказує на наявність ізостатичного вирівнювання. На територіях, відповідних великим глибинним розломам, особливо на Закарпатті, виділяються зони активного стиснення земної кори, які, імовірно, являють собою зони накопичення тектонічних напружень.

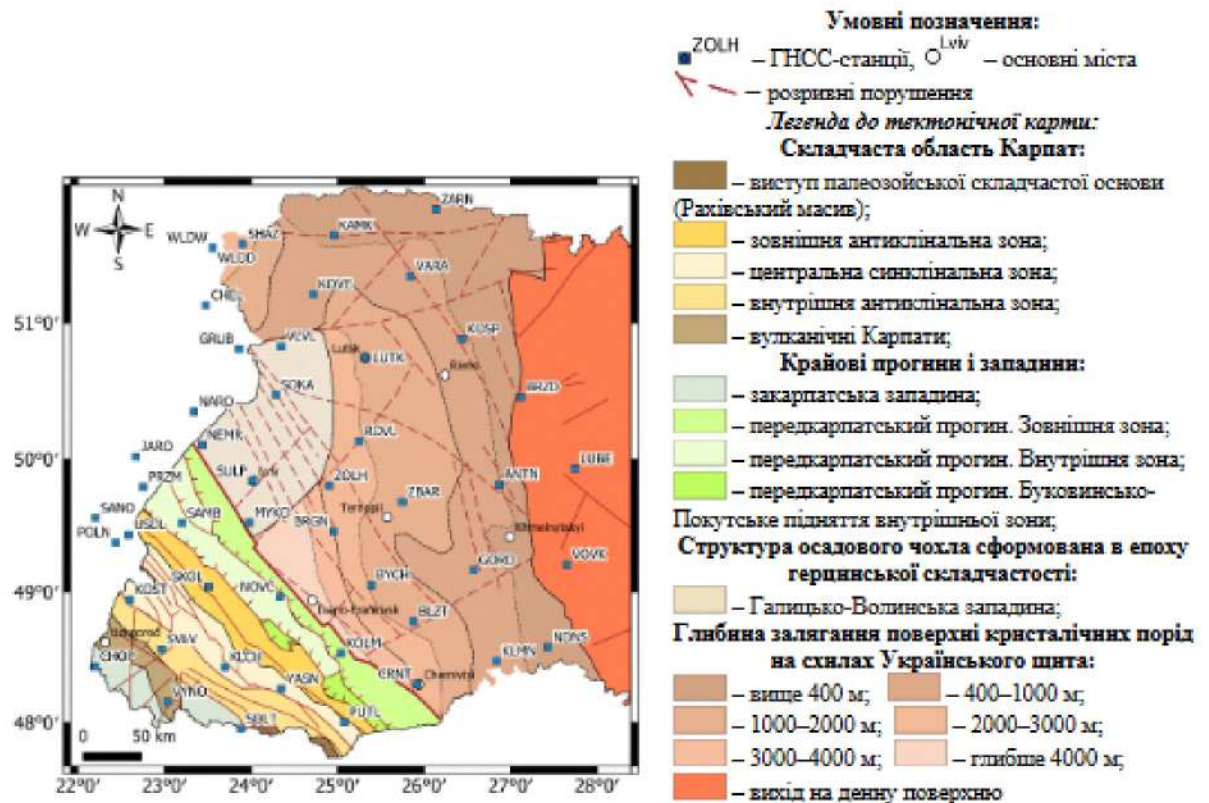


Рис. 1.3.1. ГНСС-станції на тлі тектонічної карти території Заходу України

Закарпатський глибинний розлом представляє одну з найважливіших сеймотектонічних структур регіону. Дослідження показали, що в зоні перетину Закарпатського та Оашського глибинних розломів спостерігається складна сейсмофокальна зона із землетрусами на різних глибинах. Поряд з традиційною для регіону неглибокою локалізацією сейсмічних джерел у земній корі Закарпатського прогину (глибини 0–27 км), у південно-західній частині регіону зареєстровано землетруси на глибинах 40–52 км, що вказує на занурення структур земної кори Закарпатського прогину під насуви Складчастих Карпат. Цей процес супроводжується як вертикальними, так і горизонтальними деформаціями земної поверхні.

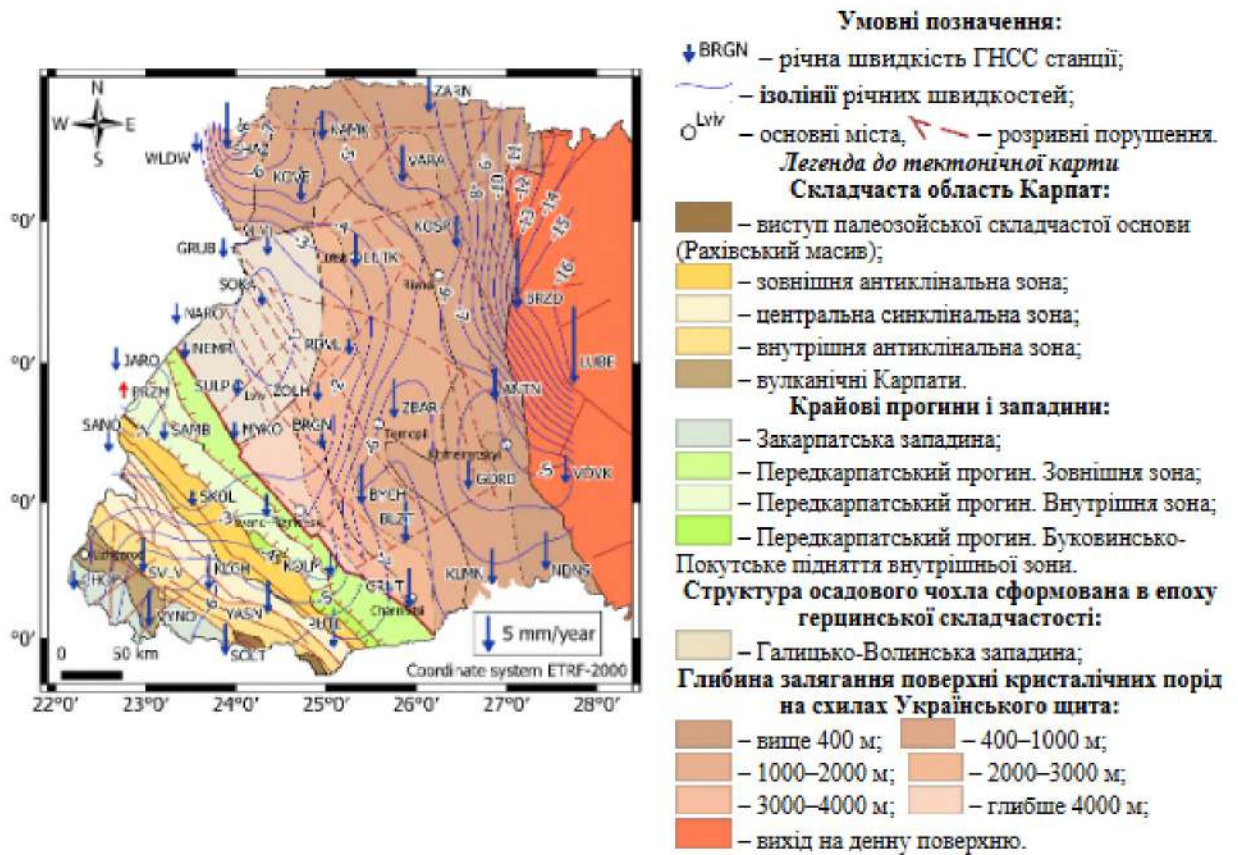


Рис. 1.3.2. Вертикальні зміщення на території Заходу України за ГНСС-даними з 2018 по 2021 роки

Гідрометеорологічний режим накладає додаткові варіації на динаміку вертикальних рухів. Зволоження, опади, паводки та сезонні зміни рівня підземних вод сприяють тимчасовим деформаціям земної поверхні, що є особливо вираженим на лесових ділянках і схилах із малопотужним ґрунтовим покривом. Інтенсивні атмосферні зливи корелюють із локальними землетрусами та зсувними процесами.

Планомірна господарська діяльність людини в Карпатах є одним із суттєвих факторів активізації вертикальних рухів і деформації ґрунтів. Зокрема, масова вирубка лісів, яка досягла упродовж 20 років обсягів у 161 тис. га (близько 10% площі лісів), істотно ослабила схиліві системи та підвищила ризик розвитку зсувних процесів і паводків. Втрата деревного покриву негативно впливає на акумуляцію води, підвищує ризик ерозії і формування селевих потоків.

Зсувні процеси поширені в межах майже всіх структурно-фаціальних зон Карпат. Особливо активні вони в районах, де мають місце літологічно

неоднорідні флішові товщі, особливо в контактах між утвореннями з різною фізико-механічною міцністю. На території Карпатського модельного полігону (Свалявський та Воловецький райони) виявлено понад 200 зсувів, значна частина яких активізувалась протягом останніх десятиліть, особливо під час великих паводків 1998 та 2001 років. Ці процеси супроводжуються поточними вертикальними зміщеннями, які можуть становити кілька десятків сантиметрів протягом кількох років.

Видобуток корисних копалин і підземних вод також супроводжується локальними просіданнями поверхні, ущільненням і зміною технічних характеристик ґрунтів. Особливу небезпеку становить надмірний забір ґрунтових вод, що призводить до суфозії та утворення просадкових структур, деформації доріг, будівель та інших інфраструктурних об'єктів. У Солотвинській западині, де раніше проводилась розробка кам'яної солі, спостерігалось формування соляного карсту, який супроводжував локальні деформації і провалля земної поверхні. Хоча видобуток солі нині істотно скорочений, ефекти від попередньої діяльності тривають.

Інтенсивне будівництво та розширення інженерної інфраструктури супроводжуються локальними змінами стресового й деформаційного стану земної кори. У межах Карпатського полігону проходять магістральні газо- та нафтопроводи, залізниці та автомобільні дороги, розташування яких значною мірою визначається морфологією місцевості й геодинамічним станом.

На ділянці Делятин—Рахів Львівської залізниці близько 30% деформацій земляного полотна пов'язано з руйнуванням укріплювальних споруд. Зміщення великих мас ґрунту на косогорах створює постійну загрозу безпеці руху. Крім того, вибудування залізниці в гірських умовах вимагає утворення глибоких виїмок на схилах, що, зі своєю чергу, сприяє активизації зсувних процесів.

Вертикальні зміщення у Карпатському регіоні визначаються складною взаємодією природних і техногенних чинників. Серед природних чинників провідну роль відіграють тектонічна активність, сейсмічність, гідрометеорологічні процеси й екзогенні геологічні явища. Техногенні чинники,

особливо вирубка лісів, видобуток ресурсів і будівництво, значно посилюють природні деформаційні процеси.

Висновки до 1-го розділу.

В даному розділі було охарактеризовано причини виникнення вертикальних деформацій, показано основну їх характеристику. Окрему увагу було приділено методам спостереження за деформаціями, виконано порівняльний аналіз їх дієвості, а також описано основні причини виникнення зсувних процесів в Карпатському регіоні.

РОЗДІЛ 2. ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГІОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Геолого-геоморфологічні та інженерно-геологічні особливості

Селище Солотвино розташоване у Тячівському районі Закарпатської області України, на правому березі річки Тиси, безпосередньо біля кордону з Румунією. Цей регіон характеризується унікальним поєднанням геологічних, геоморфологічних та інженерно-геологічних умов, зумовлених наявністю великої солянокупольної структури, складною тектонічною будовою Закарпатського прогину та специфічним рельєфом, сформованим взаємодією гірських масивів і річкових долин.



Рис. 2.1.1. Територія с. Солотвино

У тектонічному відношенні досліджувана територія входить до складу Закарпатського прогину — великої геологічної структури, що простягається паралельно Карпатам смугою завдовжки близько 150 км і завширшки 25–35 км. Закарпатський прогин по поверхні співпадає з площею поширення неогенових осадових і вулканічних порід. Глибинними межами прогину є Закарпатський глибинний розлом на північному сході та зона Припаннонського розлому (Берегівська зона горстів) на південному заході.

Закарпатський прогин сформувався на твердому фундаменті Внутрішніх Карпат протягом олігоцену — пізнього сармату і характеризується нагромадженням потужних товщ піщано-глинистих відкладів з прошарками ліпаритових туфів, бурого вугілля і товщами кам'яної солі. Потужність неогенових моласових відкладів досягає 2–3 км. Донеогенова основа прогину складена блоками, поверхня яких утворена палеогеновими, мезозойськими і палеозойськими відкладами, розбитими розломами на блоки розміром $3\text{--}5 \times 8\text{--}10$ км.

У межах Закарпатського прогину виділяють дві основні улоговини — Чоп-Мукачівську і Солотвинську, розділені Шолеським глибинним розломом. Солотвинська западина розташована у південно-східній частині прогину і характеризується переважним розповсюдженням баденієвих відкладів, тоді як Чоп-Мукачівська улоговина виповнена переважно сармат-пліоценовими осадами. У південно-східній частині Закарпатського прогину простягається ланцюг соляних куполів, які іноді виходять на денну поверхню або проявляються у морфології рельєфу [13].

Солотвинське родовище кам'яної солі є одним з найбільших в Україні і становить головний геологічний об'єкт досліджуваної території. З погляду тектоніки Солотвинське родовище представляє собою шток солянодіапірової структури — діапіровий купол первинної баденської соленосної формації неогену (див. рис. 2.1.2.).

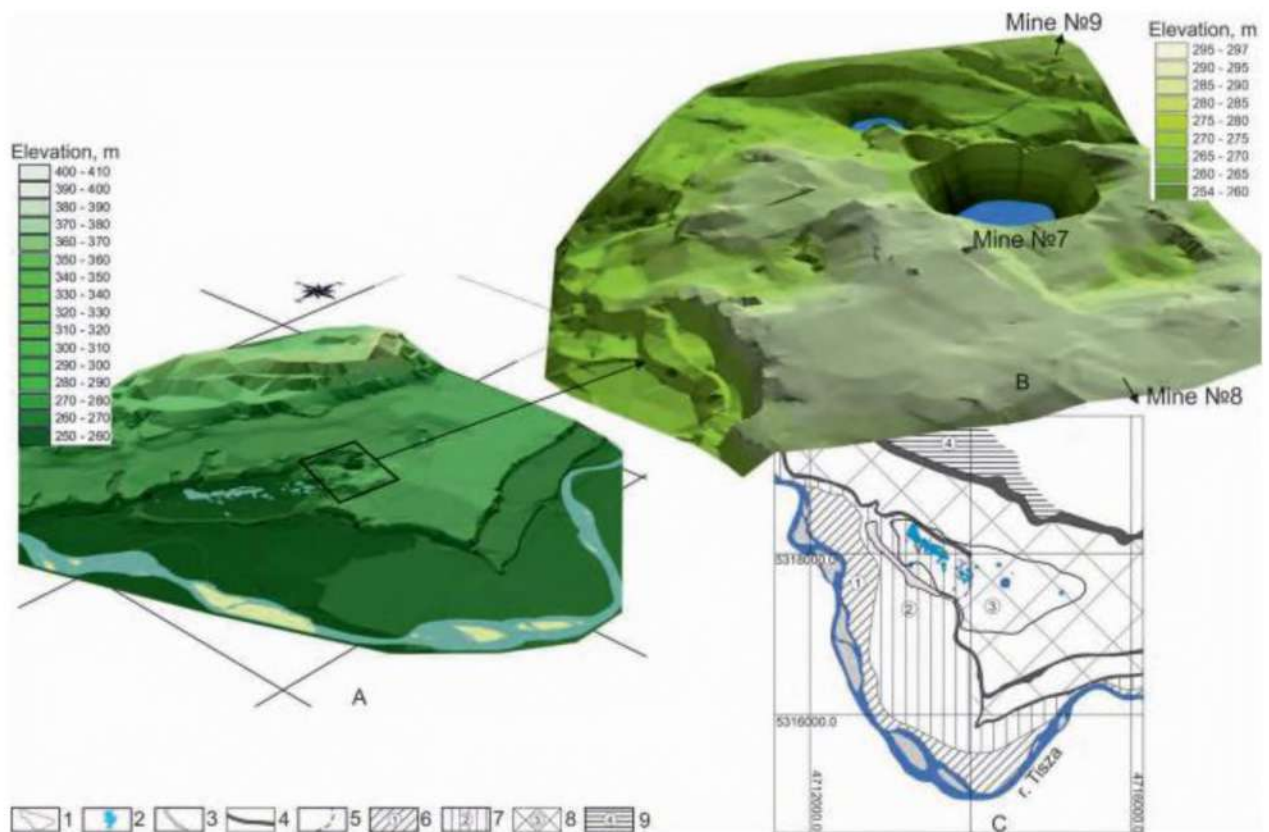


Рис. 2.1.2. Геоморфологічна модель Солотвинського родовища кам'яної солі

Залягання кам'яної солі приурочене до штоку, що утворився внаслідок постседиментаційного галокінезу — тиску на соляні породи теригенних товщ, які залягають вище, та їх переходу у пластично-в'язкий стан. Соляний діапір має форму трапеції з округлими кутами, з довшою північною стороною під схилом гори Магури.

Морфометричні характеристики соляного тіла:

- Довжина довгої осі купола під алювіальними відкладами: 1,84 км;
- Довжина короткої осі: 0,71 км;
- Площа на поверхні: близько 0,09 км²;
- На відмітці -81 м: довжина 2,90 × 1,10 км, площа 2,05 км²;
- Абсолютні відмітки поверхні солі: від +187 до +285 м.

Особливості морфології соляного тіла відбивають відмінності у будові західної та східної частин структури. Західна частина має видовжену форму з орієнтуванням довгої осі за карпатським простяганням. Східна частина є більш

округлою, а її довша вісь орієнтована на північний схід. Поверхня ядра соляної структури характеризується значною розчленованістю.

Основні морфометричні характеристики рельєфу обумовлені положенням містечка на правому березі річки Тиси, між гірськими хребтами Славаном і Магурою, а також наявністю в надрах солянокупольної структури, яка впливає на морфологію поверхні [5].

Сельбищна територія Солотвино знаходиться на розчленованому рельєфі з абсолютними відмітками від 257–295 м до 390–400,8 м. Перепад висот у межах селища становить понад 140 м, що створює значний потенціал для розвитку гравітаційних процесів.

Схили становлять близько 25% території і представлені:

- Уступами 1-ї та 2-ї надзаплавних терас річки Тиси — короткі (до 50 м), круті ($15\text{--}45^\circ$) схили від північно-західної до південно-східної експозиції;
- Південним схилом гори Магури — довгий (500–1000 м), середньої крутизни ($5\text{--}35^\circ$), від південно-західної до південно-східної експозиції.

Терасовий комплекс річки Тиси — у районі Солотвино розвинена система надзаплавних терас. Четверта тераса (40–50 м) наявна у долині Тиси від Рахова до Хустських воріт. Алювій потужністю 2–8 м представлений галечниками з лінзами гравію, сірих муловатих суглинків і глинистих пісків. Третя тераса (20–30 м) у басейні Тиси трапляється рідко.

Заплава річки Тиси — найменш диференційована, слабонахилена ($0\text{--}5^\circ$) поверхня з ускладненим поверхневим та підземним стоком. Заплава у верхів'ї Тиси представлена вузькою смугою (30–60 м), нижче — часто одностороння, завширшки від кількох десятків метрів до 1,5–2 км.

За інженерно-геологічними умовами територія Солотвино поділяється на кілька характерних зон, кожна з яких має свої специфічні особливості, що визначають придатність до освоєння та ступінь небезпеки.

Закарпатська область має складну геологічну та інженерну будову, що є результатом взаємодії геологічних, тектонічних та геоморфологічних процесів. Ці особливості значною мірою визначають характер будівельних робіт у регіоні

та ризики, пов'язані з будівництвом, зсувами та іншими геомеханічними процесами. Масштаби різних екзогенних геологічних процесів і пов'язаних з ними змін геологічного середовища визначаються особливостями геологічної будови, складом гірських порід, тектонічними рухами, геоморфологією, гідрогеологією і загальними кліматичними та метеорологічними умовами. Регіональні комплекси ЕГП, що розвиваються в подібних умовах, розміщуються на основі інженерно-геологічного районування території.

Більшу частину Верхньотисенської котловини займає низька терасована місцевість Солотвинської котловини (3-2-138), яка складається з потужної меляси неогенових порід. На гірських ділянках залягають неогенові водотривкі глинисті шари, з яких зсунулися четвертинні алювіальні ґрунти, а рельєф сильно розчленований і крутосхилий, що створює умови для виникнення зсувів; на ділянках, де відслонюються соляні шари тереблянської свити, розвинувся карст; на ділянках, де відслонюються соляні шари тереблянської свити, розвинувся карст; на ділянках, де відслонюються соляні шари тереблянської свити, розвинувся карст. Бічна ерозія та підтоплення відбуваються локально в районах долин.

Зона соляного штоку — найскладніша в інженерно-геологічному відношенні. Характеризується наявністю соляного тіла на невеликій глибині від поверхні, інтенсивним розвитком карстово-суфозійних процесів, нерівномірними осіданнями та провалами. Несуча здатність ґрунтів у цій зоні різко знижена внаслідок розущільнення породного масиву.

Зона річкових терас — представлена алювіальними відкладами різної потужності. Інженерно-геологічні умови визначаються літологічним складом алювію, глибиною залягання ґрунтових вод та схильністю до підтоплення і затоплення під час паводків.

Зона схилів — характеризується розвитком гравітаційних процесів, схилової ерозії, наявністю ділянок "п'яного лісу", що свідчить про повільні схиліві деформації.

Басейни Карпатської складчастої області характеризуються великою кількістю опадів, гірським рельєфом і крутими схилами, що зумовлює високу водність і швидкий стік за рахунок поверхневого стоку, створюючи зону інтенсивного водообміну. Складність геологічної будови Карпатської складчастої зони зумовлює складні гідрогеологічні умови залягання підземних вод. По-перше, тут відсутні водоносні горизонти з площинами і перетинами, що перекриваються, води щільно сконцентровані в тектонічно тріщинуватих зонах, а мінералізовані і гідротермальні води локалізовані в усічених вузлах.

Закарпатський басейн є зоною повільного водообміну і значної мінералізації підземних вод. Найбільш водоносними є четвертинні алювіальні та озерно-алювіальні відклади, які утворюють витримані в плані та по глибині водоносні горизонти. Вода розподілена по більш давніх корінних породах.

Нижче за даними робіт надається перелік основних водоносних горизонтів території Закарпаття, які безпосередньо впливають на умови розвитку ЕГП:

- Водоносний горизонт верхньоплейстоцен - голоценових алювіальних відкладів заплав і перших надзаплавних терас ($aP_{III} + H$);
- Водоносний горизонт середньо - верхньоплейстоценових озерно - алювіальних відкладів минайської світи (IaP_{II-III} пш);
- Водоносний горизонт нижньо - верхньоплейстоценових алювіальних відкладів ($aP_I - P_{III}$);
- Водоносний горизонт еоплейстоцен-нижньоплейстоценових алювіальних відкладів високих терас ($aE - P_I$);
- Водоносний горизонт спорадичного поширення в алювіально - делювіальних ($ed E - H$), делювіально - колювіальних ($dc E - H$) відкладах еоплейстоцен - голоцену;
- Водоносний комплекс в вулканогенних осадових породах верхньоміocen-пліоценового віку ($N1-2$);
- Водоносний комплекс у відкладах сармату (Nis);
- Водоносний комплекс у відкладах бадену (Nib);

- Водоносний комплекс спорадичного поширення підземних вод у флішових відкладах палеогену (Ш);
- Водоносний комплекс спорадичного поширення у флішових відкладах крейди (АС);
- Водоносний комплекс у відкладах мезозою і протерозою - палеозою (PR-PZ).

Гідрогеологічні умови є одним з визначальних факторів розвитку небезпечних процесів у Солотвині.

Основний водоносний горизонт приурочений до алювіальних відкладів заплави і характеризується такими параметрами:

- Глибина залягання ґрунтових вод: 0,5–2,5 м;
- Амплітуда коливання рівня: 1,0–1,5 м;
- Потужність водоносного горизонту: 3,5–32 м;
- Коефіцієнт фільтрації: 10–1375 м/добу (значна неоднорідність).

Активний перебіг карстових процесів визначають три типи підземних вод:

- Надсольові води — приурочені до осадових утворень кватеру;
- Навколосольові води — пов'язані з солотвинською та тересвинською світами;
- Внутрішньосольові води — приурочені до верхньотереблінської підсвіти, переважно техногенно-карстові води затоплених гірських виробок.

На продовженні осі соляного куполу вниз за потоком відмічається поширення солоних та солонуватих вод на відстань до 1000 м до кінця заплавної тераси.

2.2. Кліматичні особливості району як передумова утворення зсувних процесів

Клімат Закарпаття, до якого належить і територія Солотвино, характеризується як помірно континентальний з достатнім і надмірним

зволоженням, м'якою зимою з частими відлигами, нестійкою тривалою весною, нежарким літом та теплою осінню. Такий тип клімату формується під впливом кількох основних чинників.

Територія знаходиться у південних широтах помірного поясу, що забезпечує значний запас тепла. Річний радіаційний баланс на території Закарпатської низовини становить 1800–1830 МДж/м², а сумарна річна сонячна радіація — 4000–4100 МДж/м².

Основний вплив на температуру і вологість здійснює тепла течія Гольфстрім. Завдяки надходженню атлантичних повітряних мас клімат регіону значно м'якший, ніж на тих самих широтах у східній частині України. На території Закарпаття панують атлантичні та трансформовані континентальні повітряні маси, іноді сюди проникають арктичні повітряні маси.

У гірських районах спостерігається гірсько-долинна циркуляція, дмуть схилі вітри, виникають фени — теплі сухі вітри, що спускаються з гір. Щороку взимку із Середньодунайської низовини на Закарпаття приходять теплі повітряні маси, що сприяє м'якості зим у регіоні.

Середня швидкість вітру в районі Солотвино невелика і становить 1,4–1,8 м/с. Найвітряніші місяці — березень, квітень та травень, коли швидкість вітру може досягати 1,7–1,8 м/с. У захищеній гірськими хребтами долині Тиси вітер зазвичай слабкий, що сприяє формуванню специфічного мікроклімату.

Середня річна температура — на території Закарпатської низовини середня річна температура повітря коливається від +9 до +10°C. У районі Солотвино цей показник близький до +9,5°C, що відповідає теплій кліматичній зоні.

Найхолодніший місяць — січень із середньою температурою від -2,8°C до -3°C на низинних ділянках. У окремі роки мінімальні температури можуть опускатися до -28...-33°C, хоча такі значні морози трапляються рідко.

Найтепліший місяць — липень із середньою температурою +20°C на рівнині та +25...+27°C у найтепліші дні. Серпень є другим за теплотою місяцем із середньою температурою близько +19°C.

Річна амплітуда температур — на території Закарпаття коливається від 20 до 24°C, що свідчить про помірну континентальність клімату. Міждобова мінливість температури на Закарпатті рідко перевищує 4°C.

Закарпаття є одним з найбільш зволжених регіонів України. Середня річна кількість опадів на території області змінюється від 636 мм на рівнинних ділянках до 1411–1600 мм у гірських районах. Таку значну різницю можна пояснити наявністю гір, які зумовлюють підняття повітряних мас по схилах з подальшим утворенням орографічних хмар.

У районі Солотвино, що розташоване у долині Тиси на переході від гірської до рівнинної частини, річна кількість опадів становить приблизно 700–900 мм. За теплий період (квітень–жовтень) випадає 416–900 мм, а за холодний період (листопад–березень) — 220–530 мм.

Коефіцієнт зволоження території Закарпаття (за формулою М.М. Іванова) становить 0,96–1,43, що свідчить про достатнє та надмірне зволоження. Це означає, що кількість опадів, як правило, перевищує або дорівнює випаровуваності, що створює умови для активного живлення поверхневих та підземних вод.

Кліматичні умови мають важливе значення для розвитку карстових процесів на території Солотвинського родовища, інтенсивні опади сприяють надходженню агресивних (недонасичених) вод до соляного штоку, що інтенсифікує процеси розчинення солі.

Унікальний мікроклімат соляних озер та підземних виробок Солотвино має важливе рекреаційно-оздоровче значення, що робить регіон привабливим для бальнеологічного туризму. Водночас сучасні тенденції зміни клімату можуть призвести до посилення несприятливих геологічних процесів та вимагають організації системи моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні.

2.3. Вплив гірничих робіт і затоплення шахт на формування провалів

Проблема формування карстових провалів на території Солотвинського родовища кам'яної солі є яскравим прикладом техногенно-активізованих геологічних процесів, що виникають внаслідок тривалої гірничодобувної

діяльності та подальшого некерованого затоплення підземних виробок. Понад два століття промислового видобутку солі створили унікальну систему підземних порожнин, яка після припинення експлуатації та інтенсивного надходження підземних вод перетворилась на джерело небезпечних деформацій земної поверхні.

Видобуток солі в Солотвині має тривалу історію, що сягає античних часів. Кам'яну сіль із Солотвинського солерудника добували ще римські легіонери в IV–X ст. Перша шахта "Христина" в Солотвині закладена у 1777 році. Понад 230 років солевидобувні підприємства були містоутворюючими [21].

Із зведеною інформацією про гірничодобувну діяльність можна ознайомитись із рисунку 2.3.1.

	The name of the mine	Start of extraction	Completion of extraction	Cause of the completion of extraction
1	Kristina mine	1778	1781	low-quality salt
2	Albert mine	1781	1789	water inrush because of the implosion of the surface
3	Kunigunda mine	1789	1905	water inrush because of the implosion of the surface
4	Nicholas mine	1789	1905	water inrush because of the implosion of the surface
5	Joseph mine	1804	1850	low-quality salt, water inrush
6	Old Louis mine	1804	1810	low-quality salt
7	Francis mine or mine 7	1809	1953	water inrush
8	New Louis mine or mine 8	1886	2007	water inrush
9	Mine 9	1975	2008	water inrush
10	Mine 10		made at the end of the 1980s but has never worked	

Рис. 2.3.1. Зведена інформація про гірничодобувну діяльність у Солотвині

За довгу історію видобутку солі було застосовано різні методи: від видобутку розсолу (розчинення солі прісною водою) до традиційного підземного видобутку із застосуванням вибухових робіт та різальних машин у глибоких шахтах.

За радянських часів видобуток солі значно збільшився. Якщо в 1946 році обсяг видобутку становив 232 тис. тонн, то в 1970 році він досяг 451 тис. тонн (близько 10% загального видобутку солі в УРСР), а в 1977 році — рекордних 744 тис. тонн.

Гірничі виробки суттєво впливають на розвиток соляного карсту через ряд взаємопов'язаних механізмів:

Порушення водозахисної товщі — проведення шахтних стовбурів, штреків та видобувних камер порушує цілісність глинистого "палагу" — елювіальних глин, що природно захищають соляний купол від проникнення агресивних вод. Ділянки відсутності палагу, виявлені ще дослідженнями Г.В. Короткевича (1970), є зонами активного карстоутворення.

Зміна гідродинамічного режиму — осушення шахт насосними установками створює депресійну лійку, яка змінює напрямки руху підземних вод та інтенсифікує їх контакт із соляними породами. При відкачці води зі швидкістю 200–500 м³/год формується потужний фільтраційний потік через соленосну товщу.

Створення підземних порожнин — вироблений простір шахт являє собою систему порожнин загальним об'ємом у мільйони кубометрів, які при затопленні стають областями розвантаження підземних вод та осередками інтенсивного карстоутворення.

З середини 1990-х років на родовищі почали накопичуватися проблеми, насамперед гідрогеологічні, які призвели до небезпечної екологічної ситуації техногенного характеру. У 2010 році ситуація набула статусу надзвичайної ситуації державного рівня.

Аналіз послідовності подій дозволяє виділити характерні етапи техногенної активізації карсту:

Етап накопичення (до 2001 р.) — тривала експлуатація родовища призводила до поступового порушення природних водозахисних бар'єрів, накопичення деформацій у масиві та розширення зон тріщинуватості. Водоприплив у шахти залишався контрольованим.

Етап активізації (2001–2006 рр.) — прогресуюче руйнування водозахисних бар'єрів та розкриття гірничими виробками тріщинуватих зон призвело до різкого збільшення водопритоку. На шахті № 9 водоприплив почався з капіжу на глибині 365 м і поступово зростав.

Етап катастрофічного розвитку (2006–2010 рр.) — водоприплив на шахті № 9 досяг катастрофічних значень 500–600 м³/год, що перевищило

продуктивність насосного обладнання. Одночасно активізувались карстові процеси на земній поверхні з формуванням нових провалів.

Етап постмайнінгової еволюції (2010 р. — теперішній час) — після затоплення шахт карстові процеси продовжують розвиватися, хоча з певними ознаками стабілізації на окремих ділянках.

На Солотвинському родовищі застосовувалась камерно-стовпова система розробки, яка є типовою для соляних родовищ з потужними пластами. Сутність цієї системи полягає у виїмці корисної копалини камерами з залишенням між ними міжкамерних ціликів — масивів непорушеної солі, які забезпечують підтримання покрівлі виробок та покриваючих порід.

Район болота "Чорний Мочар" став епіцентром катастрофічного провалоутворення, безпосередньо пов'язаного із затопленням шахти № 9. Геологічний аналіз показав, що саме тут знаходилося місце прориву води у гірничі виробки.

Основні прояви техногенної деградації:

- Затоплення соляних шахт №7, 8 та 9
- Катастрофічний розвиток соляного карсту
- Руйнування міжповерхових та міжкамерних ціликів відпрацьованого простору
- Утворення великих провалів (у квітні 2015 р. — провалля площею 5,5 тис. м², об'ємом понад 200 тис. м³)
- Засолення підземних вод
- Деградація ландшафту
- Загроза транскордонного забруднення р. Тиса

4 липня 2013 року прийнято рішення ліквідувати ДП "Солотвинський солерудник". Припинено функціонування підземного відділення спелеосанаторію Української алергологічної лікарні, втрачено унікальну низькофонову лабораторію Інституту фізики НАН України.

За інтегральною комплексною оцінкою проявів небезпечних процесів територію Солотвино умовно поділено на 16 зон різного ступеня небезпеки.

У квітні 2015 р. біля Солотвинського водоканалу по вул. Воз'єднання стався провал ґрунту габаритними розмірами 60×50 м, глибиною близько 45 м, загальним об'ємом близько $100\,000\text{ м}^3$. Утворилося карстове провалля з гострими краями, що свідчить про продовження просідання ґрунту.

На сьогодні на території Солотвино нараховується понад 140 локальних ділянок розвитку карсту загальною площею понад $12,3\text{ км}^2$.

За даними моніторингових спостережень:

Швидкість осідання поверхні:

- У межах шахтних полів: до 17 мм/рік
- Сумарне осідання за три роки: 169–258 мм
- Локальні зони осідань: 5–20 мм/рік (за даними супутникової інтерферометрії)

Швидкість карстоутворення:

- Горизонтальний напрямок: 0,6–0,75 м/рік
- Вертикальний напрямок: 0,4–0,5 м/рік

Параметри провалів:

- Суфозійно-карстові воронки: діаметр 2–7 м, глибина 1–3 м
- Провальні карстові воронки: площа до $43,4\text{ тис. м}^2$ з ослабленою зоною до 100 м
- Карстові колодязі: діаметр 2–2,5 м, глибина 8–15 м

Дослідженнями встановлено існування в межах Солотвинського родовища єдиної карстової гідрогеологічної системи, яка охоплює усі гірничі об'єкти — шахти № 7, 8 та 9, дренажні штольні та шурфи, соляні озера — і характеризується просторово-часовою мінливістю.

Моніторинговими спостереженнями виявлено ефект самотампонування карстового каналу в районі Чорного Мочара. Заповнення жерла провалу та

крайніх камер осадом нерозчинних порід призвело до припинення гідравлічного зв'язку між карстовим каналом та виробленим простором шахти № 9.

Це явище дає підстави для обережного оптимізму щодо можливості часткової стабілізації ситуації. Деякі науковці вважають можливим осушення шахти № 9 та відновлення підземного відділення алергологічної лікарні, хоча для підтвердження цього необхідні додаткові дослідження.

У зоні можливих карстових провалів опинились:

- 292 житлові будинки;
- Система водопостачання;
- Залізнична станція;
- Поліклініка;
- 2 школи;
- Частина автодороги державного значення Мукачево—Рогатин.

Затоплення шахт № 8 та № 9 у 2008–2010 роках стало кульмінацією техногенної деградації родовища. Катастрофічне збільшення водопритоку, неможливість його контролю та наступне затоплення гірничих виробок призвели до масштабного провалуутворення на земній поверхні. Вивчення механізмів впливу гірничих робіт і затоплення шахт на формування провалів є необхідною передумовою для організації ефективного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні, прогнозування розвитку небезпечних процесів та розробки заходів з мінімізації ризиків для населення і інфраструктури селища Солотвино.

Висновки до 2-го розділу.

У цьому розділі проведено комплексну характеристику фізико-географічних, геологічних та геоморфологічних особливостей, а також показано їх вплив на виникнення екзогенних процесів, котрі були доповнені антропогенною діяльністю.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ СУПУТНИКОВОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ

3.1. Принцип роботи радарної інтерферометрії (InSAR)

У сучасній практиці геодезичного моніторингу деформаційних процесів земної поверхні провідне місце посідають методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Серед них найбільш ефективною та високоточною технологією є радарна інтерферометрія з синтезованою апертурою (InSAR — *Interferometric Synthetic Aperture Radar*). Цей метод, що базується на аналізі фазових характеристик відбитого мікрохвильового сигналу, дозволяє виявляти зміщення земної поверхні та інженерних споруд з міліметровою точністю на значних територіях, що робить його незамінним інструментом для дослідження геодинаміки в складних природно-техногенних умовах.

Особливої актуальності в задачах моніторингу повільних деформацій (просідань, зсувів) набув метод постійних розсіювачів (PSI — *Persistent Scatterer Interferometry*), який дозволяє подолати основні обмеження класичної інтерферометрії та забезпечити високу достовірність результатів.

Класична інтерферометрія базується на побудові інтерферограми – різниці фаз двох когерентних радарних зображень, отриманих над однією і тією ж ділянкою земної поверхні з близьких позицій орбіти (базис між знімками) та в різні моменти часу. Зміни фази відображають сумарний ефект різниці топографії, деформацій, похибок орбіти, впливу атмосфери й шумів. За умови вилучення топографічної складової з використанням цифрової моделі рельєфу та корекції орбітальних помилок залишається так звана залишкова фаза, яка переважно пов'язана з деформаціями земної поверхні у напрямку лінії візування супутника (line-of-sight, LOS) та атмосферними ефектами [23].

Виміряні за InSAR зміщення відповідають проєкції вектора реального переміщення на напрямок LOS. Для перетворення лінійно-візирних зміщень у вертикальну та горизонтальну компоненти використовують комбінацію даних з висхідних і низхідних орбіт, за необхідності – з різних супутникових платформ, а також геометричні моделі орієнтації вектора спостереження. У загальному

вигляді вертикальна компонента деформацій може бути апроксимована як функція LOS-зміщень з різних треків та кутів знімання, за умови, що горизонтальні компоненти руху є відносно невеликими або їх можна задати за зовнішніми даними [33].

Висхідні та низхідні проходи супутників дають можливість розділити спостережувані деформації LOS на вертикальні та горизонтальні складові. Геометрія огляду вектора LOS визначається кутом падіння ϑ , виміряним між нормаллю до поверхні та вектором огляду, а також курсом супутника α :

$$d_{\text{LOS}} = [-\sin \vartheta \cos \alpha \sin \vartheta \sin \alpha \cos \vartheta] \begin{bmatrix} d_{\text{EAST}} \\ d_{\text{NORTH}} \\ d_{\text{UP}} \end{bmatrix}.$$

Оскільки супутник проходить від полюса до полюса та освітлює поверхню під прямим кутом до траєкторії, спостережувана деформація LOS найменш чутлива до рухів у напрямку північ-південь. Цим компонентом зазвичай нехтують, а горизонтальний компонент руху інтерпретують як деформацію лише у напрямку схід-захід. На основі кута падіння ϑ точки відбиття землі можна розділити вертикальний d_{UP} та східно-західний d_{EAST} компонент деформації, що можна побачити на рисунку 3.1.1.

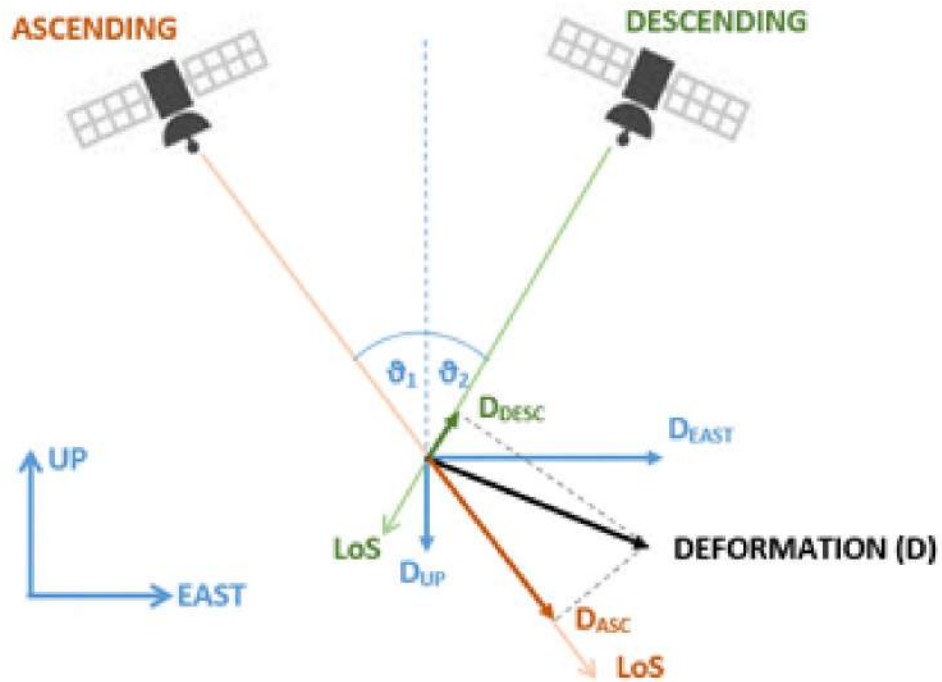


Рис. 3.1.1. Розкладання загальної деформації на висхідну та низхідну складові LOS, а також на вертикальну та квазігоризонтальну (схід-захід) складові

Однією з головних переваг InSAR є надвисока чутливість до деформацій – за оптимальних умов метод дозволяє реєструвати зміщення порядку кількох міліметрів на рік на великій площі, яка визначається смугою захоплення радарного супутника (десятки – сотні кілометрів завширшки). До важливих переваг також належать глобальність покриття, усепогодність зйомки, незалежність від освітлення, можливість ретроспективного аналізу (завдяки архівам SAR-даних), а також регулярність повторного знімання у рамках сучасних місій (Sentinel-1, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed тощо).

Однак класичний диференціальний InSAR, який використовує одну або декілька пар інтерферограм, суттєво обмежений явищем декореляції – втратою когерентності між радарними знімками через зміни розсіювальних властивостей поверхні у часі (рослинність, сніговий покрив, оранка, зволоження), а також великі часові й просторові базиси між зніманнями. Крім того, одиничні інтерферограми чутливі до атмосферних аномалій, похибок розгортки фази (unwrapping) та помилок цифрових моделей рельєфу. Для подолання цих обмежень упродовж останніх двох десятиліть були розроблені методи

багаточасового InSAR-аналізу, серед яких найвідомішими є PSInSAR/PSI та SBAS-InSAR [32, 29].

Багаточасові технології InSAR (Multi-Temporal InSAR, MT-InSAR) базуються на використанні не окремих пар знімків, а цілих стеків SAR-даних, зареєстрованих над однією територією впродовж тривалого періоду часу. Замість оцінювання деформацій за однією або кількома інтерферограмами, MT-InSAR будує часові ряди зміщень для великої кількості пікселів, оптимізуючи вибір інтерферометричних пар і враховуючи статистичні властивості сигналу та шумів.

Умовно виділяють дві основні концепції MT-InSAR: метод постійних розсіювачів (PSI) та метод малих базисів (SBAS).

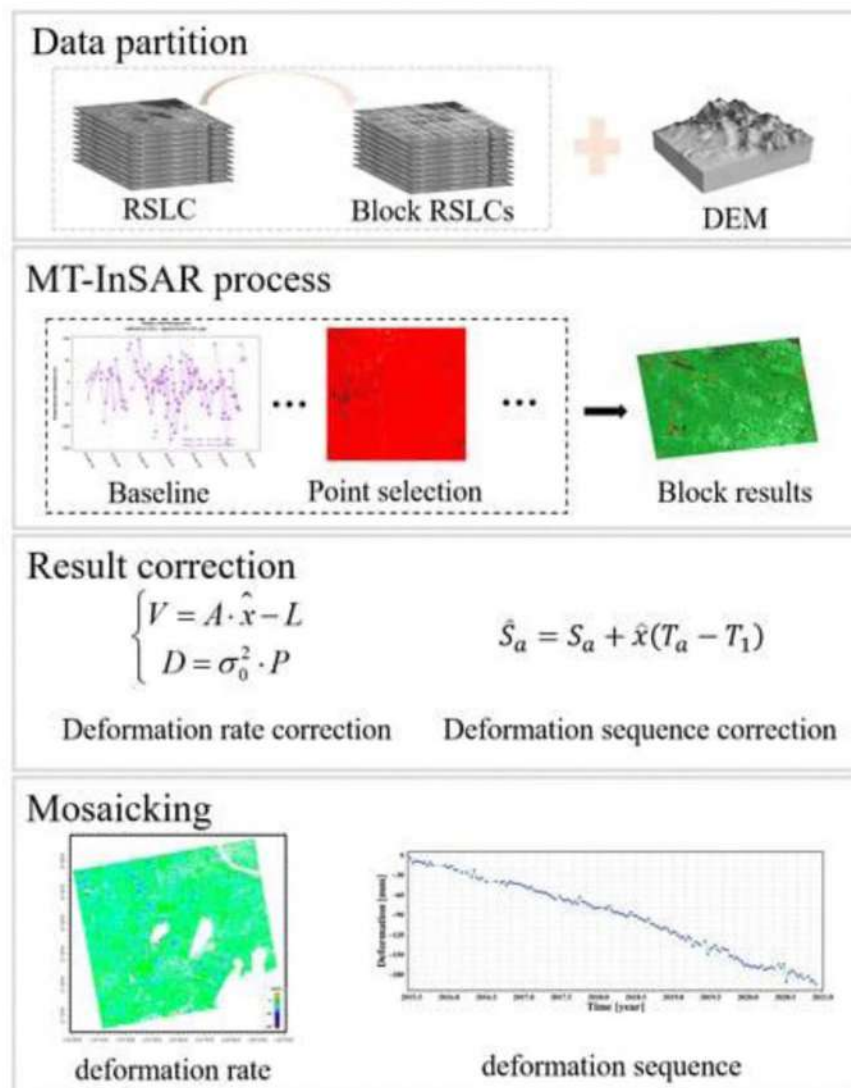


Рис. 3.1.2. Метод MT-InSAR в графічному поданні

PSI зосереджується на дискретній множині стабільних у часі радарних розсіювачів – переважно антропогенних об'єктах із високою відбивною здатністю (дахів будівель, інженерних споруд, інфраструктурних елементів, скельних виступів тощо), які зберігають високу когерентність упродовж усього періоду спостережень. SBAS-метод, навпаки, орієнтується на роботу з підмножиною інтерферограм з малими часовими та просторовими базисами, дозволяючи краще відпрацьовувати розподілені розсіювачі (natural distributed scatterers), хоча й із дещо гіршою точністю за окремі пікселі [18].

Метод постійних розсіювачів (PSI), запропонований у кінці 1990-х років і надалі розвинений у вигляді різних алгоритмічних реалізацій (PSInSAR, StaMPS, SqueeSAR, QPS тощо), став одним із ключових інструментів для прецизійного моніторингу деформацій у міських та інфраструктурно насичених територіях. Його суть полягає у статистичному виокремленні тих пікселів SAR-зображень, які зберігають стабільні радіолокаційні характеристики (амплітуду, фазу) впродовж часу й демонструють високий рівень когерентності у більшості інтерферограм. Подальший аналіз фази для цих точок дозволяє вилучити внесок топографічної помилки, атмосферної затримки та похибок орбіти, виділивши таким чином часовий ряд деформацій для кожного постійного розсіювача.

У типових реалізаціях PSI аналізується статистика фазових залишків і їхній зв'язок з амплітудою, відношенням сигнал/шум, геометрією знімання та властивостями поверхні. Модель деформацій часто задається у вигляді лінійного, квадратичного або складнішого (напр., сезонного) тренду, який оцінюється методом найменших квадратів або байєсівськими процедурами. Водночас моделюється просторово корельована атмосферна складова, яка змінюється між сценами, але є відносно гладкою у просторі. Поступове уточнення цих складових дозволяє досягати міліметрової точності оцінки середніх швидкостей деформацій та помітних нелінійних відхилень від тренду.

Типова схема PSI-аналізу включає низку послідовних етапів, які можуть мати специфічні особливості залежно від програмного забезпечення (PSInSAR,

StaMPS, GAMMA, SARPROZ, SNAP-StaMPS тощо), але загалом зберігають подібну логіку. Блох-схему обробки даних показано на рисунку 3.1.3.

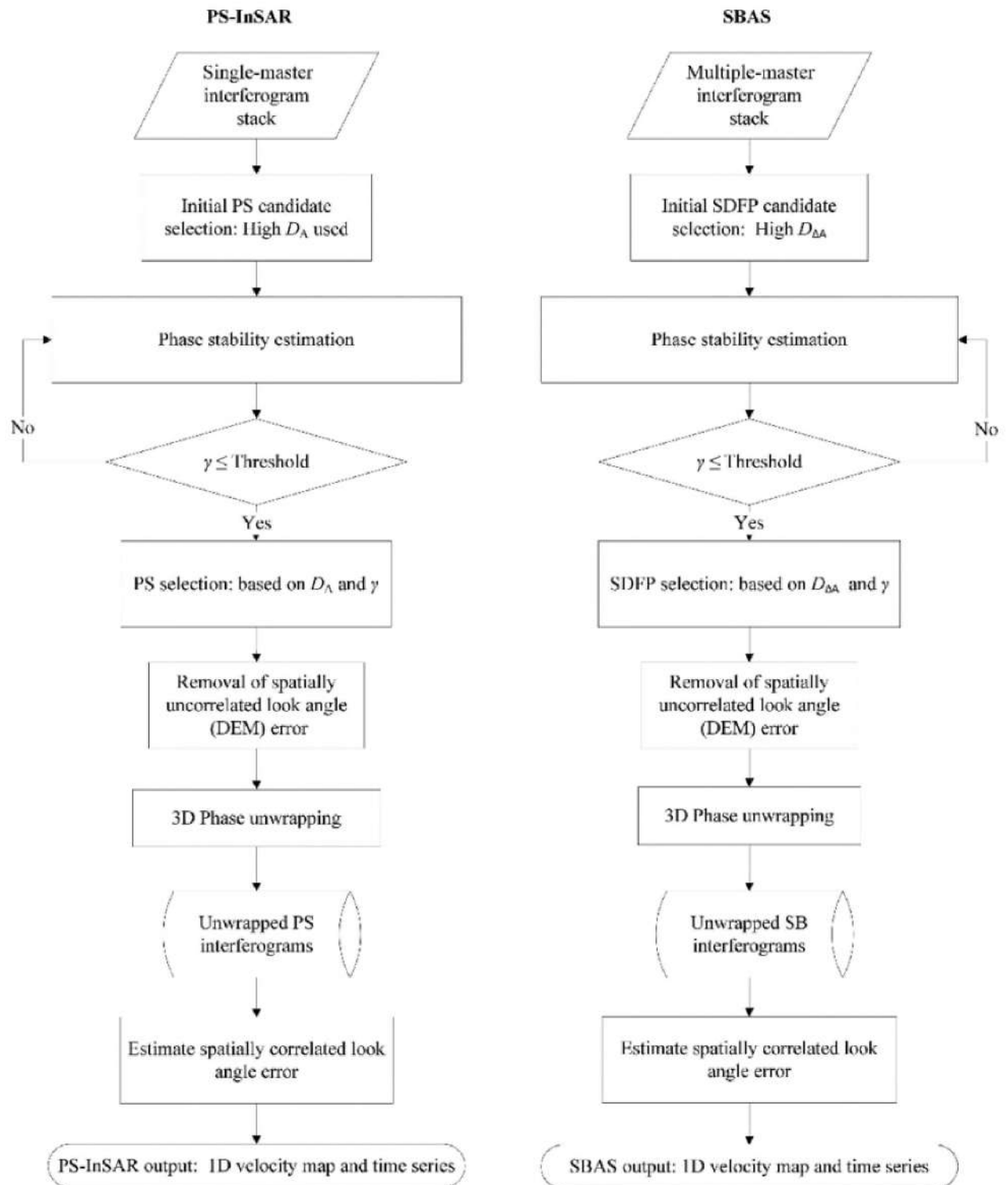


Рис. 3.1.3. Блох-схема обробки даних InSAR для стійкого розсіювача з використанням SNAP та StaMPS.

На першому етапі здійснюється відбір та попередня обробка стеку SAR-знімків. Враховуються параметри орбіти, час знімання, кут огляду, тип

поляризації та наявність зовнішньої цифрової моделі рельєфу. Виконується точна орбітальна корекція (apply precise orbit files), радіометричне калібрування та, за потреби, підрізання (subsetting) сцени до заданого району досліджень.

Далі обирається головний (master) знімок, до якого всі інші сцени (slaves) співставляються геометрично. Формується набір інтерферометричних пар master–slave з обмеженнями на просторовий (перпендикулярний) та часовий базиси з тим, щоб мінімізувати декореляцію, але водночас зберегти необхідну кількість інтерферограм для стабільної оцінки деформацій та атмосферних ефектів. Типовими є десятки або навіть сотні інтерферограм для одного стеку Sentinel-1, TerraSAR-X тощо [22, 25].

Після формування інтерферограм виконується вилучення топографічного внеску з використанням зовнішньої ЦМР (SRTM, ALOS DEM, національні моделей рельєфу), фільтрація шумів та згортка (multilooking) для покращення співвідношення сигнал/шум у залежності від поставленого завдання (детальність проти точності). На цьому етапі частково відсіваються області грубої декореляції – акваторії, густі ліси, високодинамічні поверхні.

Ключовий етап PSI – ідентифікація кандидатів у постійні розсіювачі. Використовуються статистичні критерії стабільності амплітуди (наприклад, коефіцієнт варіації) та попередні оцінки когерентності. На підставі цих показників виділяється підмножина пікселів, які з високою ймовірністю зберігають сталу розсіювальну характеристику у часі. Саме над цими точками надалі здійснюється детальне моделювання фази, оскільки для них ризик декореляції є мінімальним.

У результаті багатокрокової оптимізації отримуються: поправки до топографічної моделі (що дозволяє фактично уточнювати висотні відмітки для окремих постійних розсіювачів), часові ряди деформацій у напрямку LOS та оцінки атмосферної складової для кожної сцени. Для подальшого геофізичного інтерпретування часові ряди можуть бути згладжені, апроксимовані трендами, розкладені на сезонні та секулярні компоненти, а також зіставлені з результатами

традиційних геодезичних спостережень (нівелювання, GNSS-моніторинг) для валідації точності [27].

Крім того, PSI забезпечує високу просторову деталізацію – щільність постійних розсіювачів у міських умовах може сягати кількох тисяч точок на квадратний кілометр, що у багато разів перевищує густоту традиційних геодезичних мереж. Це дозволяє виявляти навіть локальні деформаційні аномалії, пов'язані з окремими будівлями, інженерними спорудами, ділянками колекторів, дорогами, насипами тощо.

Ще однією суттєвою перевагою є можливість ретроспективного аналізу. Архіви SAR-знімків (ERS-1/2, ENVISAT, RADARSAT, ALOS, TerraSAR-X, Sentinel-1 та ін.) охоплюють періоди тривалістю від кількох до десятків років. Це дає змогу реконструювати еволюцію деформаційних процесів задовго до початку наземних спостережень, виявляти початкові стадії осідань, зсувів чи карстових провалів, а також аналізувати реакцію геосистем на зміни гідрогеологічних умов, інтенсивності видобутку чи будівництво нових інфраструктурних об'єктів [33].

Разом з тим PSI має низку обмежень. Найважливішим з них є залежність від наявності постійних розсіювачів. У щільно забудованих міських територіях їх кількість дуже велика, але у природних ландшафтах із значною рослинністю, м'якими ґрунтами, сніговим покривом їх густота різко зменшується. Це ускладнює або й робить неможливим застосування PSI у лісових, сільськогосподарських, високогірних районах, де домінують розподілені розсіювачі та сильна тимчасова декореляція. У таких умовах кращі результати часто дає SBAS-InSAR або методи Distributed Scatterer InSAR (DS-InSAR), які спеціально на це орієнтовані.

До обмежень також належить однокомпонентність спостережень: InSAR чутливий лише до зміщень у напрямку лінії візування. Отже, для повноцінного тривимірного аналізу необхідне використання щонайменше двох напрямків (висхідний і низхідний треки), а в ідеалі – комбінація різних орбітальних конфігурацій і, можливо, різних частотних діапазонів (C-, X-, L-діапазони). У

гірничих районах, де можуть бути суттєві горизонтальні компоненти зсуву схилів або бічне розповзання масиву, цей фактор набуває особливої ваги.

Складність PSI-аналізу, особливо в умовах значних градієнтів деформацій (наприклад, поблизу активних зрушень у підроблюваних товщах), пов'язана з ризиком помилок розгортки фази (phase unwrapping) та втрати когерентності у періоди інтенсивних осідань. Для дуже швидких процесів (десятки сантиметрів на рік і більше) потрібне ретельне проектування інтерферометричних пар і комбінування з іншими методами – SBAS, стекування, наземні вимірювання.

InSAR у контексті моніторингу зони Солотвина

Район Солотвина в Закарпатській області є одним із найбільш показових прикладів комплексного впливу тривалого підземного видобутку солі, гідрогеологічних змін і карстових процесів на геодинамічний стан території. Багатовікова експлуатація соляного родовища, масове затоплення виробок у 1990–2000-х роках, формування провальних воронок і карстових озер, а також значна густота забудови та інженерної інфраструктури зумовили формування складного деформаційного поля, яке потребує постійного моніторингу.

У дослідженнях останнього десятиліття InSAR-технології, включно з багаточасовим аналізом Sentinel-1, застосовувалися для виявлення й кількісної оцінки просторово-часового розвитку осідань у зоні колишніх соляних шахт. Аналіз часових рядів деформацій засвідчив наявність тривалих осідань із характерними швидкостями кілька сантиметрів на рік у межах основних провальних воронок та прилеглих територій, а також виділив локальні ділянки з високими градієнтами деформацій на периферії таких структур. У ряді робіт було продемонстровано, що навіть після припинення активних гірничих робіт деформаційний процес не тільки не зупиняється, а в окремих зонах зберігає або й нарощує інтенсивність, відображаючи продовження переорієнтації навантажень у масиві та вплив гідрогеологічних змін.

Хоча в багатьох роботах для Солотвина використовувалися комбіновані підходи (SBAS, PS/DS-InSAR, інтеграція із GNSS-й нівелювальними спостереженнями), метод постійних розсіювачів відігравав важливу роль у

детальному картуванні деформацій на забудованих ділянках, дорогах, промислових майданчиках та інших техногенно змінених елементах ландшафту. Наявність великої кількості антропогенних об'єктів, які виступають як постійні розсіювачі, дозволяє отримувати високу щільність точок PSI та чітко окреслювати межі зон осідань, у тому числі тих, які ще не проявили себе у вигляді відкритих провалів [33, 5].

Наземні геодезичні вимірювання забезпечують високоточні, але дискретні у просторі та часі дані про вертикальні й горизонтальні зміщення на окремих реперах, GNSS-станціях або контрольних пунктах. Їх основна роль у системі моніторингу – валідація та калібрування супутникових даних, а також забезпечення безперервності спостережень там, де InSAR-методи дають недостатню кількість точок або мають складнощі через декореляцію. Порівняння часових рядів по спільних реперах дозволяє оцінити систематичні зміщення, похибки трендів та інтерпретувати особливості вертикальної й горизонтальної компонент руху.

Для таких об'єктів, як район Солотвина, де поєднуються історично обумовлені гірничі впливи, соляний карст, трансформація гідрогеологічного режиму та сучасне антропогенне навантаження, InSAR дозволяє:

- картувати просторові межі деформаційних зон та їхню внутрішню диференціацію за інтенсивністю деформацій;
- аналізувати часову еволюцію процесів, зокрема встановлювати періоди прискорення або стабілізації осідань;
- виділяти локальні «гарячі точки», де спостерігаються аномально високі швидкості деформацій або значні градієнти;
- інтегрувати результати з іншими видами моніторингових даних для побудови комплексних моделей геодинамічних процесів.

У більш широкому контексті сталого розвитку та просторового планування InSAR/PSI-дані можуть використовуватися для коригування генпланів населених пунктів, зонування територій за ступенем геодинамічної небезпеки, визначення обмежень для нового будівництва або реконструкції існуючих будівель, а також

для планування інженерного захисту та заходів з мінімізації ризиків. Це особливо актуально для прикордонних і транскордонних регіонів, де геодинамічні процеси не обмежуються адміністративними межами, а їхнє вивчення та моніторинг потребують координації між сусідніми державами та регіональними органами управління [15].

3.2. Формування інтерферометричних пар та створення карти LOS-швидкостей

Сервіс ASF Data Search Vertex є веб-орієнтованим інтерфейсом доступу до даних синтезованої апертури (SAR), розробленим Alaska Satellite Facility як частина Distributed Active Archive Center (ASF DAAC) NASA. Vertex створено з метою забезпечення зручного, централізованого пошуку, візуалізації та завантаження супутникових радіолокаційних даних для потреб наук про Землю та прикладних геоінформаційних досліджень. Через єдиний інтерфейс користувач має можливість виконувати пошук сцен за географічним положенням (геометрія полігона, лінії чи точки), часовим інтервалом, типом платформи та сенсора, орбітальною конфігурацією, параметрами зйомки та іншими метаданими, а також переглядати оглядові зображення та ключові характеристики обраних продуктів. Vertex інтегрований з системою NASA Earthdata Login, що забезпечує стандартизований доступ до відкритих архівів SAR-даних місії Sentinel-1, ALOS PALSAR, RADARSAT та низки інших платформ. Крім базових функцій завантаження, сервіс підтримує формування черг запитів, експорт результатів пошуку, а також пряме передавання відібраних сцен до хмарних обчислювальних сервісів, зокрема ASF HyP3, для подальшої інтерферометричної обробки. Таким чином, Vertex виконує роль початкової ланки у ланцюгу InSAR-аналізу, забезпечуючи стандартизовану підготовку вхідних даних, у тому числі для формування інтерферометричних пар у методиці SBAS [30].

Формування набору інтерферометричних пар розпочинається з ретельного відбору знімків Sentinel-1, отриманих з однієї орбітальної траєкторії протягом

дослідженого періоду. Найважливішим критерієм вибору є забезпечення невеликих просторових та часових базисів. Просторовий (перпендикулярний) базис визначається відносною позицією супутника під час двох послідовних проходжень і впливає на якість інтерферограми; критичний базис для Sentinel-1 становить приблизно 5 кілометрів, і якщо перпендикулярний базис перевищує три чверті цієї величини, якість інтерферограми суттєво погіршується через підвищення рівня шумів.

Для початку необхідно обрати потрібний полігон, який буде використано для обробки, що зображено на рисунку 3.2.1.



Рис. 3.2.1. Обраний полігон для обробки

На ресурсі є можливість створення прямокутних та багатокутних полігонів для різних тип задач, було обрано основну частину території с. Солотвино, де розташовуються досліджувані об'єкти.

Наступним кроком є фільтрація, тобто налаштування необхідних фільтрів для пошуку сцен, що продемонстровано на рисунку 3.2.3.

Search Filters

47.9615,23.8524 47.9615,23.8524 47.9376)) Clear

Search for a location

Drag and Drop

Geospatial Files Here
(shp, geotiff, kml, zip)

Import File

Date Filters

Start Date: 3/3/2020 MM/DD/YYYY 📅 End Date: 11/28/2025 MM/DD/YYYY 📅

☐ Seasonal Search

Additional Filters

L1 Single Look Compl... 1/14 file types selected	IW 1/9 beam modes selected	VV+VH 1/8 polarizations selected
Direction 0/2 flight directions selected	Subtype 0/3 subtypes selected	Group ID

Path and Frame Filters

29	29	153	153
----	----	-----	-----

250 of 226 Files Cancel SEARCH

Рис. 3.2.2. Налаштування пошуку сцен

У межах даного дослідження обрано період з 3.02.2024 р. по 28.11.2025 року, це пов'язано насамперед з методом, який буде використано. Адже в роботі задіяно велику кількість сцен і збільшення часового періоду унеможливило їх обробку за відносно короткий термін. Тип продукту – L1 Single Look Complex (SLC), SLC-продукти містять як амплітуду, так і фазу сигналу, що є необхідною умовою для інтерферометричного аналізу й побудови часових рядів деформацій. Продукти рівня GRD, які позбавлені вихідної фазової інформації, для SBAS-методики непридатні, тому вибір SLC є методично обґрунтованим і відповідає стандартним схемам InSAR-обробки Sentinel-1.

Обрано режим IW, оскільки саме він є штатним інтерферометричним режимом місії Sentinel-1 для моніторингу суходолу.

Поляризаційна конфігурація VV+VH є стандартною для IW-режиму над більшістю континентальних територій Copernicus. Для інтерферометрії критичною є стабільна й добре когерентна компонента VV, яка найчастіше застосовується для InSAR-аналізу деформацій. Друга компонента VH, хоч і рідко

використовується безпосередньо в SBAS-інверсії, потенційно корисна для додаткової класифікації типів покриття, аналізу растрового шуму та якісної інтерпретації результатів деформаційного аналізу. Вибір VV+VH забезпечує як мінімально необхідну інтерферометричну інформативність, так і потенціал для подальшого тематичного аналізу.

Для перевірки відповідності покриття досліджуваній території використовували вбудовану в Vertex картографічну візуалізацію: контури доступних сцен накладалися на полігон об'єкта дослідження, що дало змогу переконатися, що вибраний трек/кадр повністю перекриває потрібну площу без значних прогалин по краях. Лише після візуальної перевірки просторової відповідності було остаточно зафіксовано орбітальний трек і кадр, на основі яких сформовано однорідну часово-просторову вибірку сцен Sentinel-1 для подальшого інтерферометричного аналізу, а саме path – 29 та frame – 53.

Після пошуку було отримано більше 1000 продуктів, тому логічним є їх якісний відбір. Для цього переходимо в режим SBAS безпосередньо на самому сайті, що зображено на рисунку 3.2.3.

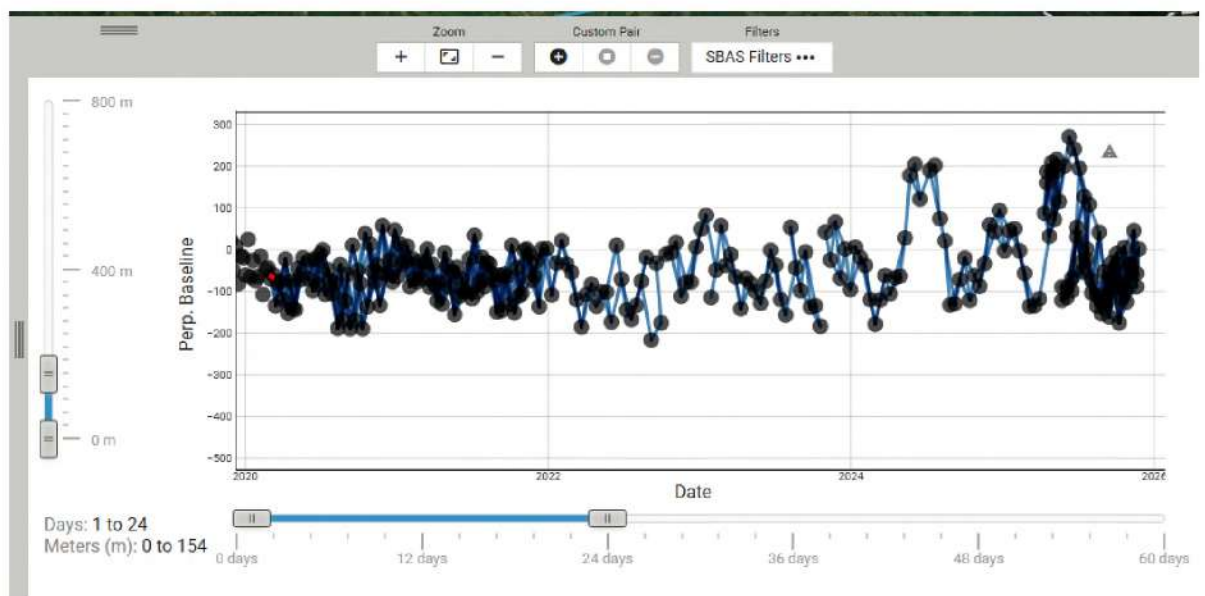


Рис. 3.2.3. Графік інтерферограм

На графічному представленні, що використовується у відповідному модулі, кожна точка відповідає окремій даті супутникової зйомки (сцені Sentinel-1), тоді як відрізки між точками відображають сформовані

інтерферограми, тобто пари сцен, пов'язані певними значеннями часової та перпендикулярної базової лінії. Вісь часу використовується для впорядкування сцен у хронологічній послідовності, а по вертикальній осі відкладаються значення перпендикулярної бази, що характеризують різницю орбітальних траєкторій між двома спостереженнями.

Фільтрація в режимі SBAS полягає у свідомому обмеженні множини можливих інтерферограм лише такими парами, які мають малі часові та перпендикулярні базиси, саме тому було виставлено 24 дні. Бакож необхідно уникати великих часових проміжків, тоді інтерферограми стають вразливими до декореляції, обумовленими змінами поверхні.

Також було зменшено діапазон висот за перпендикулярною віссю. Зменшення базисів знижує вплив похибок орбітальних даних та цифрової моделі рельєфу на диференціальну фазу, підвищує стабільність розмотування фази й покращує точність оцінки деформацій, особливо для вертикальної компоненти. Водночас достатня кількість залишених інтерферограм забезпечує необхідну надлишковість інформації для стійкої розв'язності SBAS-інверсії і дає змогу ефективно пригнічувати шум та атмосферні складові.

Після відбору залишилось дочекатись обробки інтерферограм, в залежності від кількості пар, це може займати від години до кількох днів. В даному випадку обробка була виконана приблизно за 3 години, в результаті було отримано 600 продуктів, з яких відібрано 125 (див. рис. 3.2.4).

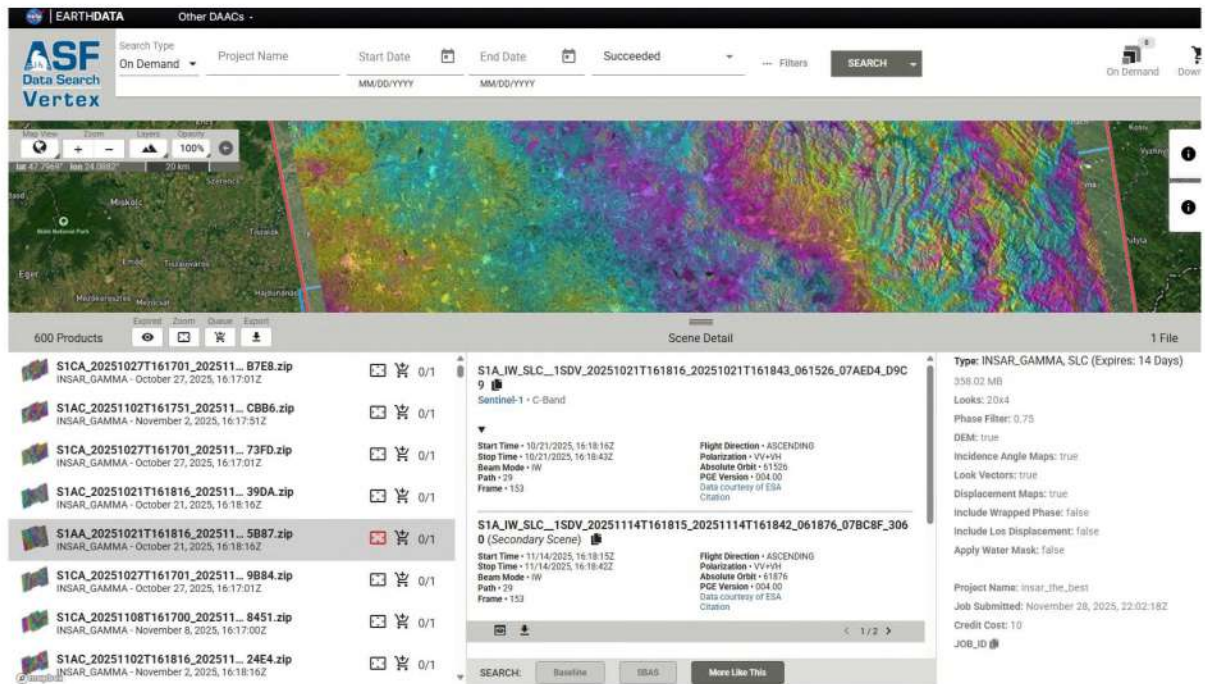


Рис. 3.2.4. Результат обробки продуктів

Ця інтерферограма є готовим результатом хмарної обробки пари SLC-зображень Sentinel-1 у сервісі ASF HyP3, сформованої відповідно до заданих SBAS-критеріїв (малі часові та перпендикулярні базиси). Вона вже містить:

- орторектифіковану фазу (з віднятою топографічною складовою);
- супутню карту когерентності;
- узгоджену геометрію для подальшого включення до багаточасового стеку.

Ліва частина містить опис обох сцен пари: основної (Primary Scene) та вторинної (Secondary Scene) з однаковим режимом зйомки IW, орбітою (Ascending), треком і кадром, а також точними датами та часом спостережень. Це гарантує стабільну геометрію зйомки, потрібну для інтерферометрії. Права частина вікна характеризує вже оброблений інтерферометричний продукт: статус «Job Completed» означає, що хмарна обробка завершена, створено диференціальну інтерферограму з набором вихідних файлів (амплітуда, фаза, когерентність) у єдиній проекції, придатних для подальшої SBAS-інверсії та розрахунку вертикальних швидкостей.

Приклад інтерферограми показано на рисунку 3.2.5.

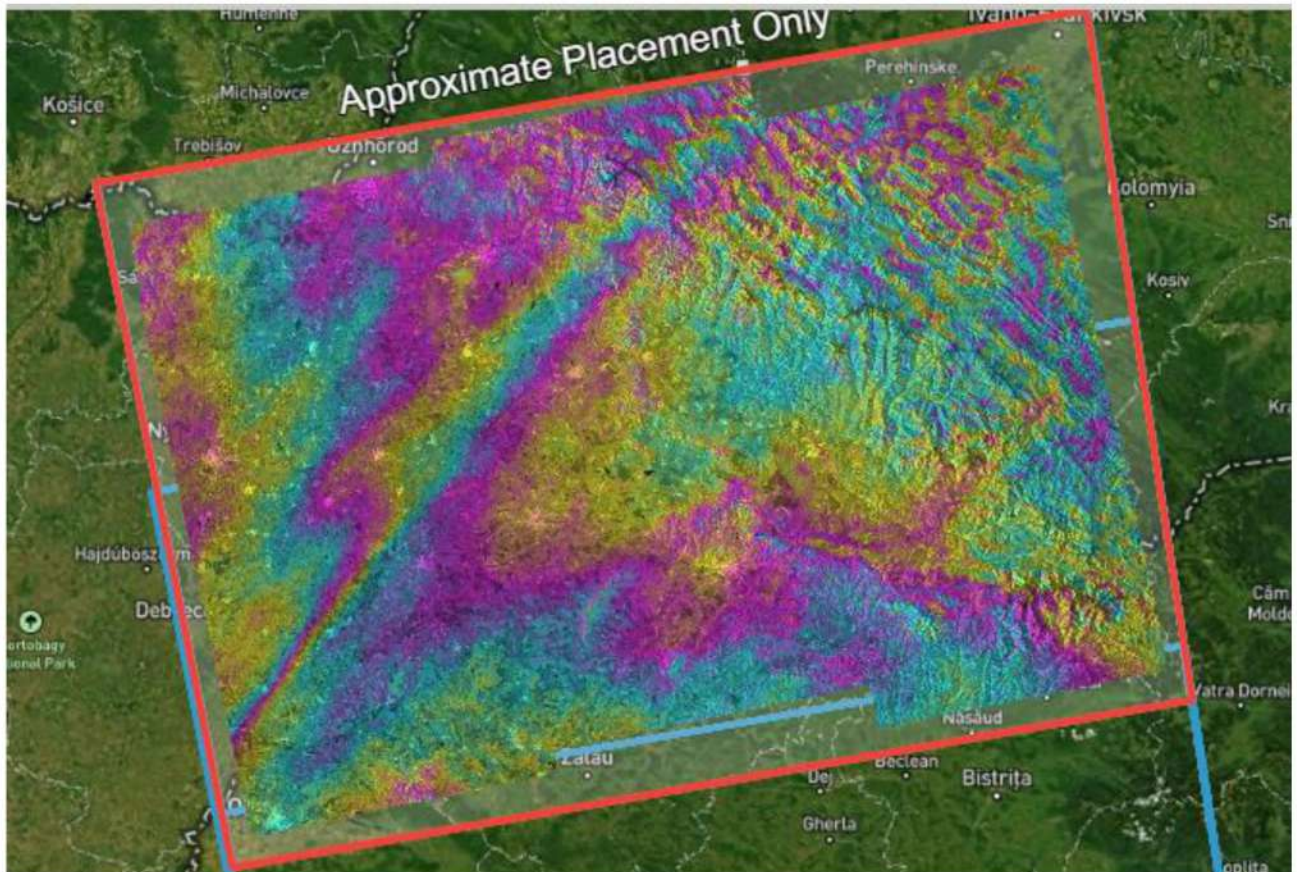


Рис. 3.2.5. Приклад готової інтерферограми

Автоматизоване створення 114 інтерферограм із попередньо відібраних SLC-сцен дозволило отримати однорідний набір високоякісних InSAR-продуктів, без необхідності локального розгортання спеціалізованого ПЗ та виділення значних обчислювальних ресурсів. Зручність такого підходу полягає в тому, що всі критичні етапи – від вибору сцен у Vertex, перевірки базисів і SBAS-фільтрації до формування готових інтерферограм – виконуються в єдиному середовищі з чітко задокументованим робочим процесом і фіксованими параметрами обробки, що мінімізує суб'єктивний фактор, зменшує ризик технічних помилок та суттєво скорочує час переходу від вихідних SAR-даних до стеку інтерферограм, придатного для побудови карти вертикальних швидкостей деформацій.

Після завершення формування 114 інтерферограм на основі даних Sentinel-1 наступним етапом дослідження стало їх перенесення в інтерактивне середовище програмування Jupyter Notebook для подальшої обробки часових рядів деформацій.

Jupyter Notebook (проект Jupyter) являє собою відкриту інтерактивну платформу для наукових обчислень, яка поєднує виконуваний код, текстові пояснення, математичні формули та графічні результати в межах єдиного документа (див. рис. 3.2.6.).

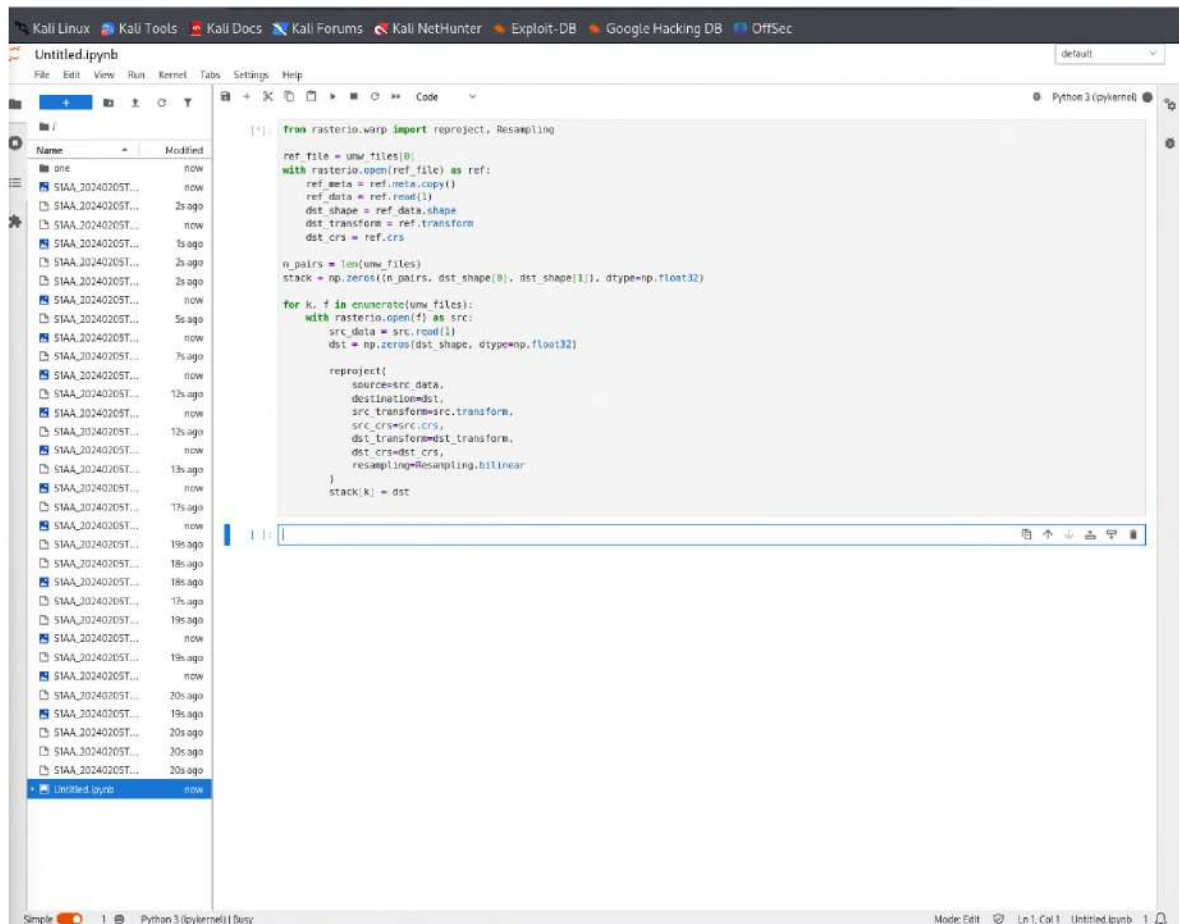


Рис. 3.2.6. Середовище Jupyter

Середовище Jupyter підтримує багато мов програмування, однак у задачах InSAR аналізу найчастіше застосовується Python завдяки широкому спектру спеціалізованих бібліотек для роботи з геопросторовими даними, матрицями великих розмірів та науковою візуалізацією. Використання блокової структури Notebook дає змогу поетапно документувати весь процес обробки інтерферограм – від імпорту даних, фільтрації за когерентністю та побудови SBAS-мережі до розрахунку середніх швидкостей деформацій та експорту карт у геоінформаційні системи.

На рисунку 3.2.7. показано інтеграцію інтерферограм до середовища, було здійснено імпорт даних, для програми важливо вказати шлях до папки

```
import glob
import os

import numpy as np
import rasterio
from rasterio.warp import calculate_default_transform, reproject, Resampling
from rasterio.mask import mask
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import mapping
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Шляхи
base_dir = r"/home/kali/InSAR/" # тут папки з *_unw_phase.tif для кожної пари
aoi_path = r"/home/kali/InSAR/solotvyno.py.geojson"
out_dir = r"/home/kali/InSAR/ts_solotvyno"
os.makedirs(out_dir, exist_ok=True)

# 2. Список інтерферограм (розгортка фази)
ifg_paths = sorted(glob.glob(os.path.join(base_dir, "*", "*_unw_phase.tif")))
print("Знайшов інтерферограм:", len(ifg_paths))
```

Рис. 3.2.7. Частина коду, в якій завантажуються інтерферограми в середовище

Насамперед для кожної інтерферограми залишалися вихідні каталоги НуРЗ з повною службовою інформацією, однак з них вибиралися лише ті растрові шари, що безпосередньо використовуються в часових рядах: розмотана фаза, когерентність, цифрова модель рельєфу та, за потреби, карти кута падіння та амплітуди відбитого сигналу. Для забезпечення можливості автоматизованої обробки назви каталогів не змінювалися, але були проаналізовані на предмет уніфікованого кодування дат зйомки, що дозволяє програмно зчитувати першу та другу дату інтерферометричної пари без додаткового редагування структури папок.

Подальший етап полягав у забезпеченні геометричної та розмірної однорідності всього стеку інтерферограм. Незважаючи на те, що НуРЗ здійснює орторектифікацію інтерферограм в єдиній проєкції з використанням DEM, для коректної реалізації SBAS-інверсії необхідно, щоб усі растрові шари мали

тотожне просторове охоплення, розмір решітки та піксельну роздільну здатність. Уже на цьому етапі було прийнято рішення обрізати інтерферограми по формі с. Солотвино, для цього було використано OpenStreetMap. Там було знайдено полігон офіційних меж с. Солотвино та завантажено їх у форматі JSON для подальшої інтеграції в Jupyter.

Приклад коду показано на рисунку 3.2.7.

```
# завантажуюємо полігон Солотвина
aoi = gpd.read_file(aoi_path)

# читаємо CRS з першої інтерферограми
with rasterio.open(ifg_paths[0]) as src0:
    rast_crs = src0.crs

# приводимо AOI до того ж CRS
aoi_local = aoi.to_crs(rast_crs)
geoms = [mapping(geom) for geom in aoi_local.geometry]
```

```
# читаємо параметри референсного растру
with rasterio.open(ifg_paths[0]) as ref:
    ref_profile = ref.profile
    ref_transform = ref.transform
    ref_width = ref.width
    ref_height = ref.height
    ref_crs = ref.crs

print("Референсний розмір:", ref_width, ref_height)
```

Рис. 3.2.8. Завантаження полігону Солотвино

Це перевірялося шляхом аналізу геопросторових метаданих кожного TIFF-файлу; у разі виявлення незначних розбіжностей меж сцени проводилося обрізання (clipping) до спільного перетину, що гарантує накладання значень фази та когерентності в однакових пікселях для всіх 114 інтерферограм. Таким чином формувався узгоджений за розміром та проєкцією тривимірний масив даних, який надалі завантажувався до Jupyter Notebook як єдиний стек.

Заключним елементом підготовчого блоку було автоматизоване формування текстових службових файлів, які описують структуру стеку та використовуються у скриптах часових рядів. На підставі назв каталогів НуРЗ для

кожної інтерферограми програмно виділялися дати master та slave-зйомок (у форматі YYYYMMDD), на основі чого створювався список пар ifgList, що містить ідентифікатор пари та шлях до відповідного файлу розмотаної фази. Це візуалізовано на рисунку 3.2.9.

```
from datetime import datetime

def parse_pair_dates_from_name(path):
    name = os.path.basename(path)
    # приклад: S1AA_20220420T235621_20220514T235622_...
    parts = name.split("_")
    # шукаємо два елементи, що починаються з "20" і мають формат YYYYMMDDT...
    dates = []
    for part in parts:
        if part.startswith("20") and "T" in part:
            dstr = part.split("T")[0]
            try:
                d = datetime.strptime(dstr, "%Y%m%d")
                dates.append(d)
            except ValueError:
                pass
    if len(dates) < 2:
        raise ValueError(f"Не знайшов дві дати в імені: {name}")
    # перші дві дати – master/slave
    return dates[0], dates[1]

pair_dates = []
for p in ifg_paths:
    d1, d2 = parse_pair_dates_from_name(p)
    pair_dates.append((d1, d2))

# унікальні дати
all_dates_sorted = sorted({d for pair in pair_dates for d in pair})
print("Кількість дат:", len(all_dates_sorted))
```

Кількість дат: 57

Рис. 3.2.9. Формування унікальних дат

Окремо формувався впорядкований список усіх унікальних дат зйомки dateList, який задає часову вісь SBAS-аналізу, а також таблиця базисів baselineList із часовими інтервалами та перпендикулярними базисами для кожної інтерферограми, отриманими з метаданих НуРЗ. У сукупності ці підготовчі процедури забезпечують стандартизований вхідний набір для подальшої обробки в Jupyter Notebook, де реалізуються алгоритми побудови часових рядів деформацій та обчислення вертикальних швидкостей.

```

def dereference(data_stack, ref_center=None, ref_size=10):
    """
    data_stack: (N_ifg, H, W)
    ref_center: [row, col] у координатах масиву; якщо None – центр.
    """
    data = data_stack.copy()
    n_ifg, H, W = data.shape

    if ref_center is None:
        r0 = H // 2
        c0 = W // 2
    else:
        r0, c0 = ref_center

    half = ref_size // 2
    r1, r2 = max(r0 - half, 0), min(r0 + half, H)
    c1, c2 = max(c0 - half, 0), min(c0 + half, W)

    ref_win = data[:, r1:r2, c1:c2] # (N_ifg, h, w)
    ref_mean = np.nanmean(ref_win.reshape(n_ifg, -1), axis=1) # (N_ifg,)

    for k in range(n_ifg):
        data[k] = data[k] - ref_mean[k]

    return data

stack_ref = dereference(stack, ref_center=None, ref_size=10)
print("Dereferenced stack shape:", stack_ref.shape)

```

Рис. 3.2.10. Виведення до спільної опорної системи відліку

Перший фрагмент коду реалізує процедуру приведення стеку інтерферограм до спільної опорної системи відліку. Вхідний масив **data_stack** має розмірність (N_{ifg}, H, W) , де перший індекс відповідає номеру інтерферограми, а два наступні – просторовим координатам пікселя в межах сцени. Усередині функції **dereference** автоматично або за заданими координатами обирається опорна точка (або невелике вікно навколо неї) і для кожної інтерферограми обчислюється середнє значення фази в межах цього вікна. Після цього з кожної інтерферограми вичитується її власне середнє значення фази у опорному вікні, внаслідок чого формується стек **stack_ref**, у якому всі зображення приведені до єдиної відносної шкали зміщень з нульовим середнім у референтній області. Такий підхід усуває невизначеність довільної додаткової фази, пов'язаної з вибором опорної точки, і забезпечує коректне порівняння між собою інтерферограм різних дат у рамках подальшої часово-рядової інверсії SBAS.

```

GTG = G.T @ G
GTG_pinv = np.linalg.pinv(GTG)      # замість inv(...)
G_pinv = GTG_pinv @ G.T             # (n_dates, n_ifg)

n_ifg, H, W = stack_ref.shape
data_2d = stack_ref.reshape(n_ifg, -1) # (n_ifg, Npix)
ts_2d = G_pinv @ data_2d              # (n_dates, Npix)
tsArray = ts_2d.reshape(len(all_dates_sorted), H, W)

```

```

lam = 0.056 # Sentinel-1, м
tsArray_m = tsArray * (lam / (4.0 * np.pi)) # date_2 - date_1

# оцінка середньої швидкості (лінійна регресія d(t))
t = frac_dates # (T,)
t_mean = np.mean(t)
dt = t - t_mean
den = np.sum(dt**2)

# tsArray_m: (T, H, W) -> (T, Npix)
T, H, W = tsArray_m.shape
data_ts_2d = tsArray_m.reshape(T, -1)

# ковзна формула для нахилу: slope = sum(dt * y) / sum(dt^2)
num = dt[:, None] * data_ts_2d # (T, Npix)
num = np.sum(num, axis=0)      # (Npix,)
vel_2d = num / den             # м/рік
vel = vel_2d.reshape(H, W)    # (H, W)
print("vel shape:", vel.shape)

```

Рис. 3.2.11. Оцінка середньої швидкості деформацій

Другий фрагмент коду описує основні кроки часово-рядової інверсії та оцінки середньої швидкості деформацій за стеком відреферованих інтерферограм. Спочатку використовується матриця дизайну G , яка відображає зв'язок між інтерферограмами та окремими датами спостереження: кожен рядок цієї матриці відповідає інтерферограмі, а кожен стовпець – одній із дат у часовому ряді; елементи матриці мають значення -1 , $+1$ або 0 залежно від того, чи входить відповідна дата до інтерферометричної пари як перша, як друга, чи не входить взагалі. Для зменшення впливу шуму та вирішення надлишково визначеної системи рівнянь формується матриця нормальних рівнянь $G^T G$, до якої застосовується псевдообернення через метод лінійної алгебри **np.linalg.pinv**. Отримана матриця $G^+ = (G^T G) + G^T$ є узагальненим оберненим оператором, що

дозволяє відновити вектор деформацій у вузлах часової сітки з вектора спостережуваних різниць фаз між датами.

Паралельно стек відреферованих інтерферограм **stack_ref** розмірності (N_{ifg}, H, W) перетворюється у двовимірний масив **data_2d** розмірності $(N_{\text{ifg}}, N_{\text{pix}})$, де $N_{\text{pix}} = H \cdot W$; у такому представленні кожен стовпець відповідає часовому вектору фазових різниць в одному пікселі, а кожен рядок – окремій інтерферограмі. Множенням G^+ на **data_2d** обчислюється двовимірний масив **ts_2d** розмірності $(N_{\text{dates}}, N_{\text{pix}})$, який містить оцінені відносні деформації для кожної дати в усіх пікселях сцени. Цей масив потім переформовується назад у тривимірний вигляд **tsArray** розмірності (N_{dates}, H, W) , що зручно для візуалізації та подальшого просторового аналізу. Таким чином, наведений код реалізує повну процедуру SBAS-інверсії: від переходу від простору інтерферограм до простору дат до отримання повноцінних часових рядів фазових зміщень у кожній точці досліджуваної території.

Заклучна частина другого фрагмента перетворює фазові часоряди на фізичні зміщення та оцінює середню швидкість деформацій методом лінійної регресії. Спочатку масив **tsArray** множиться на коефіцієнт $\lambda/(4\pi)$, де $\lambda = 0,056$ м відповідає довжині хвилі X-діапазону радіолокаційного сигналу Sentinel-1; таким чином фаза перераховується у зміщення вздовж лінії видіння в метрах. Далі формується вектор часу **t** на основі фракційних дат спостережень **frac_dates**, обчислюється його середнє значення **t_mean**, і визначаються відхилення **dt** = **t** – **t_mean**. Тривимірний масив зміщень **tsArray_m** розмірності (T, H, W) перетворюється у двовимірний масив **data_ts_2d** розмірності (T, N_{pix}) . Для кожного пікселя реалізується замкнена форма формули найменших квадратів: чисельник **num** обчислюється як сума добутків часових відхилень **dt** на значення зміщення, а знаменник **den** – як сума квадратів відхилень dt^2 . Відношення цих величин дає оцінку нахилу прямої регресії, тобто середньої швидкості деформацій у метрах на рік для кожного пікселя.

Нижче наведений фрагмент коду формує поле сумарних LOS-зміщень між початковою та фінальною датами, використовуючи раніше отриманий

тривимірний масив часових рядів `tsArray_m`. Різниця між останнім і першим часовим зрізами `cum_disp=tsArray_m[-1]-tsArray_m[0]` відповідає інтегрованому зміщенню кожного пікселя за весь період спостережень, вираженому в метрах уздовж лінії видіння. Подальший запис цього масиву у формат GeoTIFF за допомогою бібліотеки Rasterio забезпечує сумісність результатів із ГІС-середовищами та дає можливість виконувати детальний просторовий аналіз і накладання на інші тематичні шари.

3.3. Просторова динаміка просідань над шахтами в с. Солотвино

У результаті виконання повного циклу обробки 114 інтерферограм методом SBAS було отримано узгоджені карти середньої швидкості зміщення в напрямку лінії зору (LOS) для території Солотвина за весь досліджуваний період з 02.02.2024 по 28.11.2025 р. На основі сформованих у Jupyter часових рядів та лінійної регресії по часу були побудовані як загальна картосхема середньої LOS-швидкості для всього полігону, так і її крупномасштабний фрагмент для зони максимальних деформацій.

Отже, результати часово-рядового аналізу безпосередньо трансформуються у наочні растрові моделі, що кількісно характеризують просторовий розподіл повільних деформацій земної поверхні й є вихідною основою для оцінки вертикальних зміщень та геодинамічної небезпеки.

З отриманими результатами можна ознайомитись із рисунків 3.3.1 та 3.3.2.

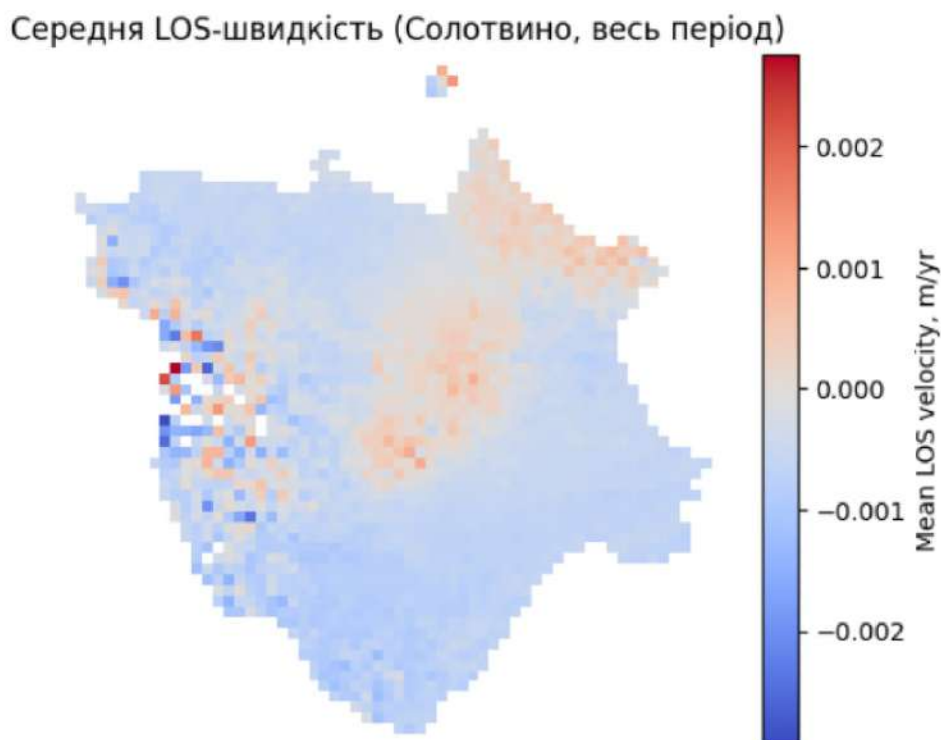


Рис. 3.3.1. Карта середньої LOS-швидкості зміщень

Перший результат представлено у вигляді оглядової карти середньої швидкості зміщення у напрямку лінії видіння (LOS) для всього полігону досліджень за весь часовий інтервал. Значення швидкостей подано в метрах за рік, що забезпечує можливість прямої кількісної інтерпретації величини деформацій та їх порівняння з даними наземних спостережень. Загальний фон карти характеризується наближеними до нуля значеннями, що свідчить про відсутність інтенсивних довготривалих рухів на більшій частині території, тоді як локальні аномалії, виділені контрастними відтінками синього та червоного, фіксують зони прискореного осідання та підняття.

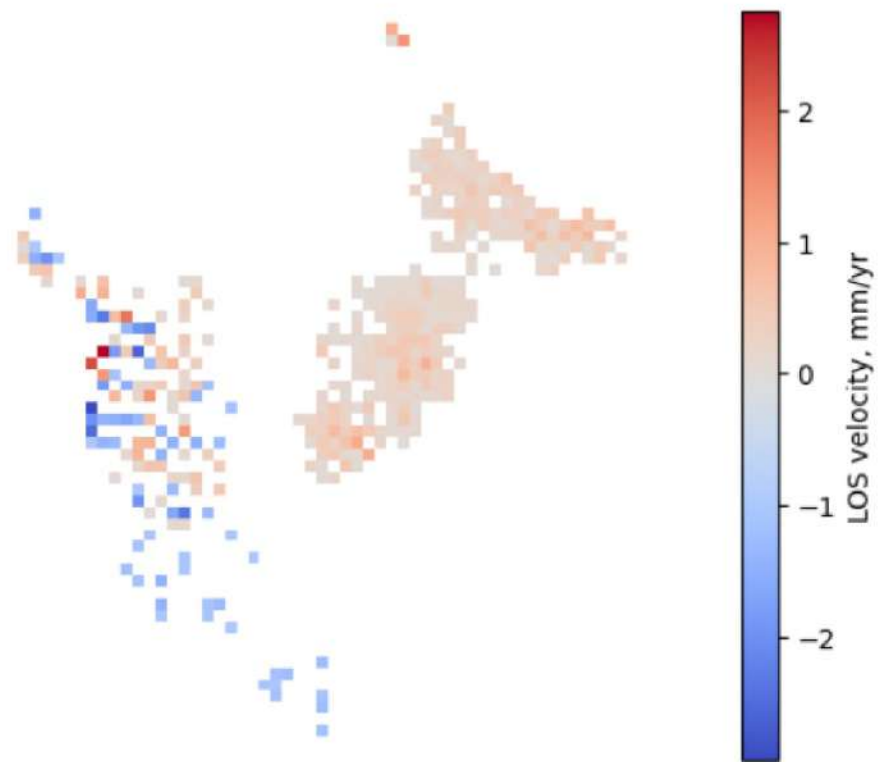


Рис. 3.3.2. Найбільш деформовані активні ділянки

Детальніший аналіз просторової структури поля LOS-швидкостей здійснюється на основі другої карти, на якій виділено найбільш деформаційно активні ділянки й змінено одиниці вимірювання на міліметри за рік. Така побудова підвищує чутливість до відносно малих, але геологічно значущих деформацій, дозволяючи чітко розрізнити ділянки зі швидкостями осідання порядку $-1 \dots -2$ мм/рік і локальні мінімуми, що перевищують за модулем -2 мм/рік. Просторове згущення пікселів із негативними значеннями швидкостей у західній частині полігону корелює з розташуванням підземних виробок і карстово-суфозійних форм рельєфу, описаних у попередніх геолого-геоморфологічних дослідженнях Солотвинської солянокупольної структури. Наявність поруч із зонами інтенсивного осідання невеликих кластерів із позитивними значеннями швидкостей до $+2$ мм/рік може інтерпретуватися як прояви компенсаторного підняття окремих блоків, а також як наслідок геометрії лінії видіння та топографічних ефектів, що впливають на проєкцію реального тривимірного вектора зміщення.

Отримані карти середньої LOS-швидкості та їх міліметрова деталізація формують кількісну основу для подальшого переходу від лінії видіння до

вертикальних компонент зміщень і інтеграції результатів InSAR-аналізу з класичними геодезичними та геологічними даними. Виявлені зони підвищених негативних швидкостей збігаються з раніше встановленими районами деградації рельєфу та активного розвитку соляного карсту, де за наземними спостереженнями фіксувалися значні величини просідань і деформацій земної поверхні. Таким чином, результати часово-рядового супутникового моніторингу підтверджують просторову локалізацію небезпечних деформацій у межах промайданчиків та прилеглих територій, демонструють високий потенціал технології InSAR для виявлення повільних, проте кумулятивно небезпечних просідань і створюють підґрунтя для обґрунтування заходів геоекологічної безпеки та подальшого інженерно-геологічного зонування Солотвинського родовища.

Для подальшого картографічного аналізу деформацій земної поверхні було використано програмне середовище QGIS. На першому етапі до проєкту був імпортований растровий файл середніх швидкостей деформацій у напрямку лінії огляду (LOS), отриманий за результатами інтерферометричної обробки Sentinel-1. Растровий шар було коректно прив'язано у системі координат EPSG:32634 (UTM, зона 34N), що забезпечило його сумісність з іншими просторовими даними.

Оскільки растрова модель складається з дискретних пікселів, для подальшої інтеграції з іншими геопросторовими шарами і створення KML-файлу для Google Earth було виконано конвертацію растру у векторні точки. Для цього застосовано інструмент Raster pixels to points, який створює векторний шар, де кожен піксель растру представлений точковим об'єктом із збереженням відповідного значення деформації у полі атрибутів.

Для картографічного супроводу та прив'язки до реальної місцевості до проєкту було додано базові картографічні підкладки. За допомогою плагіна QuickMapServices підключено доступ до високоякісних супутникових знімків (Google Satellite, ESRI World Imagery), що дозволило накласти отримані деформаційні дані на сучасну ортофотопідкладку та візуально співставити

активні зони зміщень з елементами рельєфу та антропогенними об'єктами на території смт Солотвино.

З результатом роботи можна ознайомитись із рисунка 3.3.3.

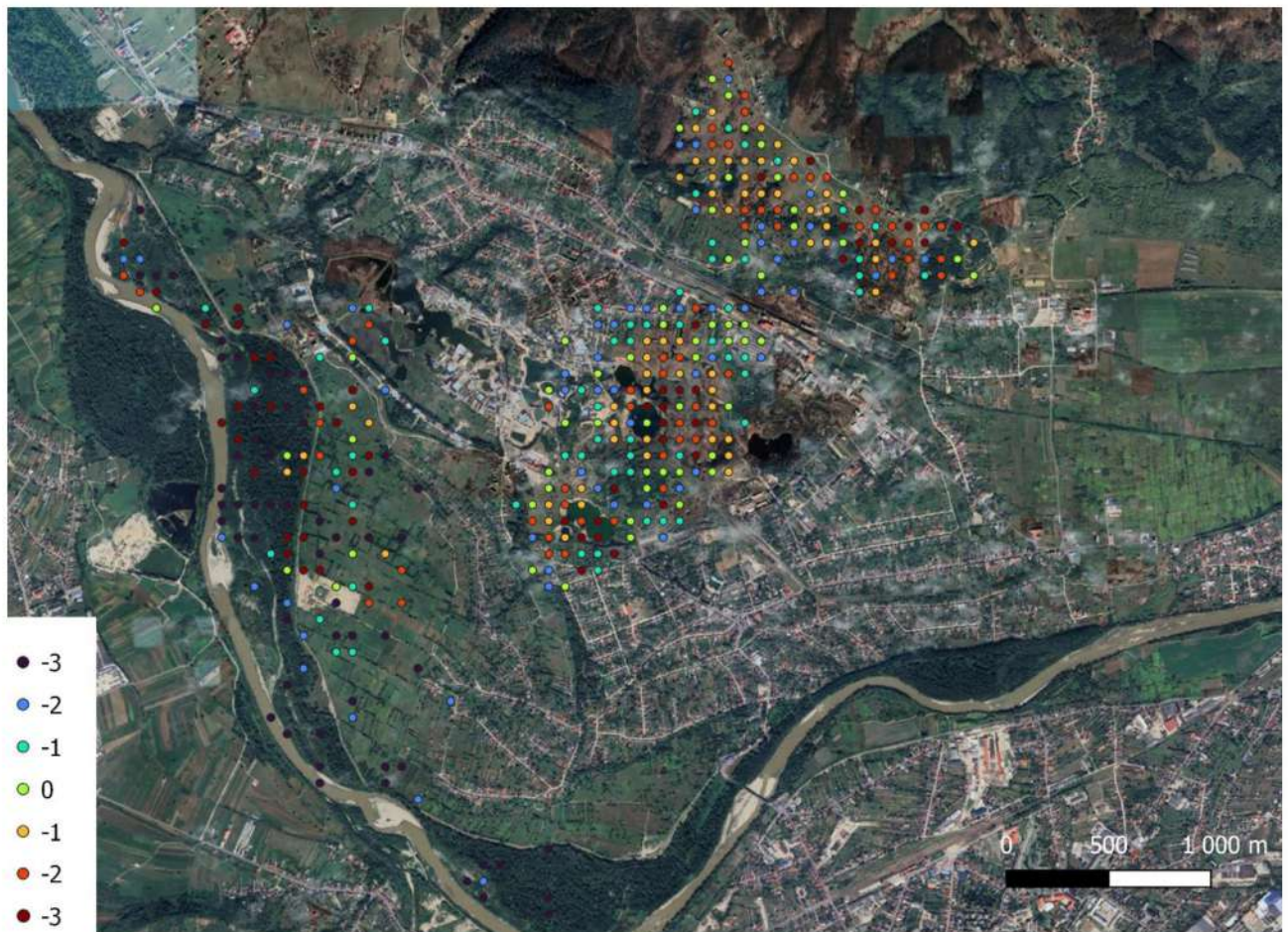


Рис. 3.3.3. Візуалізація найбільш деформованих ділянок

Перехід від LOS-швидкостей до вертикальних для цього поля даних доцільно оцінювати з урахуванням геометрії зйомки Sentinel-1 та характеру деформацій у Солотвині. Для одинарної орбіти (лише висхідні або лише низхідні треки) стандартна методика ґрунтується на припущенні квазі-чисто вертикальних зміщень; у цьому разі вертикальна складова оцінюється як $v = v_{LOS} / \cos\theta$, де θ – кут падіння радара. Такий підхід є математично коректним лише за умови, що горизонтальні компоненти руху (особливо схилі зсуви та латеральні зсуви блоків) є порівняно малими, а рельєф не має різко вираженого ухилу у напрямках, чутливих до LOS.

Оскільки, для досліджуваної території доступні як висхідні, так і низхідні треки Sentinel-1, більш коректною є векторна методика, коли вертикальна та, за

потреби, схід-західна компоненти деформацій визначаються з розв'язання системи рівнянь для двох незалежних LOS-проекцій. У такому разі кожен спостережуваний v_{LOS} розкладається на суму вертикальної та горизонтальної складових, зважених на косинус та синус відповідних кутів падіння й азимуту орбіти, що дозволяє зменшити систематичні похибки, пов'язані з нехтуванням горизонтальними рухами.

З урахуванням наведеного методу прямого ділення LOS-швидкостей на косинус кута падіння для переходу до вертикальних можна вважати прийнятною як перше наближення для оцінки середніх вертикальних швидкостей просідання в центральних частинах Солотвинського родовища, де очікується домінування осьових осідань. Однак така схема потенційно занижує або спотворює вертикальну складову в районах із значною горизонтальною складовою деформацій, на схилах та у прикрайових частинах осередків просідання, а також є чутливою до похибок у визначенні кута падіння та можливих систематичних помилок орбітальної моделі. Тому отримані карти вертикальних швидкостей доцільно інтерпретувати разом із полем вихідних LOS-швидкостей, моделлю рельєфу, геологічними даними та, за можливості, результатами наземних геодезичних спостережень, що дозволить верифікувати припущення щодо переважно вертикального характеру деформацій і кількісно оцінити межі застосовності обраної методики для даного масиву InSAR-даних [30, 20].

```

import numpy as np
import rasterio

# --- Вхідні дані ---
los_vel_path = "/home/kali/InSAR/ts_soltovyno/bez_mm_mean_velocity_los_soltovyno_mm_per_yr_filtered.tif"
# карта середніх LOS-швидкостей, м/рік
vert_vel_path = "mean_velocity_vertical_soltovyno.tif" # вихідний GeoTIFF
theta_deg = 39.0 # кут падіння Sentinel-1 для твоєї сцени (приблизно 35-43°, уточни з метаданих)

# --- Зчитування LOS-швидкостей ---
with rasterio.open(los_vel_path) as src:
    los_vel = src.read(1).astype("float32") # (H, W)
    profile = src.profile

# --- Перехід від LOS до вертикальної компоненти ---
theta_rad = np.deg2rad(theta_deg)
cos_theta = np.cos(theta_rad)

# маска NoData, щоб не ділити на нуль
nodata = profile.get("nodata", None)
if nodata is not None:
    mask = (los_vel == nodata) | np.isnan(los_vel)
else:
    mask = np.isnan(los_vel)

vert_vel = np.full_like(los_vel, np.nan, dtype="float32")
vert_vel[~mask] = los_vel[~mask] / cos_theta # v_vert = v_LOS / cos(theta)

# --- Оновлюємо профіль та зберігаємо GeoTIFF ---
profile.update(
    dtype="float32",
    count=1,
    nodata=np.nan
)

with rasterio.open(vert_vel_path, "w", **profile) as dst:

```

Рис. 3.3.4. Створення карти вертикальних деформацій

Цей фрагмент коду виконує прямий перехід від карти середніх LOS-швидкостей до карти середніх вертикальних швидкостей у тій самій системі координат. Спочатку задається шлях до вхідного GeoTIFF з LOS-швидкістю, ім'я вихідного файлу з вертикальною швидкістю та значення кута падіння радара в градусах; далі файл зчитується бібліотекою **rasterio**, формується масив значень швидкості й зберігається його просторовий профіль (проекція, розмір пікселя, розмір растра).

Після цього кут падіння переводиться в радіани, обчислюється його косинус і для всіх пікселів, де значення не дорівнюють **NoData**, застосовується формула $v_{vert} = v_{LOS} / \cos\theta$, що дає середню вертикальну швидкість деформацій у фізичних одиницях (м/рік) при припущенні переважно вертикального характеру зміщень. У фінальній частині код оновлює службовий профіль (тип даних **float32**, одноканальний растр, значення NoData) та записує обчислений масив вертикальних швидкостей у новий GeoTIFF, який повністю успадковує

геоприв'язку та розміри вихідної LOS-карти і може безпосередньо використовуватися в ГІС-аналізі та для побудови карт вертикальних деформацій.

В результаті чого отримуємо наступний продукт в середовищі Jupyter Notebook (див. рис. 3.3.5).

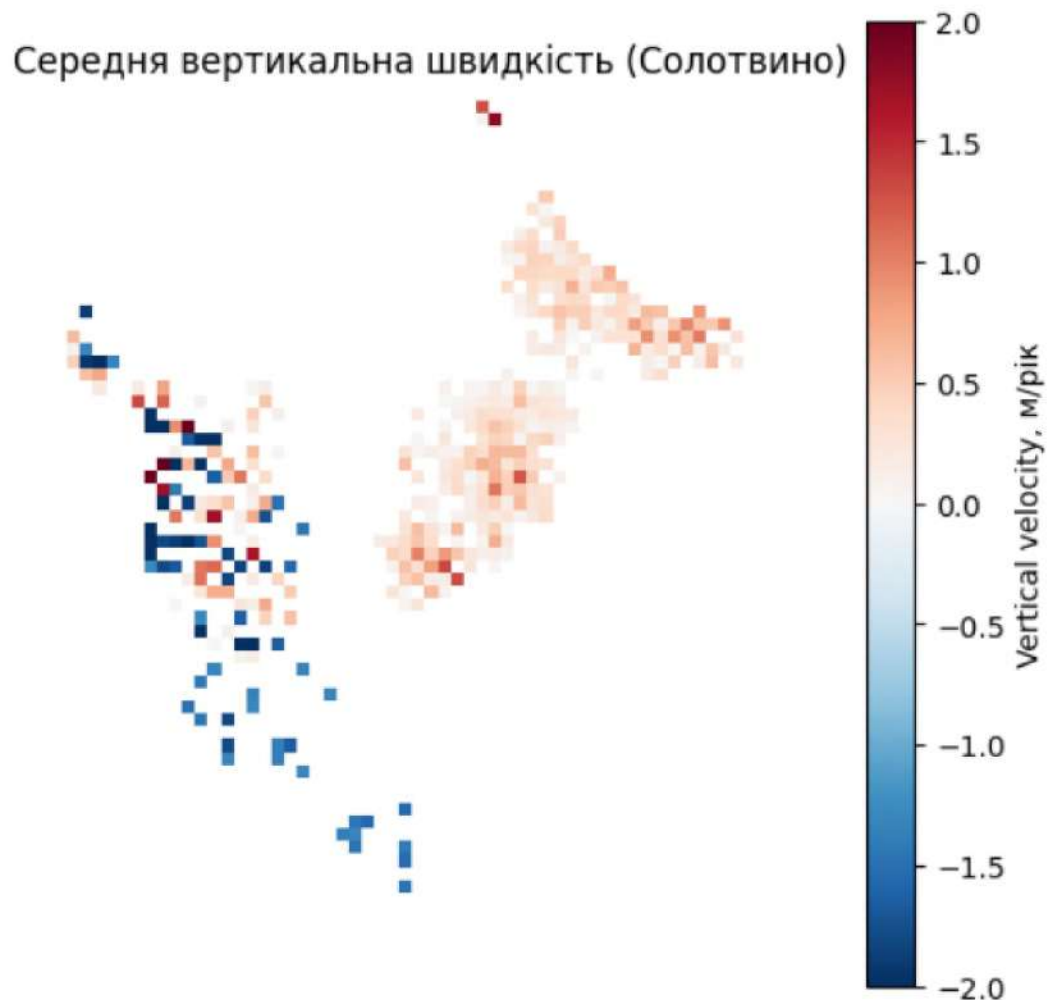


Рис. 3.3.5. Карта вертикальної швидкості деформацій

Отримана карта середніх вертикальних швидкостей відображає просторовий розподіл деформацій земної поверхні Солотвина за весь період спостережень у припущенні домінування вертикальної складової.

Просторовий розподіл аномалій свідчить, що найбільші негативні вертикальні швидкості локалізуються у південно-західній частині карти, де зосереджені відомі карстово-суфозійні структури та зони активної деградації гірничого масиву; тут спостерігаються компактні кластери пікселів із швидкостями осідання, що наближаються до -2 мм/рік, що підтверджує тривале

повільне просідання поверхні. У центральній-східній частині переважають слабко позитивні вертикальні швидкості (до $+1...+1,5$ мм/рік), які можуть відображати компенсаторне підняття окремих блоків або особливості перерозподілу напружень у покриваючих відкладах; ці значення потребують подальшого співставлення з геологічною моделлю родовища та даними наземних вимірювань для відокремлення реальних піднять від можливих артефактів проєкції. Таким чином, карта вертикальних швидкостей не лише підтверджує наявність локалізованих зон небезпечних деформацій, але й надає кількісну оцінку темпів просідання й підняття, яка може бути використана для інженерно-геологічного районування, оцінки ризиків для інфраструктури та планування подальшого моніторингу території.

Після виконання аналогічних дій в QGIS, було отримано наступний результат, а саме карту вертикальних деформацій накладену на шар Google Earth, що показано на рисунку 3.3.6.

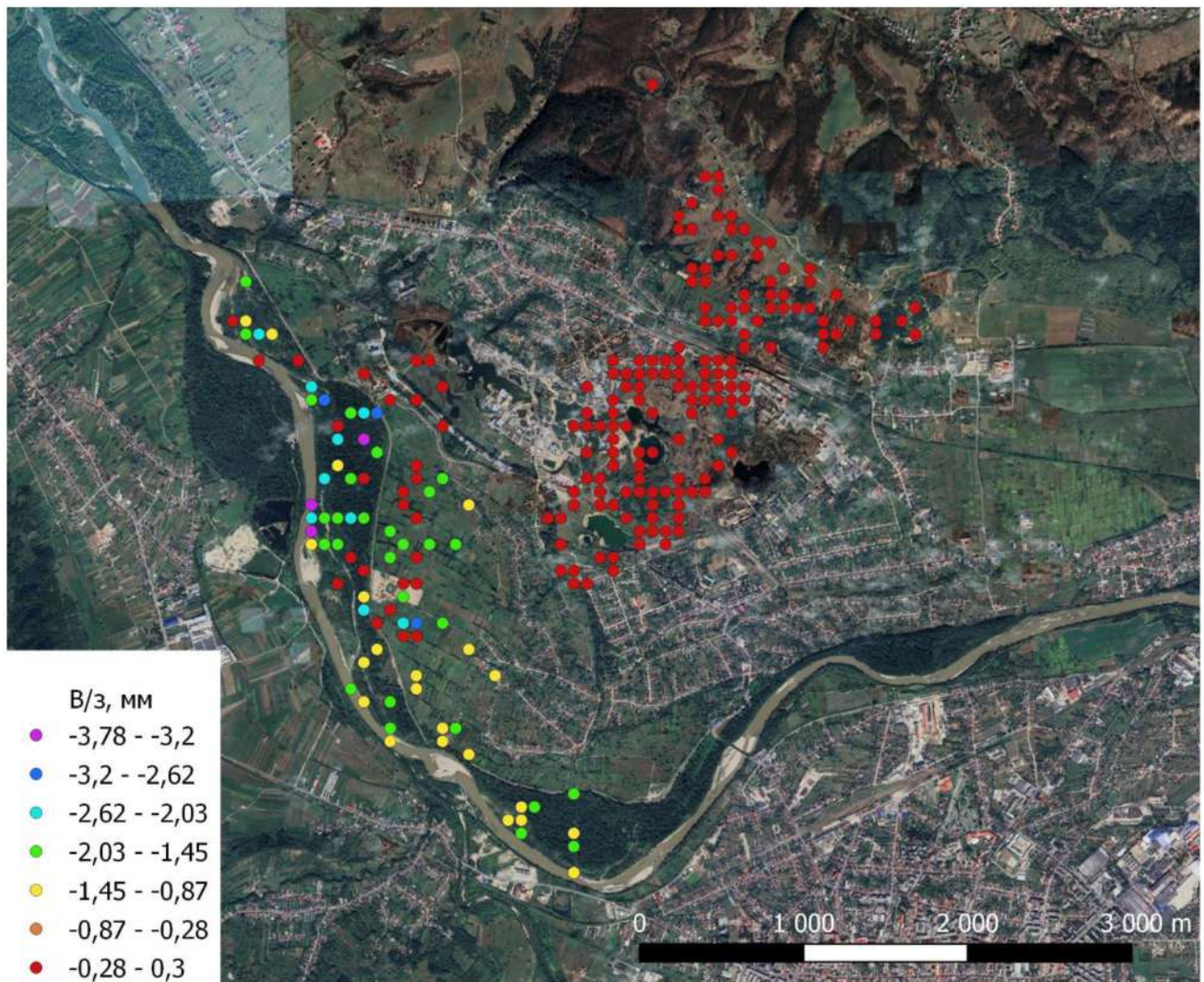


Рис. 3.3.6. Карта вертикальних деформацій

Отримані результати вертикальних зміщень були візуалізовані у вигляді точкової карти, накладеної на знімок території Солотвина. Кожен маркер відповідає окремій точці спостереження й характеризується середньою вертикальною швидкістю деформації, вираженою в міліметрах за рік; колір точки відображає належність до певного інтервалу швидкостей, наведеного в легенді (від близько $-3,8$ мм/рік до приблизно $+0,3$ мм/рік).

Найбільш виражене скупчення точок із значними від'ємними швидкостями (сині та фіолетові інтервали, до $-3,78$ мм/рік) спостерігається в західній частині зображення вздовж долини річки, де точкові аномалії формують витягнуту смугу, орієнтовану за течією. Це свідчить про локалізацію інтенсивних осідань у межах прибережних терас та техногенно навантажених ділянок, що можуть бути пов'язані з впливом гідрогеологічних умов, ослабленням масиву порід під дією

змін рівня ґрунтових вод і можливих підтоплень, а також із наявністю підземних виробок у безпосередній близькості до русла. Водночас уздовж цієї ж смуги простежуються зелені й жовті точки, що відповідають меншим за модулем негативним швидкостям (до приблизно $-0,87$ мм/рік), що вказує на поступове затухання ефекту осідання в напрямку від центрів активних деформацій до периферії.

У центральній та північно-східній частинах урбанізованої території домінують точки теплого спектра (жовті, оранжеві й червоні), для яких характерні швидкості в діапазоні від приблизно $-0,28$ до $+0,3$ мм/рік. Такий інтервал відображає субміліметрові за модулем вертикальні зміщення, які інтерпретуються як відносно стабільний стан поверхні або дуже повільні деформаційні процеси, що наближаються до межі чутливості застосованої супутникової методики. Важливо, що навіть у межах цієї зони спостерігаються окремі точкові аномалії з дещо більшими негативними швидкостями, однак вони не утворюють протяжних кластерів, що свідчить про локальний характер можливих деформацій, наприклад, у межах окремих інженерних споруд чи невеликих техногенних об'єктів.

Узагальнюючи, отримана карта вертикальних швидкостей демонструє чітку просторову диференціацію деформаційного поля: інтенсивні осідання зосереджені переважно в західному вздовждолинному сегменті, тоді як центрально-східна частина міста характеризується переважно стабільним або слабо деформованим станом. Таке поєднання результатів супутникового моніторингу з високодетальним зображенням місцевості дає змогу не лише кількісно оцінити темпи просідань, але й прямо співвіднести їх із планувальною структурою Солотвина, зонами розміщення житлової та промислової забудови, транспортної інфраструктури й потенційно небезпечних карстово-суфозійних утворень. Це створює науково обґрунтовану основу для подальшого інженерно-геологічного районування, визначення пріоритетних ділянок детального наземного моніторингу та розроблення заходів мінімізації геодинамічних ризиків для населення та об'єктів інфраструктури.

Висновки до 3-го розділу.

У даному розділі було розглянуто особливості та основні методи InSAR. Також було створено 114 інтерферограм за проміжок часу 2024-2025 для с. Солотвино, на основі яких було побудовано карту LOS-швидкостей. З урахуванням геометрії зйомки Sentinel-1 та припущення домінування вертикальної складової руху виконано перерахунок LOS-швидкостей у вертикальні, у результаті чого побудовано карту середніх вертикальних швидкостей деформацій земної поверхні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході дослідження реалізовано повний цикл обробки даних Sentinel-1 за методикою SBAS із формуванням стеку з 130 інтерферограм, побудовою часових рядів деформацій та переходом від швидкостей у напрямку лінії видіння до вертикальних компонент.

Отримані карти середніх LOS- та вертикальних швидкостей виявили чітку просторову диференціацію деформаційного поля: локальні зони інтенсивного осідання з темпами до кількох міліметрів за рік зосереджені переважно у західній частині полігону вздовж долини річки та в районі соляних виробок, тоді як центрально-східні ділянки урбанізованої території характеризуються субміліметровими за модулем вертикальними зміщеннями, близькими до нуля.

Накладення результатів супутникового моніторингу на високодетальні космознімки та порівняння з відомими геолого-техногенними умовами підтвердило зв'язок виявлених аномалій із зонами розвитку карстово-суфозійних процесів і техногенного навантаження, що засвідчує високу інформативність та практичну придатність технології InSAR для довготривалого контролю геодинамічної ситуації в районі Солотвинського родовища та обґрунтування пріоритетних ділянок детального наземного моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Арешкович О. О. Напружено-деформований стан ґрунтової основи зсувонебезпечної території : дис... канд. наук: 05.23.02 - Київ, 2007. – 179 с
2. В Чорноморську знову загострилась ситуація зсувів. URL: <https://odessa.net.ua/news/v-chernomorske-snova-obostrilas-ugroza-opolznei>
3. В Одесі будинки просто зникають у проваллях: фото жахливих зсувів. URL: https://24tv.ua/v_odesi_budinki_prosto_znikayut_u_provallyah_foto_zhahlivih_zsuviv_n955876
4. ДСТУ-Н Б В.1.1-39:2016 Настанова щодо інженерної підготовки ґрунтової основи будівель і споруд. Чинний від 01.04.2017. Київ : Мінрегіон, 2016. 48 с.
5. Дяків В., Гайдзін А. Карстова гідрогеологічна система Солотвинського родовища, ефект самотампонавання карстового каналу та перспективи відновлення спелеолікарні у шахті № 9. Вісник Львівського університету. Серія геологічна. 2021. № 35. DOI: 10.30970/vgl.35.07
6. Жидкова Т. В., Чепурна С. М. Дослідження активізації зсувних процесів на урбанізованих територіях. Сталий розвиток авіаційної інфраструктури України: колективна монографія. Київ: Національний авіаційний університет, 2021. С. 342–350. URL: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-312-8-14>
7. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП — Київ, Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». 2020. Випуск XVII. 104 с. URL: https://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2020/06/egp_2020-2.pdf
8. Кравець О. Я. Використання геоінформаційних технологій для дослідження зсувних процесів // Науковий вісник НЛТУ України. – 2020. – Т. 30, № 2. DOI: <https://doi.org/10.36930/40300220>
9. Методи спостереження за розвитком зсувних процесів. StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/5025666/page:4/> (дата звернення: 03.12.2025).

10. Навчально-методичні рекомендації щодо виконання кваліфікаційної роботи (проекту) магістра (для студентів спеціальності 193 Геодезія та землеустрій). / уклд. : В. Ю. Пересоляк, І. В. Крильо, В. О. Романко та інш. / [Ужгород. нац. ун-т; геогр. ф-т; каф. геодезії, землеустрою та геоінформатики] – Ужгород : Видавництво «УжНУ», 2024. – 80 с.

11. Нестеренко С. Використання інтерферометричних методів визначення деформацій земної поверхні // Просторове планування для майбутнього України : Всеукраїнська науково-практична конференція. – 2023. – URL: <https://nupp.edu.ua/event/naukovo-praktichna-vseukrainska-konferentsiya-perspektivi.html>

12. Орененко Т. А. Методика дистанційного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні за даними радарної інтерферометрії // Український журнал дистанційного зондування Землі. – 2023. – Т. 10, № 3. – С. 16–20. – DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.247>

13. Пересоляк В.Ю., Радиш І.П., Пересоляк Г.В., Яким В.В. . Звіт про оцінку впливу на довкілля розчистки русла ріки Тиса від наносів твердого стоку на трьох ділянках в районі ПЗ 284, ПЗ 286-287, ПЗ 291-292 в смт. Солотвино Тячівського району Закарпатської області» С-88 . Ужгород -2021

14. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI : станом на 31 жовт. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> (дата звернення: 03.12.2025).

15. Савчук С. Г., Каблак Н. І., Калинич І. В., Ничвид М. Р. Застосування технологій InSAR для моніторингу геодинамічних процесів (на прикладі Солотвинського солерудника). У: Геофізика і геодинаміка: прогнозування та моніторинг геологічного середовища = Geophysics and Geodynamics: Prediction and Monitoring of Geological Medium : зб. наук. пр. / редкол.: В. Ю. Максимчук та ін. Львів: Ін-т геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Карпат. від-ня, 2023. С. 180–184

16. Algadhi, A., Psimoulis, P., Grizi, A., & Neves, L. (2024). Assessment of the accuracy of terrestrial laser scanners in detecting local surface anomaly. *Remote Sensing*, 16(24), 4647. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16244647>
17. Ansar A. M. H., Din A. H. M., Latip A. S. A., Reba M. N. M. A short review on persistent scatterer interferometry techniques for surface deformation monitoring // *ISPRS Archives*. – 2022. – Vol. XLVI-4/W3-2021. – P. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-23-2022>
18. Ansar, A. M. H.; Din, A. H. M.; Latip, A. S. A.; Reba, M. N. M. A short review on persistent scatterer interferometry techniques for surface deformation monitoring // *ISPRS Archives*. – 2022. – Vol. XLVI-4/W3-2021. – P. 23–32. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-23-2022.
19. Crosetto, M., Devanthery, N., Cuevas-González, M., Monserrat, O. & Crippa, B. (2015). Exploitation of the full potential of PSI data for subsidence monitoring. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 311–314. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-311-2015>
20. Dobos E., Kovács I. P., Kovács D. M., Ronczyk L., Szűcs P., Perger L., Mikita V. Surface Deformation Monitoring and Risk Mapping in the Surroundings of the Solotvyno Salt Mine (Ukraine) between 1992 and 2021. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 13. Article 7453. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137453>
21. Hlotov, V., Shylo, Y., Yatskivskyi, Y., Kablak, N. & Nychvyd, M. (2023). Study of karst manifestations in Solotvyno based on aerial photography from a UAV. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 115(1) 27-34. <https://doi.org/10.2478/rgg-2023-0004>
22. Huang, Ch., Xia, H., Hu, J. Surface Deformation Monitoring in Coal Mine Area Based on PSI // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 29672–29678. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2900258.
23. Hussain, S., Pan, B., Hussain, W., Sajjad, M. M., Ali, M., Afzal, Z., Abdullah-Al-Wadud, M. & Tariq, A. (2025). Integrated PSInSAR and SBAS-InSAR analysis for landslide detection and monitoring. *Physics and Chemistry of the Earth*, 139, 103956. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.103956>

24. Legacy observations | Climate-scale Geodesy | Research | National Geodetic Survey. Home. URL: <https://www.ngs.noaa.gov/research/climate-scale/legacy-observations.shtml> (date of access: 03.12.2025).
25. NASA. Vertex – Earthdata. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/tools/vertex> (дата звернення: 03.12.2025)
26. Nazarevych, A., Nazarevych, L., Bayrak, G., & Pryzhok, N. (2022). Seismotectonics of the Oash and Transcarpathian deep faults junction zone (Ukrainian Transcarpathians). *Journal of Geodynamics*, 2(33), 99–114. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.100>
27. Ren H., Feng X. Calculating vertical deformation using a single InSAR pair based on singular value decomposition in mining areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. Vol. 92. Art. 102115. DOI: [10.1016/j.jag.2020.102115](https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102115)
28. Stoeckl, L.; Banks, V.; Shekhunova, S.; Yakovlev, Y. The hydrogeological situation after salt-mine collapses at Solotvyno, Ukraine // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2020. – Vol. 30. – Article 100701. – DOI: [10.1016/j.ejrh.2020.100701](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100701)
29. Suhadha A. G., Trinugroho, Umbara R. P., Melati D. N., Astisiasari, Wisyanto. Comparative Analysis of PSI and SBAS InSAR in Landslide Monitoring: Influence of Topography and Precipitation Dynamics. In: 2024 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES), 8–9 November 2024, Yogyakarta, Indonesia.. DOI: [10.1109/ICARES64249.2024.10768018](https://doi.org/10.1109/ICARES64249.2024.10768018)
30. Tretyak K., Brusak I. Investigation of the mining departments influence of Solotvynsky salt mine SE on the Earth surface, buildings and constructions using satellite radar monitoring. *Journal of Geodynamics (JGD)*. 2021. Vol. 2(31), № 2(31). P. 41–52. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.041><https://www.mdpi.com/2071-1050/14/13/7531/pdf>
31. Tretyak, K., & Brusak, I. (2022). Modern deformations of Earth crust of territory of Western Ukraine based on “GEOTERRACE” GNSS network data. *Journal*

of Geodynamics, 1(32), 16–25. DOI:
<https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.016><https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.100>

32. Xu J., Huang Y., Yan J., Guo Z., Li B., Dong H., Liu P. Marine Radar Oil Spill Monitoring Method Based on YOLOv11 and Improved NGO Algorithm. Remote Sensing. 2025. Vol. 17, No. 23. Article 3922. URL:
<https://doi.org/10.3390/rs17233922>

33. Zhang, Z., Wang, C., Tang, Y., Fu, Q. & Zhang, H. (2015). Subsidence monitoring in coal area using time-series InSAR combining persistent scatterers and distributed scatterers. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 39, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.007>