

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

Реєстрація № 170-12/25

На правах рукопису

УДК 528.8(477.87):551.4

«Допущено до захисту»

завідувач кафедри геодезії,  
землеустрою та геоінформатики

к.н.з д.у., доц. Владислав

ПЕРЕСОЛЯК

«    »      2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему :

«Моніторинг сучасних екзогенних процесів на території Тячівського району засобами радіолокаційної інтерферометрії»

Спеціальність : 193 Геодезія та землеустрій

Виконавець роботи:

студент(ка)

Ларь Ірина Романівна

Науковий керівник :

к. т. н., доц.

Калинич Іван Васильович

Ужгород – 2025

РЕЄСТРАЦІЯ

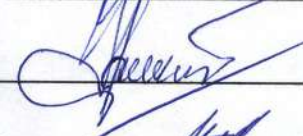
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА ГЕОІНФОРМАТИКИ

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи ОКР «Магістр»  
на тему:

**Моніторинг сучасних екзогенних процесів на території Тячівського району  
засобами радіолокаційної інтерферометрії**

Виконала:  
Студентка 2 магістратури курсу денної форми навчання  
зі спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»

Виконала:  Ірина ЛАРЬ

Керівник:  Іван КАЛИНИЧ

Рецензент:  Іван ПРОДАНЕЦЬ

Ужгород – 2025

Реєстрація N<sup>o</sup> 170-12/25  
(номер)

« 8 » зрудня 2025 р.

Ганц  
(підпис лаборанта кафедри)

Святослав ПОЛЩУК  
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

**Кваліфікаційна робота допущена до захисту**

Завідувач кафедри геодезії, землеустрою та геоінформатики

Владислав ПЕРЕСОЛЯК  
(підпис) к.н.з д.у., доц. Владислав ПЕРЕСОЛЯК

« 8 » зрудня 2025 р.

**Рецензент**

Іван ПРОДАНЕЦЬ  
(підпис)

Іван ПРОДАНЕЦЬ  
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Дарія Іванівна Родіоненко

(підпис, ім'я та по батьку)

Тема кваліфікаційної роботи: «МОНІТОРИНГ СУЧАСНИХ ВІЗОВИНИХ  
ПРОБЛЕМ НА ТЕРИТОРІЇ ТЯЧІВСЬКОГО РАЙОНУ ЗАСОБАМИ  
РАДІОКАЛІБРАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ»

Керівник роботи: к.т.н., доцент Катрич І.В.

Завдання розроблено рішенням виконання навчального завдання № 21

від 10.09.2025 р.

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

1. Висхідні дані до роботи:

- 1) аерофотокарти масштабу 1:10000
- 2) матеріали карт і планів топографіко-геодезичного знімання
- 3) матеріали планів та висотного знімання місцевості
- 4) матеріали радіокалібраційних інтерферометрів

5) дані про геодезичний матеріал

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 » квітня 2025 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Ларь Ірини Романівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

**Тема кваліфікаційної роботи :** «МОНІТОРИНГ СУЧАСНИХ ЕКЗОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ НА ТЕРИТОРІЇ ТЯЧІВСЬКОГО РАЙОНУ ЗАСОБАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ»

**Керівник роботи:** к.т.н., доцент Калинич І.В.

Затверджено розпорядженням вищим навчальним закладом № 21

від « 30 » жовтня 2025 р.

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

**1. Вихідні дані до роботи:**

- 1) ортофотоплани масштабу 1:10000
- 2) каталоги координат топографо-геодезичного знімання
- 3) матеріали планово-висотного знімання місцевості
- 4) матеріали радіоінтерферометрії
- 5) матеріали геодезичного моніторингу

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

### **ВСТУП**

### **РОЗДІЛ 1. Теоретичні засади дистанційного моніторингу зсувів на території Закарпаття**

1.1. Аналіз літературних джерел за темою моніторинг сучасних екзогенних процесів методами радіолокаційної інтерферометрії

1.2. Необхідність проведення моніторингу деформацій земної поверхні на території Закарпаття

1.3. Класифікація методів вимірювань деформацій земної поверхні

Висновки до розділу 1

### **РОЗДІЛ 2. Характеристика об'єкту спостережень**

2.1. Інженерно-геологічна будова території дослідження

2.2. Гідрогеологічні умови формування зсувів на території Закарпаття

2.3. Ґрунтовий покрив території дослідження

Висновки до розділу 2

### **РОЗДІЛ 3. Експериментальні дослідження дистанційного моніторингу зсувних процесів методами інтерферометрії**

3.1. Поняття, чинники виникнення та основні види екзогенних процесів на території Закарпаття

3.2. Загальна характеристика та класифікація зсувних процесів

3.3. Поширення зсувних процесів в межах території Закарпаття

3.4. Методи дослідження зсувних процесів

3.5. Результати застосування методу радарної інтерферометрії

3.6. Польові дослідження

3.7. Порівняльний аналіз результатів радіолокаційний та наземних спостережень

Висновки до розділу 3

### **ВИСНОВКИ**

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

### **ДОДАТКИ**

#### **3. Перелік графічного матеріалу (з точним значенням обов'язкових креслень):**

1) сучасні цифрові ортофотоплани та цифрові топографічні плани масштабу 1:500

2) план горизонтального знімання масштабу 1:10 000

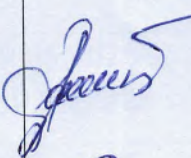
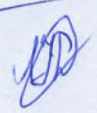
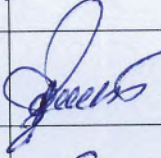
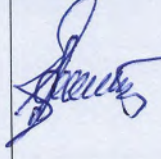
3) схема розміщення планово-висотних розпізнавальних знаків

4) 3D-модель поверхні за даними лазерного сканування

5) Карта поширення екзогенних геологічних процесів на території

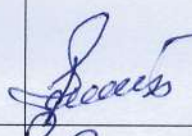
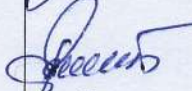
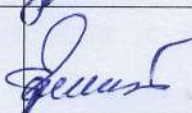
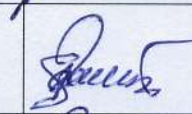
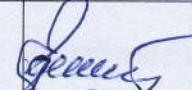
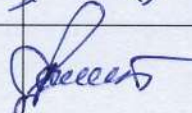
Тячівського району в масштабі 1:50000

**Консультанти з розділів кваліфікаційної роботи :**

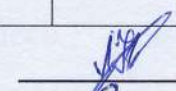
| Розділ                                                                                                                 | Прізвище, ініціали<br>та посада<br>консультанта | Підпис, дата                                                                        |                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                        |                                                 | Завдання<br>видав                                                                   | Завдання<br>прийняв                                                                 |
| РОЗДІЛ 1 . Теоретичні<br>засади дистанційного<br>моніторингу зсувів на<br>території Тячівського району<br>Закарпаття   | к.т.н., доц.<br>Калинич І.В.                    |  |  |
| РОЗДІЛ 2. Характеристика<br>об'єкту спостережень.                                                                      | к.т.н., доц.<br>Калинич І.В.                    |  |  |
| РОЗДІЛ 3. Експериментальні<br>дослідження дистанційного<br>моніторингу зсувних<br>процесів методами<br>інтерферометрії | к.т.н., доц.<br>Калинич І.В.                    |  |  |

**Дата видачі завдання:** « 30 » квітня 2025 р.

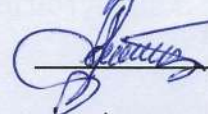
### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів виконання роботи                                                      | Термін виконання етапів роботи | Підпис керівника                                                                      |
|---|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Вивчення законодавчих джерел, довідкова й періодична література з теми дослідження | 05.05.2025 – 16.05.2025        |    |
| 2 | Збір вихідних даних                                                                | 19.05.2025 – 30.05.2025        |    |
| 3 | Написання розділу 1                                                                | 02.06.2025 – 27.06.2025        |    |
| 4 | Написання розділу 2                                                                | 30.06.2025 – 01.08.2025        |    |
| 5 | Написання розділу 3                                                                | 04.08.2025 – 26.09.2025        |    |
| 6 | Здача на перевірку та виправлення кваліфікаційної роботи                           | 29.09.2025 – 21.11.2025        |   |
| 7 | Проведення рецензування та здача готової роботи на кафедру                         | 24.11.2025 – 05.12.2025        |  |

Студентка 2 курсу магістратури

 Ірина ЛАРЬ

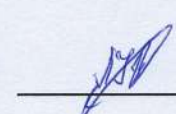
Керівник кваліфікаційної роботи

 Іван КАЛИНИЧ

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

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

Студентка 2 курсу магістратури

 Ірина ЛАРЬ

## АНОТАЦІЯ

Моніторинг сучасних екзогенних процесів на території Тячівського району Закарпатської області є актуальним для оцінки геологічних ризиків та забезпечення безпеки населення. Регіон характеризується складним рельєфом, активністю зсувів, обвалів та ерозійних процесів, що робить його вразливим до змін земної поверхні.

Традиційні методи спостереження, такі як геодезичні та інженерні, ефективні, але трудомісткі, з обмеженим охопленням території. Застосування супутникової радіолокаційної інтерферометрії (InSAR) дозволяє оперативно оцінювати зміни земної поверхні, виявляти активні та приховані зони зсувів, контролювати стан інфраструктури, оцінювати вплив паводків та інтегрувати дані з геоінформаційними системами для створення карт ризику.

У роботі поєднано дистанційні та наземні методи моніторингу, проведено польові спостереження та порівняння результатів різних методик. Це забезпечує комплексну оцінку стану зсувних процесів та формує основу для прогнозування та управління ризиками в регіоні.

**Ключові слова:** екзогенні процеси, супутникова радіолокаційна інтерферометрія (InSAR), моніторинг, прогнозування.

## ABSTRACT

The monitoring of contemporary exogenous processes in the Tyachiv District of the Zakarpattia Region is crucial for assessing geological risks and ensuring the safety of the population. The region is characterised by complex terrain, as well as high activity of landslides, collapses, and erosion, which makes it vulnerable to surface deformation.

Traditional observation methods, such as geodetic and engineering techniques, are effective but labour-intensive, with limited territorial coverage. The application of satellite radar interferometry (InSAR) enables the rapid assessment of surface changes, identification of active and hidden landslide zones, monitoring of infrastructure, evaluation of flood impacts, and integration of data with geographic information systems (GIS) to produce risk maps.

This study combines remote sensing and ground-based monitoring methods, conducts field observations, and compares the results of various approaches. This provides a comprehensive assessment of landslide activity and establishes a basis for forecasting and managing risks in the region.

**Keywords:** exogenous processes, satellite radar interferometry (InSAR), monitoring, forecasting.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....                                                                                                          | 11        |
| ВСТУП.....                                                                                                                     | 12        |
| <b>РОЗДІЛ 1. Теоретичні засади дистанційного моніторингу зсувів на території Закарпаття.....</b>                               | <b>15</b> |
| 1.1.Аналіз літературних джерел за темою моніторинг сучасних екзогенних процесів методами радіолокаційної інтерферометрії ..... | 15        |
| 1.2.Необхідність проведення моніторингу деформацій земної поверхні на території Закарпаття.....                                | 17        |
| 1.3.Класифікація методів вимірювань деформацій земної поверхні.....                                                            | 19        |
| Висновки до розділу 1.....                                                                                                     | 27        |
| <b>РОЗДІЛ 2. Характеристика об'єкту спостережень.....</b>                                                                      | <b>28</b> |
| 2.1. Інженерно-геологічна будова території дослідження.....                                                                    | 28        |
| 2.2. Гідрогеологічні умови формування зсувів на території Закарпаття.....                                                      | 31        |
| 2.3. Ґрунтовий покрив території дослідження.....                                                                               | 33        |
| Висновки до розділу 2.....                                                                                                     | 37        |
| <b>РОЗДІЛ 3. Експериментальні дослідження дистанційного моніторингу зсувних процесів методами інтерферометрії.....</b>         | <b>38</b> |
| 3.1.Поняття, чинники виникнення та основні види екзогенних процесів на території Закарпаття.....                               | 38        |
| 3.2. Загальна характеристика та класифікація зсувних процесів.....                                                             | 45        |
| 3.3. Поширення зсувних процесів в межах території Тячівського району.....                                                      | 49        |
| 3.4. Методи дослідження зсувних процесів.....                                                                                  | 56        |
| 3.5. Результати застосування методу радарної інтерферометрії.....                                                              | 57        |
| 3.6. Польові дослідження.....                                                                                                  | 62        |
| 3.7. Порівняльний аналіз результатів радіолокаційний та наземних спостережень.....                                             | 77        |
| Висновки до розділу 3.....                                                                                                     | 79        |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....                                                                                                         | 80        |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                | 82        |
| ДОДАТКИ.....                                                                                                                   | 90        |

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА - безпілотний літальний апарат

ГІС - геоінформаційні системи

ДБН - Державні будівельні норми

ДЗЗ - дистанційне зондування Землі

ЕГП - екзогенні геологічні процеси

РЛС - радіолокаційні системи

ЦМР - цифрова модель рельєфу

GNSS - Global Navigation Satellite System (Глобальна навігаційна супутникова система)

GPS - Global Positioning System (Глобальна система позиціонування)

InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar (Інтерферометричний радар з синтезованою апертурою).

ITRF - International Terrestrial Reference Frame (Міжнародна земна система відліку)

PS - Persistent Scatterers (постійні розсіювачі)

SAR-зображення - Synthetic Aperture Radar (зображення з радара із синтезованою апертурою)

SBAS - Small Baseline Subset (Супутникова система доповнення)

## ВСТУП

**Актуальність дослідження.** В умовах швидкого прогресу засобів геоінформаційного аналізу та супутникового моніторингу все більше уваги приділяють моніторингу екзогенних геологічних процесів, які впливають на території, що характеризуються складною геоморфологічною будовою та високим рівнем ризиків природних катастроф. Такі екзогенні процеси як зсуви, ерозія, селеві потоки та інші форми поверхневих деформацій, є одними з головних факторів трансформації рельєфу в умовах гірських територій. Тячівський район Закарпатської області характеризується складними геоморфологічними умовами, високою сейсмічною активністю та значною вразливістю до природних небезпек, що обумовлює актуальність постійного спостереження та аналізу стану екзогенних процесів на його території.

Останні десятиліття характеризуються стрімким розвитком дистанційних методів дослідження земної поверхні. Одним з найперспективніших серед них є метод радіолокаційної інтерферометрії (InSAR), який базується на аналізі фазових змін сигналів, отриманих за допомогою супутникових радіолокаційних знімків. Ця технологія дозволяє з високою точністю (до міліметрів) виявляти вертикальні та горизонтальні зміщення земної поверхні у великих масштабах та з високою періодичністю. Особливу цінність вона має для важкодоступних або слабо вивчених регіонів, де класичні методи наземного моніторингу є складними або неможливими у реалізації.

**Мета** даної магістерської роботи полягає у виявленні переваг використання дистанційних методів дослідження Землі для отримання даних про стан земної поверхні та подальшого моніторингу її змін і деформацій.

Відповідно до зазначеної мети в магістерській роботі для її досягнення поставлені такі **завдання**:

- дослідити міжнародний досвід використання радіолокаційних даних у картографії та інженерно-геодезичних роботах;
- дослідити методи, що застосовуються для обробки радарних даних з метою контролю змін земної поверхні;

- здійснити порівняння результатів супутникової інтерферометрії з польовими геодезичними вимірюваннями на території с. Солотвина та с. Біла Церква Тячівського району.

**Об'єктом дослідження** виступають деформаційні процеси, що проявляються у змінах рельєфу та приповерхневих структур на території Тячівського району.

**Предметом дослідження** є методики та технологічні підходи до моніторингу вертикальних зміщень потенційно небезпечних техногенних об'єктів на основі радіолокаційних даних.

**Наукова новизна** роботи полягає у поєднанні сучасних дистанційних та наземних методів моніторингу екзогенних геологічних процесів. Інтеграція даних супутникової радіолокаційної інтерферометрії (InSAR) із високоточним нівелюванням, GPS-вимірюваннями та лазерним скануванням забезпечує підвищення достовірності оцінки зсувних та деформаційних процесів у складних природних умовах Тячівського району.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у доведенні можливості створення єдиної планово-висотної основи на основі супутникових даних та сучасних моделей у державній геодезичній системі. Сформовано методичну схему всебічного аналізу рухів на ділянках, схильних до природних та техногенних змін, із використанням інноваційних засобів спостереження.

Такий підхід дає можливість швидко створювати планово-висотну основу потрібної точності для прикладних геодезичних завдань, застосовуючи супутникові вимірювання, безпілотники та 3D-сканування для спостережень за сучасними процесами.

На прикладі територій Солотвино та Біла Церква було розроблено нову високоточну геодезичну мережу з GPS, 3D-скануванням, аерофотозніманням та високоточним нівелюванням. Пункти мережі мають субсантиметрову точність у плані та по висоті та узгоджуються з міжнародною системою координат ITRF 2000, що дозволяє використовувати їх у державній референційній системі.

**Апробація роботи.** Основні результати дослідження пройшли апробацію на

XII міжнародній науково – практичній конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні» GeoTech Zakarpattyа 2025 23-25 жовтня 2025 році, а також представлені й обговорені під час попереднього захисту магістерської роботи.

**Особистий внесок здобувача.** Здійснено детальний аналіз сучасних досліджень екзогенних процесів із акцентом на застосування сучасних методів дистанційного зондування та геодезичних технологій. Особисто обрано ділянки для польових спостережень, включаючи зсувонебезпечні та карстоутворені території, що впливають на екологічну стабільність регіону. Здобувач брав участь у проведенні геодезичного моніторингу з використанням високоточних GPS-вимірювань та 3D-лазерного сканування. Виконано обробку та аналіз даних радіолокаційної інтерферометрії, що дозволило визначити просторово-часові зміни деформацій земної поверхні.

**Публікації.** Основні результати дослідження опубліковано в збірнику матеріалів конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні» GeoTech Zakarpattyа 2025.

**Структура кваліфікаційної роботи магістра.** Кваліфікаційна робота містить: анотацію, вступ, три розділи, 3 таблиці, 23 рисунки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи складає 94 аркуші.

## **РОЗДІЛ 1. Теоретичні засади дистанційного моніторингу зсувів на території Закарпаття**

### *1.1. Аналіз літературних джерел за темою моніторинг сучасних екзогенних процесів методами радіолокаційної інтерферометрії*

Моніторинг екзогенних геологічних процесів є важливою складовою геоекологічної безпеки, особливо у гірських та передгірських регіонах, де розвиток небезпечних процесів має суттєвий вплив на стан інфраструктури та життєдіяльність населення. Проблематика дослідження екзогенних процесів знайшла широке відображення у працях українських та зарубіжних вчених, які досліджували як механізми їх виникнення, так і методи прогнозування та моніторингу.

Дослідження причин виникнення негативних природних процесів у Карпатському регіоні проводили як наукові центри та виробничі організації, так і окремі фахівці. Завдяки цьому накопичено значний обсяг даних, що охоплюють поширення та особливості таких явищ, як зсуви, селеві потоки, ерозія русел річок, обвали та інші. Такі підходи до вивчення екзогенних геологічних процесів викладено в роботах таких українських дослідників, як О.М. Адаменка [1], А.М. Гайдіна [6], В.І. Лялько [23], А.В. Лущика [36], О.Б. Климчука [36,37], Л.І. Дороша [11] та інших. У цих роботах акцентовано увагу на необхідності комплексного підходу до аналізу природних небезпек, що включає як польові дослідження, так і використання сучасних методів дистанційного зондування, геоінформаційних систем (ГІС) та математичного моделювання. Автори підкреслюють важливість врахування антропогенних чинників, таких як вирубка лісів, гірничодобувна діяльність, нераціональне землекористування, які значно посилюють прояви екзогенних процесів у Карпатському регіоні.

Особливо досліджено питання розробки та впровадження систем моніторингу та прогнозування небезпечних геологічних явищ, що дозволяє своєчасно реагувати на загрози та мінімізувати ризики для населення і інфраструктури. Зокрема, дослідження А.В. Лущика та його колег [36]

демонструють шляхи вдосконалення державної системи спостереження за зсувами та іншими процесами, а роботи Л.І. Дороша [11] показують ефективність застосування радіолокаційної інтерферометрії для моніторингу техногенно-небезпечних об'єктів.

З-поміж новітніх методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) особливе місце займає інтерферометрія синтезованої апертури (InSAR) — технологія, що базується на аналізі фазових змін радіолокаційних сигналів, отриманих із супутників. Цей метод дозволяє вимірювати вертикальні зміщення земної поверхні з точністю до кількох міліметрів, що робить його незамінним для моніторингу повільних геодинамічних процесів. Ряд наукових праць висвітлює окремі аспекти зазначеної теми, зокрема у дослідженнях таких закордонних науковців, як Colombo and MacDonald [41], Du et al. [43], Wang et al. [56], так і українських вчених Pakshyn et al. [44], Ляска І. та ін. [12].

Метод радарної інтерферометрії базується на обробці пари радіолокаційних зображень шляхом аналізу їх когерентності [53]. Водночас застосування цього підходу має певні обмеження, що впливають на точність визначення деформацій [52]. Часова та геометрична декореляція, а також атмосферні збурення знижують якість просторової і часової когерентності, що ускладнює вивчення зсувних процесів [48, 64]. Для мінімізації впливу цих джерел похибок розроблено низку методів диференціальної інтерферометрії для обробки часових рядів [45].

Супутники, обладнані радаром із синтезованою апертурою (SAR), формують зображення земної поверхні за допомогою випромінювання електромагнітних хвиль та аналізу відбитого сигналу. Постійне обертання таких супутників навколо Землі дозволяє накопичувати часові ряди SAR-зображень для однієї й тієї ж території протягом певного періоду, що дає змогу досліджувати динаміку змін на поверхні. Кожне SAR-зображення характеризується двома основними параметрами: амплітудою та фазою [45].

Методика супутникової радіолокаційної інтерферометрії застосовувалася для аналізу геодинамічних процесів у зонах рудників «Калуш» та «Ново-Голинь». У дисертаційному дослідженні Л. І. Дороша [11] представлено

результати спостережень за станом поверхні над гірничими об'єктами, що базуються на обробці даних із супутника Sentinel-1, охоплюючи період з квітня 2016 року по жовтень 2017 року.

Варто окремо відзначити науковий внесок М.М. Айзенберга, Б.Л. Величка, А.А. Клюкіна та А.С. Тищенко, які у своїх дисертаційних дослідженнях та наукових публікаціях зосереджували увагу на проблематиці селевих процесів у Карпатському регіоні.

На рівні програмного забезпечення для обробки інтерферометричних даних активно використовуються такі платформи, як SNAP (ESA), LiCSBAS, GMTSAR, SARPROZ, які дозволяють автоматизувати обробку супутникових знімків та генерувати карти зміщень. Вітчизняні та зарубіжні дослідники підкреслюють, що доступність відкритих супутникових даних (зокрема місій Sentinel-1) значно підвищила доступність цієї технології для практичного застосування.

Інтерферометричний радар з синтезованою апертурою (InSAR), у поєднанні з наземними геодезичними технологіями, зокрема GNSS-спостереженнями, дозволяє компенсувати недостатню щільність традиційних мереж геодезичних пунктів. Застосування цього методу сприяє виявленню аномалій деформацій на великих територіях, які могли залишитися непоміченими через обмежену просторову роздільність GNSS-даних. [63]

### *1.2. Необхідність проведення моніторингу деформацій земної поверхні на території Закарпаття*

Закарпаття належить до сейсмічно активних регіонів України, де щороку фіксується кілька підземних поштовхів середньої сили на тлі великої кількості слабких землетрусів. Дослідження геологічних і супутніх природних процесів у цьому регіоні є вкрай важливим також через його географічне розташування. Внаслідок цього тут з'явилися об'єкти критичної інфраструктури, що характеризуються підвищеним рівнем ризику: магістральні газо- та нафтопроводи, лінії електропередач високої напруги, залізничні шляхи, водосховища та ключові транспортні сполучення.

Територія Закарпатської області характеризується складним гірським рельєфом, високою щільністю річкової мережі та активною господарською діяльністю, що сприяє розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів.

Деформації земної поверхні — це зміни у структурі або формі ґрунту та геологічних шарів, які можуть мати як природне, так і антропогенне походження. Вони проявляються у вигляді вертикальних або горизонтальних зсувів, просідань, тріщин, розломів, а також підняття окремих ділянок. Такі деформації можуть мати локальний характер або охоплювати великі території, створюючи загрозу для інфраструктури, житлової забудови та безпеки населення. Особливої уваги потребують регіони з ускладненими геологічними умовами, серед яких Закарпаття займає одне з провідних місць в Україні.

До основних чинників, що впливають на активізацію деформацій у Закарпатті, належать як природні, так і антропогенні. Зміни клімату, значні опади, ерозійні процеси, а також діяльність людини — зокрема неконтрольоване будівництво, вирубка лісів і добування корисних копалин — суттєво посилюють нестабільність земної поверхні. Моніторинг дає змогу встановити причинно-наслідкові зв'язки між цими процесами та спрогнозувати подальший розвиток подій.

Наслідки деформацій можуть бути небезпечними як для населення, так і для об'єктів інфраструктури: руйнуються дороги, мости, інженерні мережі, житлові будинки. Особливо уразливими є гірські райони, де щільність забудови висока, а простір для розширення обмежений.

Окрім безпекового аспекту, дані, отримані в результаті спостережень, мають значну цінність для науки й інженерії. Вони дають змогу моделювати геодинамічні процеси, розробляти стійкі інженерні рішення та раціонально планувати використання територій. Таким чином, моніторинг стає інструментом для розумного розвитку та збереження довкілля.

Внаслідок постійного зростання кількості надзвичайних ситуацій, викликаних як природними, так і техногенними факторами, особливо важливим є впровадження сучасних методів і технологій для моніторингу та прогнозування

небезпечних геологічних явищ, зокрема зсувів, обвалів, селів та інших процесів. Використання цього підходу є ключовим для пристосування регіону до нових кліматичних умов, забезпечуючи як реагування на поточні проблеми, так і прогнозування їхнього довгострокового впливу. Сучасні методи дистанційного зондування Землі, геодезичні вимірювання, використання ГІС-технологій та супутникових даних дають змогу своєчасно виявляти зміни, прогнозувати небезпечні процеси й розробляти заходи для їх попередження.

### *1.3. Класифікація методів вимірювань деформацій земної поверхні*

Спостереження за деформаціями земної поверхні є ключовим елементом забезпечення територій, особливо в регіонах із складною геологічною будовою або підвищеною інженерною активністю. Для цього використовують чотири основні групи методів: геодезичні, геотехнічні, геологічні та геофізичні. [39] Кожна з них виконує свою унікальну функцію в системі моніторингу деформацій і дає змогу оцінювати як поверхневі, так і глибинні зміни в навколишньому середовищі. На сьогоднішній день для вимірювання будь-яких деформацій земної поверхні існує великий спектр методів та інструментів: починаючи з інклінометрів та систем глобального позиціонування, закінчуючи більш сучасними підходами, наприклад, безпілотні літальні апарати та наземне лазерне сканування. Регулярні спостереження за деформаціями цими методами можуть дати лише статистичну картину області, яка досліджується. Тому практично застосовують геодезичні та геофізичні методи.

**Геодезичні методи** включають вимірювання просторового положення точок на місцевості з високою точністю. Вони дозволяють контролювати вертикальні та горизонтальні переміщення земної поверхні, використовуючи нівеліри, тахеометри, GPS/GNSS-пристрої та лазерні сканери. Ці методи є особливо цінними для довгострокового моніторингу зсувонебезпечних схилів, дамб або забудованих територій, де навіть незначні зміщення можуть мати критичне значення. Ці методи поділяються на наземні, наземно-дистанційні (ГНСС-метод та фотограметричні методи) та дистанційні (аерокосмічні методи, InSAR). [3]

Ефективність, переваги та прогнозування розвитку геодезичних методів можна переглянути в роботах закордонних вчених Ванга Х.Ф. [65] Саваге Й.Ц. [42], Дрезена Г., Бургманна Р. [40] та вітчизняних виданнях.

На даний час сучасне високоточне геометричне нівелювання застосовується не лише для отримання висотних параметрів точок державного чи місцевого значення, а і для визначення вертикальних рухів земної кори. Тобто широко використовують при проектуванні та будівництві інженерних споруд, при спостереженнях за деформаціями інженерно-геодезичних споруд та в інших роботах. Наразі геометричне нівелювання є найточнішим методом спостереження за деформаціями земної поверхні, але є один недолік, а саме вплив людського фактору під час вимірювань. [7]

Способом тригонометричного нівелювання можна визначити безпосередньо осідання точок, які розташовані на різних висотах у важкодоступних місцях. Така ситуація може виникнути при спостереженнях за високими будівлями, греблями, вежами, у тому числі під час виконання вимірів через перешкоди. До найважливіших переваг цього методу можна віднести менші трати часу та матеріальних ресурсів, при порівнянні з геометричним нівелюванням, через використання сучасних високоточних електронних тахеометрів. [11]

Також найточнішим способом при спостереженнях за висотних положенням точок є спосіб мікронівелювання. Але досить суттєвим недоліком цього способу є те, що він використовується лише в окремих випадках, зокрема, при спостереженні окремих конструкцій споруди. Це переважно при осіданнях або нахилах фундаменту, балок, ферм, технологічного устаткування. [7]

Спосіб гідростатичного нівелювання характеризується такою ж високою точністю, як і геометричне. Але перевагою гідростатичного нівелювання полягає у тому, що можна створити стаціонарні автоматизовані системи з дистанційним зніманням інформації. Цей спосіб застосовують у випадках, коли потрібно виміряти відносні вертикальні переміщення точок у важкодоступних місцях, немає прямої видимості між марками або виконання робіт для людей є технічно

небезпечним.

У наукових працях Гринішака М.Я., Бурака К.О. [27] та інших авторів встановлено, що використання сучасного геодезичного обладнання, зокрема високоточних цифрових нівелірів та штрихкодowych рейок, забезпечує визначення перевищень з мінімальною похибкою. Крім того, це сприяє автоматизації процесу передавання вимірної інформації до бази даних, що підвищує ефективність обробки результатів. Але є ряд недоліків цього методу: застосування гідросистем супроводжується низкою організаційних і технологічних складнощів у процесі вимірювань та потрібно завжди враховувати інструментальні помилки, а також помилки зовнішнього середовища.

У дослідженні Преторіуса К. та співавторів [62] детально проаналізовано геодезичну систему лінійно-кутових вимірювань, реалізовану під час моніторингу греблі Катсе (Африка). Спостереження проводилися з використанням високоточних тахеометрів, що дало змогу здійснити якісне відстеження деформаційних процесів, зумовлених підвищенням рівня води у водосховищі.

Наземно-дистанційні методи включають в собі фотограметричні методи знімання та лазерне сканування. У фотограметричному методі застосовують фототеодоліти або цифрові камери для фотознімання об'єктів. Деформації осідань ми можемо визначити через різницю координат точок споруди, які знайдені на початковому фотознімку та фотознімку деформаційного циклу. З метою визначення деформацій потрібно насамперед знати відстань фотокамери від об'єкта та фокусну відстань об'єктива фотокамери. Також потрібно пам'ятати, що деформації визначаються в одній вертикальній площині, тобто площині, яка паралельна площині фотознімка. Одним із найсуттєвішим недоліком даного методу є невисока точність отриманих результатів.

Іншим способом отримання більш точних даних при проведенні геодезичних робіт виступає лазерне сканування. За допомогою цього методу можна віддалено вести знімання об'єктів у тривимірній площині. Основна перевага полягає в тому, що лазерне сканування забезпечує збір інформації у

цифровому форматі, більш високу точність вимірювання, яка зумовлена високою щільністю точок на поверхні об'єкта, а також об'єкт можна вимірювати у важкодоступних і небезпечних місцях для людини.

У дослідженні Петернелль Тіни та інших [58] з метою оцінювання характеру руху земної поверхні запропоновано здійснювати періодичний моніторинг із використанням двох незалежних методів: аерофотознімання з безпілотного літального апарата (БПЛА) та тахеометричних вимірювань. Динаміка змін фіксується шляхом аналізу цифрової моделі рельєфу (ЦМР), побудованої за даними БПЛА, а також зміни висотних та об'ємних характеристик поверхні, визначених на основі тахеометричних спостережень. На підставі отриманих результатів автором обґрунтовано доцільність комплексного використання зазначених методів для отримання більш точних моделей переміщень, що включають розрахунки швидкості зміщень та зміни висот.

Також до геодезичних методів вимірювань деформацій земної поверхні відносять GNSS-спостереження. Принцип роботи полягає у фіксації сигналів від супутників наземними приймачами, встановленими на контрольних точках. Обробка отриманих даних дозволяє визначити координати точок з точністю до кількох міліметрів, особливо при використанні диференціальних методів. Регулярне проведення вимірювань дає змогу виявляти навіть незначні зміщення земної поверхні, що свідчать про розвиток деформаційних процесів — зсувів, осідань, тектонічних рухів тощо.

У контексті моніторингу деформацій земної поверхні, GNSS-спостереження відзначаються низкою переваг. По-перше, вони гарантують високу точність і надійність результатів. По-друге, метод дозволяє здійснювати безперервний контроль у реальному часі, що особливо важливо для об'єктів підвищеного ризику — дамб, мостів, тунелів, гірничих виробок. По-третє, GNSS-системи можуть працювати автономно, що знижує потребу в постійному людському контролі.

Дистанційні методи спостереження за деформаціями містять аерокосмічні методи. [18]

Для дистанційного аналізу характеристик земної поверхні та спостереження за їхніми змінами використовуються два основні типи аерокосмічних технологій— оптико-електронні та радіолокаційні системи. З метою здійснення аерокосмічного моніторингу територій залучаються різноманітні космічні апарати, літальні засоби (зокрема літаки, вертольоти, безпілотні авіаційні системи, дирижаблі). Вони обладнані широким спектром активної та пасивної апаратури, геофізичними приладами, засобами телекомунікації, а також наземною інфраструктурою для прийому та обробки супутникової інформації. [32]

Оптико-електронні системи функціонують на основі реєстрації пасивного природного відбитого електромагнітного випромінювання, що надходить від земної поверхні у видимому та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах. Випромінювання, яке відбивається від об'єктів, сприймається сенсорами, що перетворюють його інтенсивність у відповідні електричні сигнали, що можуть бути використані для подальшого аналізу. [18]

А радіолокаційні системи (РЛС) використовують активний принцип дії: вони самостійно генерують електромагнітні імпульси, які випромінюються у напрямку земної поверхні. Після взаємодії з об'єктами сигнал повертається до приймального пристрою, де фіксується час його затримки, що дозволяє визначити просторові характеристики досліджуваної ділянки. [14]

**Геофізичні методи** орієнтовані на вивчення фізичних властивостей надр, які можуть свідчити про приховану динаміку геологічних процесів. Вони поділяються на три методи: сейсмічні, магнітні та гравітаційні. Сейсмічні методи дозволяють фіксувати мікросейсмічну активність, що часто передуює деформаційним подіям. Гравіметричні методи допомагають визначити зміни у внутрішній структурі земної кори за варіаціями гравітаційного поля. А основу магнітного методу становлять характеристики розподілу магнітного поля та його зміни в просторі й часі, зумовлені намагніченістю гірських порід. Тут застосовують сейсмометри, електричні томографи, магнітометри, гравіметри, а також системи радарного спостереження — такі як супутники Sentinel-1 (ESA),

TerraSAR-X (DLR), ALOS-2 (JAXA). Для обробки SAR-даних використовують спеціалізоване програмне забезпечення: SNAP, GAMMA, SARPROZ, ENVI SARscape. Ці системи дозволяють виявляти горизонтальні та вертикальні мікрозміщення земної поверхні з точністю до міліметрів, завдяки чому вони залишаються ключовим інструментом для моніторингу великих територій, зокрема зони зсувів, техногенного навантаження або активної геодинаміки. [4]

Вивчення моніторингу деформацій земної поверхні на геодинамічних полігонах проводилося низкою вчених, зокрема: Буряк К.О., Мазницький А.С., Зайцев А.К., Гуляев Ю.П., Войтенко С.П., Третяк К.Р., Черняга П.Г. та інші. У працях Кузьменка Е.Д., Багрія С.М. [28] та Дешиці С.А. [31] розглядається доцільність застосування методу визначення природного електромагнітного поля Землі для оцінки небезпеки приповерхневої деформації гірських порід у зв'язку з експлуатацією соляних родовищ Передкарпаття. Крім того, із використанням електророзвідувальних методів оцінено стан геологічного середовища на шахтних полях цих родовищ.

Як наведено у працях Карнека К., Кінга Х., Масонетта Д. [54] з моменту впровадження радіолокаційних систем відкриваються нові можливості для збору даних про переміщення земної поверхні. Практичне використання таких систем передбачає вивчення структури й характеристик великих площ за результатами диференціальної обробки двох і більше радіолокаційних зображень, отриманих за однакових геометричних параметрів. Це дозволяє визначити небезпечні ділянки, на яких відбуваються деформації земної поверхні, для подальших детальних спостережень геодезичними методами. Як наведено у працях Феретті А. [49] та Костантіні М. [55] диференціальне опрацювання даних понад 30 радіолокаційних зображень дозволяє визначити вертикальні зміщення земної поверхні до сантиметрової точності. Суттєвими перевагами є зменшення трудомісткості, отримання комплексної картини техногенного впливу, більш глибоке вивчення процесів зрушення земної поверхні та моніторингу стану об'єктів на великих територіях.

Радіолокаційну інтерферометрію широко застосовують для моніторингу

деформації ґрунту, які спричинені землетрусами, тектонічними скороченнями, підземного перекачування води, міграцією гідротермальної або магматичної рідини, видобутку нафти, рекультивацій земель, а також для картографування рельєфу Землі.

Поєднання радіолокаційних даних із GNSS-спостереженнями розширює аналіз поширення наслідків землетрусів. Як показано в роботах застосування диференціального опрацювання даних радіолокаційних зображень дозволяє визначити вертикальні зміщення земної поверхні з точністю до сантиметра.

Наприклад, у праці Річардса М. А. [60] показано, як за результатами багатопрохідних космічних радіолокаційних зніманих однієї і тієї ж місцевості можна оцінювати зміщення земної поверхні будівель або і споруд або земної поверхні із сантиметровою або, навіть, міліметровою точністю.

У праці Константіні М. та інших [55] удосконалено способи опрацювання радіолокаційних інтерферометричних даних, а також висвітлено шляхи послаблення впливу систематичних похибок.

**Геотехнічні методи** використовуються для оцінки механічного стану ґрунтів та інженерних споруд. До них належать спостереження за осіданнями фундаментів, деформаціями споруд, вимірювання тиску в ґрунтовому середовищі, а також моніторинг тріщиноутворень і нахилів у конструкціях. Завдяки високій локальній точності ці методи часто застосовуються при будівництві, експлуатації та оцінці стабільності інфраструктурних об'єктів.

У працях Заяць О.С., та інших [5] та Петрова С.Л. [59] представлено методику виявлення обвальних процесів на основі результатів геометричного нівелювання та нахиломірних вимірювань за допомогою інклінометрів. На основі отриманих даних можливо здійснювати прогнозування потенційних руйнувань об'єктів інфраструктури, що значно підвищує ефективність заходів із запобігання надзвичайним ситуаціям.

Одним із головних напрямів застосування радіолокаційної інтерферометрії є моніторинг зсувних процесів. Зокрема, в гірських, передгірських і прибережних регіонах вона дозволяє виявляти як активні зсуви, так і повільні

деформації ґрунту, які можуть передувати масштабним зрушенням. Це дає змогу завчасно вжити заходів безпеки, евакуювати населення або обмежити забудову небезпечних територій.

Інтерферометричні методи також ефективно застосовуються для спостереження за осіданням ґрунтів у містах і промислових районах. Причинами таких деформацій можуть бути інтенсивне будівництво, видобуток корисних копалин, спорудження метро, дренаж ґрунтових вод, розробка карстових порід тощо. Супутникові дані допомагають виявляти повільні процеси просідання, які не фіксуються традиційними методами, але можуть становити небезпеку для будівель і інфраструктури.

Ще одним напрямом застосування є моніторинг сейсмічної активності. Інтерферометрія дозволяє фіксувати деформації земної поверхні, пов'язані із тектонічними процесами — як до, так і після землетрусів. Це важливо для аналізу розломів, виявлення накопичення напруження в земній корі та прогнозування сейсмічної небезпеки.

У районах вулканічної активності супутникова інтерферометрія дозволяє виявляти підняття або опускання земної поверхні, що пов'язані з переміщенням магми в підземних камерах. Такі спостереження є ключовими для раннього попередження про можливе виверження та забезпечення безпеки місцевого населення.

**Геологічні методи** мають на меті вивчення геоструктурних особливостей території, складу й будови гірських порід, виявлення тектонічних розломів і зон потенційної нестабільності. Це може включати бурові роботи, польове картування, аналіз ґрунтових зразків і гідрогеологічні обстеження. Такі дослідження дозволяють виявити передумови можливих деформацій і забезпечити наукову основу для прогнозування їх розвитку.

Всі методи мають свої переваги, наприклад, геодезичні методи дозволяють отримувати високоточні дані про зміщення земної поверхні та конструкцій. Вони ідеальні для довгострокового моніторингу та виявлення як поступових, так і раптових деформацій. Завдяки сучасним технологіям, таким як супутникова

навігація чи лазерне сканування, можливо відстежувати найменші зміни з міліметровою точністю.

Геотехнічні методи фокусуються на вивченні фізико-механічного стану ґрунтів і технічного стану об'єктів. Вони забезпечують постійний контроль стабільності схилів, насипів і фундаментів, що особливо цінно для споруд, розташованих у зонах підвищеного ризику. Ці методи часто працюють із можливістю відстеження даних у режимі реального часу, що забезпечує швидке реагування на небезпечні зміни.

Геологічні методи поглиблюють розуміння структури підземного середовища. Вони допомагають виявити зони напруження, тріщини, активні розломи, а також класифікувати типи порід. Це дає змогу більш точно оцінити потенційні ризики та ухвалювати обґрунтовані рішення щодо забудови чи зміцнення територій.

Геофізичні методи, у свою чергу, є незамінними для виявлення прихованих процесів, які ще не мають зовнішніх ознак, проте можуть свідчити про формування небезпечних умов. Вони забезпечують глибокий аналіз фізичних характеристик геологічного середовища й допомагають будувати більш точні прогнози розвитку деформаційних процесів.

### **Висновки до розділу 1:**

Цей розділ формує ґрунтовну теоретичну базу для розуміння потреби в моніторингу деформацій земної поверхні у Закарпатті. Аналіз літературних джерел підтвердив актуальність застосування радіолокаційної інтерферометрії (InSAR) і GNSS-технологій для виявлення зсувів та інших небезпечних процесів.

З огляду на складні геологічні умови, високу сейсмічну активність та наявність критичної інфраструктури, проведення моніторингу є стратегічно необхідним. Сучасні методи — від геодезичних і геофізичних до геотехнічних — дозволяють фіксувати деформації з високою точністю і прогнозувати ризики.

Отже, комплексне застосування різних технологій відкриває нові можливості для безпечного планування територій і ефективного реагування на геодинамічні загрози.

## **РОЗДІЛ 2. Характеристика об'єкту спостережень**

### *2.1. Інженерно-геологічна будова території дослідження*

Тячівський район розташований у південно-східній частині Закарпатської області, в межах Східних Карпат. Геологічна будова району є складною та різноманітною, що зумовлено його положенням у межах Карпатської складчастої області та Передкарпатського прогину. [34] Основу геологічного розрізу складають флішові породи палеогенового віку — пісковики, алевроліти, аргіліти, які утворилися в умовах глибоководного морського осадження. У долинних частинах поширені неогенові та четвертинні відклади, представлені глинами, суглинками, пісками, гравієм, що мають алювіальне та делювіальне походження.

У межах досліджуваної території простежуються численні тектонічні порушення, що сприяють активізації сучасних геодинамічних процесів, зокрема зсувів, осідань та ерозійної діяльності. Особливістю району є наявність рухомих блоків земної кори, що створюють передумови для розвитку небезпечних інженерно-геологічних процесів.

Інженерно-геологічне районування Закарпатської області базується на структурно-тектонічним особливостям і включає дві зони: Карпатську зону (Ж) та Закарпатську зону (З). (рис.2.1.1)

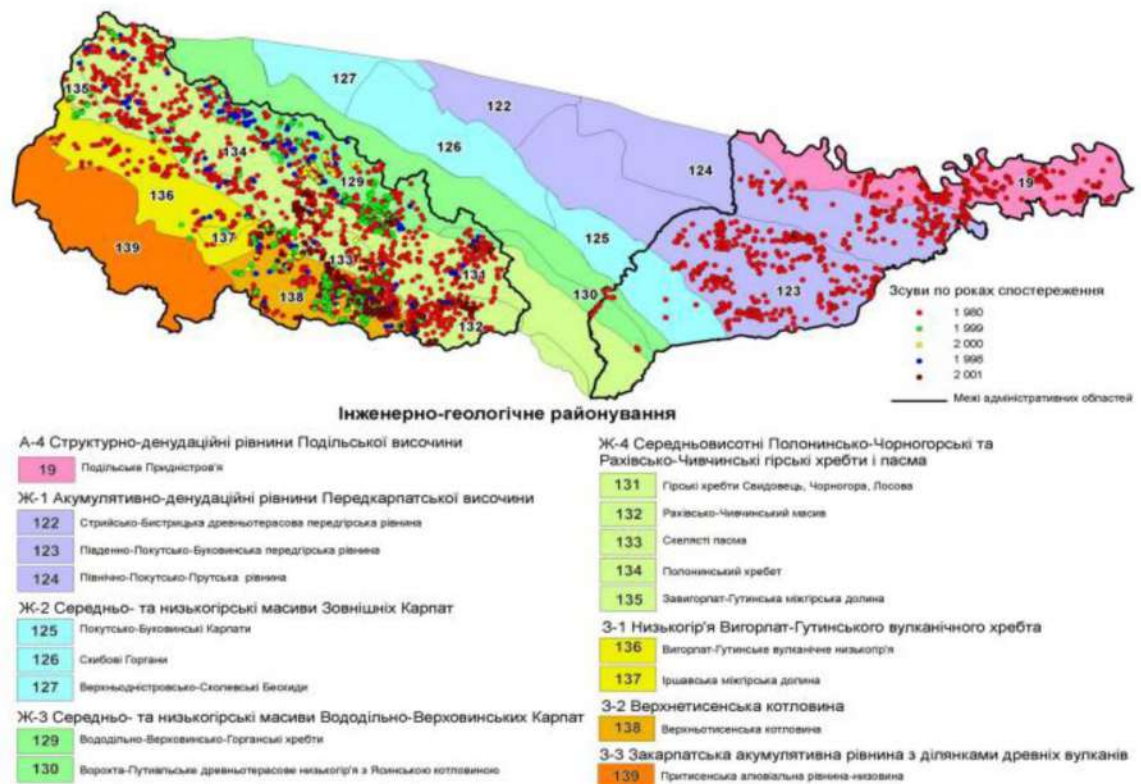


Рис. 2.1.1. Схема інженерно-геологічного районування Закарпатської та Чернівецької областей [21]

Карпатська зона (Ж) за геологічними умовами розвитку ЕГП характеризується повздовжньо-смугастою зональністю. У межах Карпатської зони інженерно-геологічні умови варіюються залежно від морфоструктур. Умовно виділяють дві області:

1. Ж-3. Складчасті середньо- та низькогірні масиви Вододільно-Верховинських Карпат

Вони характеризуються складчасто-бриловою будовою, наявністю товщ пісковиків, аргілітів та сланців, які часто зазнають вивітрювання та втрати міцності при зволоженні. Тут поширені зсувні процеси, обвали, осипи та ерозійна діяльність на схилах. Ця область ділиться на два райони:

- 129 – Вододільно-Верховинсько-Горганські хребти
- 130 – Ворохта-Путинське древньотерасове низкогір'я з Ясинською котловиною

2. Ж-4. Середньовисотні Полонинсько-Чорногірські та Рахівсько-Чивчинські хребти

Мають більш стійкі до зовнішніх впливів кристалічні та метаморфічні

породи, однак на схилах із недостатньою рослинністю активно розвиваються денудаційні процеси, зсуви, лавини та селеві потоки. Тут спостерігається підвищена сейсмічність і складні умови для забудови. Ця область ділиться на п'ять районів:

- 131 – Гірські хребти Свидовець, Чорногора, Лосова
- 132 – Рахівсько-Чивчинський масив
- 133 - Скелясті пасма
- 134 - Полонинський хребет
- 135 – Завигорлат-Гутинська міжгірська долина

Закарпатська зона (3) — це частина Закарпатської западини, сформована неогеновою тектонікою та заповнена осадовими й вулканогенними породами. Ця зона менш сейсмічно активна, однак характеризується значною неоднорідністю ґрунтів, високим рівнем ґрунтових вод і схильністю до підтоплень, що також створює складні умови для забудови. У межах цієї зони виділяють три основні морфоструктури— області з різними інженерно-геологічними умовами.

#### *1. 3-1. Низькогір'я Вигорлат-Гутинського вулканічного хребта*

Ця область охоплює Вигорлат-Гутинське вулканічне пасмо. Гірська будова складена здебільшого вулканічними породами: андезитами, базальтами, андезитобазальтами та їх туфами. Поверхня охоплена лавовими плато та згаслими вулканами. Інженерно-геологічно ця підзона характеризується відносно високою міцністю корінних порід, проте в зонах вивітрювання та на схилах виникають ерозійні, осипні та селеві процеси. Ця область поділяється на два райони:

- 136 – Вигорлат-Гутинське вулканічне низькогір'я
- 137 – Іршавська міжгірська долина

#### *2. 3-2: Верхньотисенська котловина*

Це міжгірська правильно тектонічно понижена улоговина, розташована між Вигорлат-Гутинським хребтом і Полонинським масивом. Інженерні особливості цієї підзони включають значні товщі глинистих та галькових відкладів, високий рівень ґрунтових вод, ризики суфозії й просідання ґрунтів, особливо в місцях з

порушенням дренажу. В цій області лише один район - Верхньотисенська (Солотвинська) котловина

3. 3-3: *Закарпатська акумулятивна рівнина з ділянками вулканічних поладів*  
Ця область — низовинна Закарпатська западина з абсолютними висотами приблизно 100–120 м над рівнем моря. Інженерно-геологічні ризики: підтоплення, слабка несуча здатність ґрунтів, осідання, ерозія та карстоутворення поблизу соляних куполів. Тут фігурує лише один район – Притисенська алювіальна рівнина-низовина.

В межах інженерно-геологічного районування області територія Тячівського району відноситься до двох зон: Карпатської зони, а саме області Ж-4 та Закарпатської зони, а саме - 3-2. Основна частина району, що включає передгір'я та гірські масиви (Свидовець, масиви Полонинського хребта), належить до Ж-4 – середньовисотних Полонинсько-Чорногірських та Рахівсько-Чивчинських хребтів, які характеризуються складними тектонічними структурами, значною розчленованістю рельєфу, наявністю стійких кристалічних та метаморфічних порід, але з активними зсувними й денудаційними процесами на схилах. Водночас південна частина Тячівського району, зокрема території поблизу річки Тиса та селища Солотвино, належить до 3-2 – Верхньотисенської (Солотвинської) котловини, яка є тектонічною міжгірською улоговиною в межах Закарпатської западини. Район 138 області 3-2 вирізняється потужними відкладами глини, галечників, високим рівнем ґрунтових вод і ризиками суфозії, просідання та підтоплення, особливо в районах із порушенням дренажем.

## *2.2. Гідрогеологічні умови формування зсувів на території Закарпаття*

Розвиток зсувних процесів залежить від гідрогеологічних природних умов - рівнем і хімічним складом підземних вод, їхнім живленням та дренажем, які взаємодіють з геологічними, геоморфологічними, метеорологічними (температура, опади тощо), сейсмічними та неотектонічними (землетруси) природними умовами. Їх активізація може бути спровокована техногенною діяльністю (вирубка лісів, зрошення земель, порушення рівноважного профілю

схилів при розташуванні інженерних об'єктів на схилах чи поблизу них). [29,46,51]

Гідрогеологічна структура Закарпатської області представлена двома основними басейнами: Карпатської складчастої зони та Закарпатським внутрішнім (Передкарпатською западиною).

Карпатський гідрогеологічний басейн охоплює гірську частину Закарпатської області — Українські Карпати. Геологічно регіон складений переважно флішовими породами: пісковиками, алевролітами та сланцями, які мають тріщинну структуру. Це зумовлює формування тріщинно-порових водоносних горизонтів, де підземна вода залягає у тріщинах і порожнинах гірських порід.

Кліматичні умови регіону характеризуються високою кількістю атмосферних опадів, складним гірським рельєфом і крутими схилами, що спричиняє інтенсивний поверхневий стік та активний водообмін. Однак складна геологічна будова ускладнює умови формування підземних вод.

Підземні води Карпатського басейну вирізняються низькою мінералізацією, високою якістю та чистотою, що робить їх особливо придатними для питного водопостачання. Водночас тут відсутні класичні водоносні горизонти з рівними горизонтальними площинами. Вода зосереджена переважно в тектонічно-тріщинуватих зонах, які мають локальний характер.

Мінералізовані та термальні води приурочені до усічених структурних вузлів, що ще більше підкреслює складність та різноманітність гідрогеологічної ситуації в регіоні.

Закарпатський внутрішній басейн, або Передкарпатська западина, розташований у південно-західній частині області та охоплює низинну територію Закарпаття. Його тектонічна природа суттєво відрізняється від гірських регіонів — басейн сформувався внаслідок опускання земної кори та нагромадження значної товщі осадових порід неогенового віку.

Геологічна структура представлена переважно горизонтальним або слабко нахиленим заляганням порід, що створює сприятливі умови для формування

пластових водоносних горизонтів. Тут поширені глини, піски, вапняки, а також вулканогенні утворення, зокрема туфи, андезити та базальти.

В межах басейну переважає зона повільного водообміну, що зумовлює вищу мінералізацію підземних вод. Найбільш водоносними є четвертинні алювіальні та озерно-алювіальні відклади, які формують стабільні водоносні пласти як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Крім того, значна кількість вод зосереджена у більш давніх корінних породах.

Отже, через складну геологічну будову, значну кількість опадів та гірський рельєф регіон має природну схильність до розвитку екзогенних геодинамічних процесів, зокрема зсувів. Основним гідрогеологічним чинником є підвищення вологості порід внаслідок інфільтрації атмосферних опадів, що призводить до зменшення міцності гірських порід та втрати їх стійкості на схилах. Також одним із важливих чинників є кліматичні умови. Закарпаття належить до найбільш зволжених регіонів України. Великі обсяги опадів, особливо в осінньо-весняний період, призводять до стрімкого підйому рівня ґрунтових вод. Надмірне зволоження, зокрема після інтенсивних дощів або танення снігу, спричиняє перенасичення порід вологою, підвищення порового тиску й, відповідно, зниження зчеплення частинок. Це стає поштовхом для розвитку або активізації зсувів навіть на схилах з незначними ухилами.

### *2.3. Ґрунтовий покрив території дослідження*

Закарпатська область вирізняється значною різноманітністю ґрунтового покриву, що зумовлено поєднанням гірського, передгірського та рівнинного рельєфу, помірно теплим і вологим кліматом, а також складною геологічною структурою. Усі ці чинники сприяли формуванню однієї з найрізноманітніших ґрунтових систем в Україні. В межах регіону зустрічаються ґрунти різних типів — від різновидів дерново-підзолистих, поширених у низинних районах, до кислих бурих лісових ґрунтів, які формуються на високогір'ї.

Загалом у межах Закарпатської області виділяються такі основні типи ґрунтів:

1. *Буроземи* - поширені на схилах гір в межах 1100–1500 м, тобто в зоні

лісів. Верхній шар — лісова підстилка (2–8 см), далі — неглибокий гумусовий горизонт (12–25 см) із сіро-бурым кольором через вміст гідроокислів заліза й алюмінію. Структура — зернисто-дрібногоріхувата. В глибших шарах більше уламків порід, а вміст гумусу зменшується від 10–15% до 3–5%. Буроземи характеризуються високою кислотністю, тому для підвищення родючості необхідне вапнування та внесення добрив.

2. *Дерново-підзолисті* - утворюються на височинах під лісовим покривом. Відзначаються слабо виражену структуру, кислі, з оглеєнням у нижніх горизонтах. Гумусу мало — лише 1,8–2,8%. Бідні на доступні поживні речовини, при перезволоженні розмокають, а при пересиханні — ущільнюються. Це ускладнює обробіток, тому рекомендується вапнування, внесення органіки, глибоке розпушування та дренаж.

3. *Сірі лісові* - трапляються переважно в середньогірній зоні, де вони формуються на лесовидних суглинках і карбонатних моренах. Тут вони мають слабокислу реакцію, а в нижніх горизонтах — нейтральну або лужну. У профілі чітко виділяються гумусовий, елювіальний та ілювіальний горизонти, з характерними гумусовими плівками на структурних окремоствах. Гумусовий шар у цих ґрунтах слабо виражений і містить приблизно 3 % гумусу, що зумовлює їхню помірну природну родючість. Закарпатські сірі лісові ґрунти часто схильні до ерозії, тому потребують меліоративних заходів — вапнування, внесення органіки, збереження лісового покриву.

4. *Алювіальні (заплавні)* - широко поширені в долинах річок Тиси, Латориці, Ужа, Боржави та їхніх приток. Вони формуються внаслідок періодичного затоплення паводковими водами, які приносять і відкладають на поверхні алювій — дрібнозернистий мінеральний матеріал. У результаті такі ґрунти мають шарувату структуру, що відображає послідовне осадження наносів протягом багатьох років. Ці ґрунти вирізняються високою родючістю завдяки значному вмісту гумусу у верхньому горизонті, добрій водопроникності та нейтральній або слабокислій реакції. Вони активно використовуються для вирощування овочевих, зернових культур, а також для лук і пасовищ.

потребуючи меліоративного догляду і захисту від ерозії.

5. *Чорноземи* - трапляються переважно в рівнинній частині, зокрема на низовинах та в долинах річок. Тут вони сформувалися на алювіальних відкладах, часто мають легкий механічний склад і добре дренавані. Закарпатські чорноземи мають дещо нижчий вміст гумусу порівняно з центральними регіонами, але завдяки сприятливому клімату та багатій рослинності залишаються продуктивними. Особливістю чорноземів Закарпаття є їх поєднання з дерновими та лучними ґрунтами, що утворює складні мікрокомплекси. У місцях з неглибоким заляганням ґрунтових вод можливе оглеєння нижніх горизонтів, що потребує меліоративних заходів. Для підтримання родючості рекомендується внесення органічних добрив, сидератів, а також дотримання сівозміни.

6. *Лучно-болотні, болотні* - залягають у пониженнях з близьким рівнем ґрунтових вод (40–50 см). У верхньому шарі (10–15 см) утворюється сизо-сірий гумусовий горизонт, що при висиханні тріскається. Нижче — в'язкий, вологий перехідний шар (20–25 см) із рудими плямами. Ґрунт сильно кислий (рН 4,0–4,5), містить 8–12 % гумусу, який швидко зменшується з глибиною. Після осушення придатний для пасовищ, а після меліорації — для ріллі. [33]

Ґрунтовий покрив Тячівського району відображає висотну поясність Закарпаття. Район охоплює як передгірські, так і гірські території, тому тут зустрічаються буроземи, дерново-буроземні, гірсько-лісові щебенюваті та алювіальні ґрунти. У підніжжях гір і на невисоких схилах переважають буроземи та дерново-буроземні ґрунти середньої родючості, що утворились під широколистяними й мішаними лісами. Вони мають темно-бурий колір, середню кислотність і середню родючість. У передгір'ях і на низьких схилах переважають буроземи та дерново-буроземні ґрунти, сформовані під листяними лісами. На нижчих терасах річкових долин, зокрема вздовж річки Тиси, поширені алювіально-лучні ґрунти, сформовані в умовах періодичного зволоження та нашарування річкових наносів. Вони вирізняються високою природною родючістю, але потребують ефективної меліорації. У гірських частинах Тячівського району переважають щебенюваті гірсько-лісові ґрунти, які мають

обмежену товщину профілю, низький вміст гумусу та слабку водоутримувальну здатність. Вони утворені на крутосхилах, де активні процеси ерозії й вивітрювання, тому малопридатні для землеробства, але можуть використовуватись під ліси або пасовища.

Тячівський район Закарпатської області є одним із найбільш зсувонебезпечних регіонів області, що зумовлено як природними умовами (рельєф, клімат, геологічна будова), так і особливостями ґрунтового покриву. Розташований у передгірній та гірській частині Східних Карпат, район охоплює складнорозчленований рельєф, з великою кількістю схилів різної крутизни, які створюють природні передумови для розвитку зсувних процесів. Особливу роль у цьому відіграють ґрунти, що мають схильність до зволоження та втрати стійкості.

Зсуви найчастіше спостерігаються у межах буроземів і дерново-буроземних ґрунтів, які залягають на схилах середньої крутизни, особливо в районах з вирубаними лісами або забудованими ділянками. Ці ґрунти формуються на глинистих і сланцевих породах, мають середню глибину профілю, високу вологомісткість і при надмірному зволоженні легко втрачають свою структуру.

Буроземи у гірській частині району часто насичуються вологою в періоди рясних дощів або танення снігу. Через наявність глинистої підоснови, яка затримує інфільтрацію води, утворюються водоносні лінзи — ділянки локального накопичення води, які створюють зони ковзання. Це спричиняє зміщення верхніх шарів ґрунту вниз по схилу. У випадках, коли природне водовідведення порушене або на схилі розташовані будівлі, дороги чи тераси — ризик зсувів значно зростає.

Особливо небезпечними є лучно-болотні та алювіальні ґрунти, що поширені на нижчих терасах і в долинах річок, зокрема річки Тиси та її приток. Ці ґрунти сформовані на водонасичених глинах та мулах, мають низьку проникність, схильні до заболочення та характеризуються високою пластичністю. Під час підняття рівня ґрунтових вод або у періоди надмірного зволоження вони можуть втратити несучу здатність, провокуючи повільні, але масштабні зсувні процеси.

Такі зсуви нерідко вражають сільськогосподарські угіддя, населені пункти й комунікації.

У передгірській зоні району, де активно використовуються землі для садівництва, пасовищ або приватної забудови, наявність дерново-буроземних ґрунтів у поєднанні з недотриманням природоохоронних норм (знищення лісу, надмірне ущільнення ґрунту, недбале прокладання дренажу) створює системну небезпеку розвитку зсувів. Часто зсуви активізуються саме на межі сільських поселень, де на схилах будуються господарські об'єкти без врахування геоморфологічних умов.

У гірських районах Тячівщини — наприклад, у межах Свидовецького масиву — зустрічаються гірсько-лісові щебенюваті ґрунти, які, хоча й мають кращу водопроникність, через тонкий ґрунтовий шар та схили великої крутизни також не гарантують стабільності. Тут небезпека зсувів зростає в умовах інтенсивного водонасичення, ерозійних процесів та господарського втручання в природні схили.

### **Висновки до розділу 2:**

Тячівський район Закарпатської області характеризується складною інженерно-геологічною будовою, гірським і передгірським рельєфом, активною неотектонікою та розвиненою тектонічною тріщинуватістю порід. Усі ці фактори сприяють розвитку небезпечних геодинамічних процесів, зокрема зсувів. Гідрогеологічні умови району відзначаються високою вологонасиченістю порід, особливо під час інтенсивних опадів або танення снігу, що знижує їхню стійкість. У районах із високим рівнем ґрунтових вод можливе просідання й підтоплення.

Ґрунтовий покрив району також схильний до зсувів: особливо небезпечними є буроземи, дерново-буроземні та лучно-болотні ґрунти, які при зволоженні легко втрачають структуру.

### **РОЗДІЛ 3. Експериментальні дослідження дистанційного моніторингу зсувних процесів методами інтерферометрії**

#### *3.1. Поняття, чинники виникнення та основні види екзогенних процесів на території Закарпаття*

Територія Закарпатської області є одним із найбільш геодинамічно активних регіонів України, де поєднання гірського рельєфу, складної геологічної будови та кліматичних особливостей створює сприятливі умови для розвитку широкого спектра екзогенних процесів. Близько 70% території Закарпаття займає гірська зона Українських Карпат, а решту - рівнинна територія Закарпатської низовини.

*Екзогенні геологічні процеси (ЕГП)* — це сукупність природних явищ, що відбуваються на поверхні Землі або в її приповерхневих шарах під впливом зовнішніх чинників: клімату, води, вітру, живих організмів тощо. Ці процеси впливають на формування рельєфу, впливають на стан ґрунтів, рослинності, а також можуть становити загрозу для житлових об'єктів, інфраструктури й людського життя. На Закарпатті спостерігаються зсуви, бічна ерозія, підтоплення, карстові процеси та селенебезпечні водотоки. Але серед цих екзогенних геологічних явищ найбільше поширення мають зсуви. В Тячівському, Хустському, Рахівському та Міжгірському районах ЕГП спостерігають найчастіше. (Додаток А)

Як різновид екзогенних процесів, зсуви характеризуються переміщенням ґрунтових або гірських мас униз схилу під дією гравітаційних сил. Зсувні процеси є вкрай небезпечними, адже найчастіше вони виникають непередбачувано та швидко, особливо у межах населених територій, де зосереджене населення й матеріальні блага. (рис.3.1.1)



Рис. 3.1.1 Зсувні процеси

Понад двадцять геологічних процесів різного походження — природного, природно-техногенного та техногенного — істотно впливають на розвиток надзвичайних ситуацій. Супутніми чинниками є густота річкової мережі ( $0,8\text{--}1,6\text{ км/км}^2$ ), на якій часто виникають паводки та спостерігається бічна ерозія, а також вологий клімат. Визначальним руйнівним фактором цих процесів виступають ґрунтові води. Зокрема, на Закарпатській низовині з кінця 1960-х до початку 1990-х років рівень підземних вод знизився приблизно на 2 метри. Починаючи з середини 1980-х, зафіксовано тенденцію до підвищення середньорічної температури повітря та зростання кількості атмосферних опадів, що частково пов'язано зі зміною клімату.

Причини виникнення та розвитку зсувів умовно класифікують у дві основні групи: *фактори-умови*, що визначають виникнення та *фактори-процеси*, що впливають на розвиток. Такий поділ дає змогу чітко розмежувати причини, які створюють передумови для зсувів, та чинники, що безпосередньо змінюють стан схилів.

### 1. Фактори-умови (виникнення)

Це чинники, які формують початковий стан схилу та визначають його стійкість у природних умовах.

- *Геолого-літологічні* — характеристики складу гірських порід, їхня шаруватість, наявність прошарків, що легко розмокають або втрачають міцність.

- *Геолого-морфологічні* — будова рельєфу, крутизна та напрям схилів, форма долин, тектонічні розломи та інші структурні елементи.
- *Кліматичні* — середньорічна температура, кількість і режим випадання опадів, сезонні коливання вологості, що впливають на насичення ґрунту водою.
- *Гідрогеологічні* — рівень і динаміка ґрунтових вод, швидкість їх переміщення, наявність підпору водоносних горизонтів.

Ці умови не обов'язково призводять до зсувів самі по собі, але визначають схильність території до їхнього виникнення.

## **2. Фактори-процеси (розвитку)**

Ця група охоплює чинники, які безпосередньо впливають на зміну стану схилів та можуть стати причиною активізації зсувів.

### *2.1. Діють незворотно з накопиченим ефектом*

- *Сучасні тектонічні рухи* — вертикальні або горизонтальні переміщення земної кори, які змінюють напружений стан порід і знижують їхню міцність.
- *Зміна механічних властивостей* — поступове ослаблення структурних зв'язків у ґрунтах та гірських породах внаслідок природних або антропогенних впливів.

### *2.2. Діють зворотно, періодично*

- *Абразія* — підмивання підшви схилу хвилями чи течіями води, що поступово зменшує опору схилу.
- *Ерозія* — вимивання поверхневих шарів ґрунту та порід під дією потоків води.
- *Метеоумови* — надмірні опади, замерзання та відтавання ґрунту, температурні коливання, які впливають на вологість та структуру порід.
- *Землетруси* — раптові коливання земної поверхні, що можуть миттєво знизити стійкість схилів.
- *Техногенні дії* — будівельні та гірничі роботи, вібрації від транспорту чи промислових механізмів, що провокують зміщення ґрунтових мас.

На території Закарпатської області станом на 01.01.2022 року на території Закарпатської області зафіксовано і закартовано 3305 зсувів, які внесено до кадастру загальною площею 385,886677 км<sup>2</sup> (385,802794+ 0,083883 км<sup>2</sup>). Це зумовлено великою кількістю атмосферних опадів, які спостерігалися в Закарпатській області, особливо в Хустському, Рахівському, Тячівському та Ужгородському районах. [2]

У Тячівському районі 5 січня 2022 року внаслідок надмірного зволоження ґрунту сталися зсуви, що зачепили житлові будинки на вулиці Марії Терезії в селі Німецька Мокра та на вулиці Шевченка в селі Тарасівка. Пізніше, 17 грудня того ж року, неподалік села Підплеша, що входить до складу Нересницької територіальної громади, зафіксовано зсув гірських порід на схилі гори, спричинений тривалими опадами. [13]

*Бічна ерозія* - це процес, за якого річкові потоки поступово підмивають схили долин, спричиняючи їх розширення, формування звивистих ділянок (меандрів) та зміщення русла. У періоди інтенсивного водного живлення, зокрема під час паводків, активізується процес бокової ерозії, що спричиняє поступове розширення долини. Найбільш інтенсивне руйнування відбувається на увігнутих ділянках річкових вигинів, де швидкість течії досягає максимальних значень. У цих зонах спостерігається активне підмивання берегової лінії. Натомість на опуклих ділянках вигину, де течія уповільнюється, відбувається акумуляція наносів (алювію), що сприяє формуванню прируслових мілин.

Такий тип ерозії найактивніше проявляється в середній і нижній течії річок, де швидкість води дозволяє розмивати береги, але не має достатньої сили для глибокого врзання в дно. У Закарпатській області, де гідрографічна мережа є надзвичайно розгалуженою, а рельєф — складним і гірським, бокова ерозія суттєво впливає на розвиток сучасного ландшафту. Особливо це помітно в долинах річок Тиса, Тересви, Латориця та Ріка.

Упродовж 2020 року в межах басейнів річок Чорна Тиса та Ріка, а також частково в басейні Тересви, було зафіксовано активізацію процесів бокової

ерозії. Загалом ідентифіковано 20 ерозійно небезпечних ділянок, серед яких 12 мають ознаки новоутворення, а решта 8 були виявлені та закартовані раніше. У цей період бокова ерозія спричинила руйнування берегозахисних споруд і пошкодження авто- та комунальних доріг на ділянках завдовжки до 250 м у селах Лопушне, Свобода, Синевирська Поляна (Хустський район), Ясіня, Білин, Кваси та Лазещина (Рахівський район). У Тячівському районі вплив на господарську інфраструктуру не зафіксовано. Станом на 1 січня 2021 року на території Закарпатської області зареєстровано 531 ділянку, де проявляється бокова ерозія водотоків, із загальною довжиною 163,64 км, з яких 159,94 км — раніше обліковані, а 3,7 км — новоутворені у 2020 році. [13]

*Підтоплення* — це тимчасове затоплення територій, спричинене надмірним накопиченням води внаслідок інтенсивних опадів, підйому рівня річок, танення снігу або порушення водовідведення. Найбільш вразливими є низинні ділянки населених пунктів, де русла малих річок і потічків часто захаращені, а дренажні системи — недостатньо ефективні. Під час сильних злив вода швидко накопичується, що призводить до затоплення дворів, сільськогосподарських угідь, доріг і навіть житлових будинків. У гірських районах, таких як Рахівський, Міжгірський та Хустський, підтоплення нерідко супроводжуються селевими потоками, які становлять особливу загрозу для інфраструктури та безпеки населення.

*Селеві потоки (селі)* — це складне гідрогеологічне явище, що виникає переважно в гірських районах і характеризується раптовим переміщенням водно-кам'яної маси з великою концентрацією уламків гірських порід, ґрунту, деревини та інших твердих матеріалів. Ці явища є складними для прогнозування, оскільки виникають раптово, часто вночі або під час тривалих злив. Їхня швидкість та сила не залишають часу на евакуацію, тому вони становлять реальну загрозу для мешканців гірських територій. У зимовий період селі можуть поєднуватися зі сніговими лавинами, що ще більше ускладнює ситуацію.

Ключовою характеристикою селевого потоку є співвідношення між твердими компонентами та рідкою фазою, що визначає його фізичні властивості

та динаміку руху. Залежно від цього співвідношення, селі класифікують на кілька типів:

- *водокам'яні потоки* - містять значну кількість великогабаритного каміння у водному середовищі;
- *грязекам'яні потоки* - складаються з води, гравію, гальки та дрібного каміння, що утворює густу, рухому масу;
- *грязьові потоки* - характеризуються переважанням води з домішками дрібнозернистого матеріалу — землі та піску, що створює текучу суспензію.

У 2020 році на території Закарпатської області зафіксовано сходження грязекам'яних селевих потоків у межах басейнів річок Ріка та Тересва, що охоплюють Хустський і Тячівський райони. Зокрема, в басейні річки Ріка селеві явища були відзначені поблизу населеного пункту Підчумаль та в селі Лопушне Хустського району. Їх виникнення пов'язане з інтенсивними опадами, що спостерігалися 28 червня 2020 року. У першому випадку селевий потік заблокував частину автомобільної дороги Хуст–Міжгір'я на протяжності близько 30 метрів, а в другому — завдав шкоди приватним господарствам, зокрема присадибним ділянкам чотирьох домоволодінь. Станом на 1 січня 2021 року на території Закарпатської області було зареєстровано 278 водотоків, що класифікуються як потенційно небезпечні у контексті селевих процесів. Загальна площа їхніх водозбірних басейнів становить 1828 км<sup>2</sup>, з яких 1822 км<sup>2</sup> — раніше обліковані, а 6 км<sup>2</sup> — додані в результаті оновлення даних.

Також один із найбільш показових випадків стався в січні 2022 року, коли два потужні селеві потоки зійшли на території Рахівського, Тячівського та Хустського районів. Було підтоплено 7 підвалів, 6 житлових будинків і 21 домогосподарство. Крім того, пошкоджено ділянки доріг міжнародного та національного значення — автошлях Р21 у селі Нижній Бистрий та Н09 у місті Рахів.

Станом на 2021 рік на території Закарпатської області було зареєстровано 276 водотоків, класифікованих як селенебезпечні, із загальною площею

водозбірних басейнів 1822 км<sup>2</sup>.

*Карстові процеси* належать до категорії інженерно-геологічних явищ, що виникають у результаті хімічної взаємодії води з гірськими породами, які легко розчиняються — зокрема, вапняком, доломітом, гіпсом і кам'яною сіллю.

Основною передумовою виникнення карстових процесів є присутність порід, що піддаються вилуговуванню або розчиненню. Відповідно до цього критерію виділяють кілька типів карсту:

- *сульфатний*, який формується в породах сульфатного складу (гіпс, ангідрит, мірабіліт, барит та інші);
- *карбонатний*, що розвивається у вапняках, доломітах та інших породах, насичених мінералами на кшталт сидериту чи магнезиту;
- *сольовий*, характерний для масивів кам'яної і калійної солей.

Фактори, які впливають на інтенсивний розвиток карстових явищ, включають: наявність у воді вільного вуглекислого газу, який відіграє ключову роль у розчиненні карбонатних порід; водопроникність гірських порід, яка зумовлена насамперед їхньою тріщинуватістю та пористістю; значна кількість атмосферних опадів і добре налагоджена циркуляція води, яка дозволяє постійно надходити новим об'ємам води до порід і виносити як розчинені мінерали, так і нерозчинні залишки. Процес розчинення часто супроводжується механічним розмиванням порід. Унаслідок тривалого впливу води на такі породи формуються специфічні форми рельєфу: карстові лійки, понори, печери, провали, підземні порожнини та озера. Особливу небезпеку становить раптова активізація карсту, яка може стати причиною просідання земної поверхні або утворення провалів, що створює загрозу для житлових об'єктів, транспортної інфраструктури та життя людей.

За інформацією Державної геологічної служби, на території України зафіксовано понад 26 тисяч карстових утворень, як поверхневих, так і підземних.[10] Особливо інтенсивно карстові процеси розвиваються в регіонах, де ведуться гірничі роботи або спостерігається значне техногенне навантаження. У таких умовах формується техногенний карст, який нерідко має катастрофічні

наслідки — зокрема, раптові провали земної поверхні, просідання ґрунту та руйнування інфраструктури.

На території України виявлено понад 26 тисяч карстових проявів, однак найінтенсивніше карстоутворення спостерігається в регіонах із активною гірничою діяльністю та значним техногенним навантаженням. Закарпатська область, зокрема Тячівський район, є одним із таких регіонів. Тут розташоване Солотвинське родовище кам'яної солі, яке геологічно приурочене до Верхньотисянської западини Закарпатського прогину. Унаслідок постседиментаційного галокінезу — процесу, за якого соляні породи під тиском теригенних товщ переходять у пластично-текучий стан і переміщуються до приповерхневих горизонтів — сформувалися численні карстові порожнини, провали та озера.

### 3.2. Загальна характеристика та класифікація зсувних процесів

Зсувом називають переміщення частини гірських порід зі схилу на нижчий рівень шляхом ковзання, при цьому зв'язок між рухомими масами та нерухомими породами переважно зберігається. Початок руху зсувних мас зумовлений порушенням стійкості схилу, а процес триває доти, доки не встановиться нова рівновага.

У процесі відокремлення зсувної маси від більш стабільної частини схилу та її переміщення вниз у верхній зоні зсуву формується уступ або крута увігнута поверхня, яка називається стінкою відриву зсувного тіла. (рис.3.2.1)

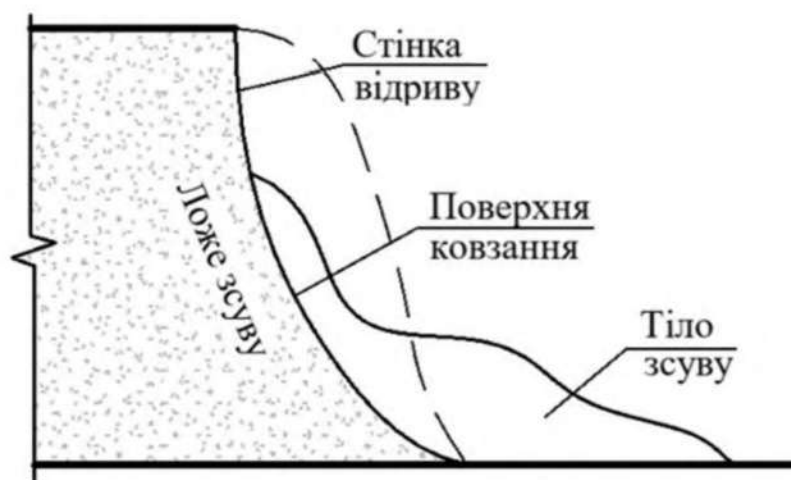


Рис. 3.2.1. Стінка відриву зсуву

Зсувні процеси відбуваються вздовж специфічної поверхні, яка виконує роль ковзання. Її геометрія може бути різноманітною — від плоскої до сферичної або ламаної, залежно від геологічних умов. У природному середовищі така поверхня, як правило, має нерівний характер, що спричиняє розділення зсувної маси на окремі блоки, які відокремлюються один від одного тріщинами та зонами сколу. Матеріал, що переміщується, прийнято називати зсувним тілом, яке зазвичай має складну просторову конфігурацію.

Розвиток зсуву відбувається через взаємодію двох основних елементів: рухомої частини — зсувного тіла, та нерухомої основи — ложа, по якому здійснюється переміщення. Така система дозволяє описати механізм зсуву як динамічний процес, що залежить від фізико-механічних властивостей порід, гідрологічного режиму та морфології схилу. [35]

На відміну від обвалів, зсуви характеризуються тим, що протягом усього переміщення зсувні маси зберігають контакт із поверхнею ковзання, тоді як при обвалах частину шляху долають у повітрі. Зазвичай процес сповзання схилів відбувається поступово і включає два основних етапи. Перший – підготовчий, під час якого у глибинних шарах фіксуються дуже повільні переміщення типу повзучості та формується потенційна поверхня ковзання; цю стадію називають фазою глибинної повзучості. Другий – катастрофічний, коли рухи стають набагато швидшими, а іноді й помітними неозброєним оком, відбуваючись по вже сформованій поверхні ковзання. [8]

Залежно від глибини, на якій залягає поверхня ковзання, зсувні процеси класифікують на кілька типів. До поверхневих належать зсуви, що формуються на глибині до 1 метра — це, як правило, опливини та спливи. Дрібні зсуви охоплюють глибини до 5 метрів, тоді як глибокими вважаються ті, що виникають на рівні до 20 метрів. Якщо ж поверхня ковзання залягає глибше 20 метрів, такі зсуви класифікують як дуже глибокі.

Типологія зсувних процесів є надзвичайно різноманітною, що зумовлено складністю природних умов, різноманіттям геологічної будови, морфології схилів та гідрологічних чинників. Через відмінності у термінології та підходах у

різних країнах універсальна класифікація досі відсутня. Це спричинило появу великої кількості класифікацій, заснованих на різних критеріях — від генетичних і морфологічних до механічних і структурних.

Серед найвідоміших класифікацій варто виділити системи, запропоновані А.П. Павловим, К.І. Богдановичем, Ф.П. Саваренським, І.В. Поповим, А.М. Дранніковим, Є.П. Ємельяновою, К. Терцагі, С. Шарпом, Д. Варнесом, Е.Б. Еккелем.

А.П. Павлов у своїй класифікації (1903) розділяє зсуви за характером розвитку зміщення на два основних типи:

- *деляпсивні (ковзаючі)* — формуються в нижній частині схилу і поступово поширюються вгору, оскільки сповзаючі породи втрачають опору, що підтримує верхні маси.
- *детрузивні (штовхаючі)* — виникають у верхній частині схилу, де відірвані маси тиснуть на нижні породи, спричиняючи їх зміщення, зминання та видавлювання.

К.І. Богданович (1911) класифікує зсуви за характером захоплення гірських порід:

- *зсуви першого порядку* — утворюються при одночасній втраті рівноваги всієї маси.
- *зсуви другого порядку* — виникають у межах вже сформованих зсувних тіл.

Ф.П. Саваренський (1934) запропонував класифікацію за структурою схилу та положенням поверхні ковзання:

- *асеквентні зсуви* — формуються в однорідних, нешаруватих породах, де поверхня ковзання має криволінійну форму, що залежить від тертя та зчеплення.
- *консеквентні зсуви* — ковзання відбувається по нахилених поверхнях, пов'язаних із внутрішньою будовою схилу (напластування, тріщини).
- *інсеквентні зсуви* — поверхня ковзання перетинає породи різного складу.

І.В. Попов (1946) розробив класифікацію зсувів за віком і фазами розвитку, що дозволяє оцінити динаміку процесу в часі. А.М. Дранніков запропонував

класифікацію за глибиною захоплення товщі, що є важливою для інженерно-геологічного аналізу.

Є.П. Ємельянова, досліджуючи морфологію схилів, виділила типи за формою в профілі, які мають значення для оцінки стійкості:

- *Прямолінійні та плоскі.*
- *Увігнуті.*
- *Випуклі.*
- *Випукло-увігнуті — верхня частина випукла, нижня — увігнута.*
- *Увігнуто-випуклі — характерні для багатьох зсувних схилів.*
- *Звивисті — мають чергування увігнутостей і випуклостей.*
- *Східчасті — утворені внаслідок зсувних процесів, залишків терас або виходів горизонтальних шарів міцних порід.*

Для оцінки ризику зсувів важливо класифікувати схили на дві групи:

✓ *наситні (акумулятивні) схили* формуються одночасно з накопиченням порід, які їх складають. Ці породи зазвичай мають нормальне або неповне ущільнення та не зазнавали значних навантажень.

✓ *врізані схили* виникають у результаті зрізання раніше сформованих порід, що перебувають під більшим тиском. Ґрунти таких схилів часто знаходяться в стані розущільнення.

О.І. Білеуш пропонує поділ зсувних процесів залежно від особливостей деформації, що при цьому виникає. Подібна система класифікації також закріплена у нормативному документі ДБН В.1.1-46:2017. Вона включає такі типи:

- **Тип I** — зсуви ковзального характеру, при яких спостерігається одна або кілька площин ковзання, а верхні маси ґрунту переміщуються як цілісні жорсткі блоки.
- **Тип II** — зсуви, що виникають унаслідок видавлювання, коли в основі залягає слабкий ґрунтовий шар або породи, чия міцність знижується при зміні водно-геологічних умов.
- **Тип III** — деформації в'язкопластичного типу, що проявляються як

переміщення насичених водою глинистих мас, які поведуться подібно до густої рідини.

- **Тип IV** - комбіновані зсуви, що мають складну динаміку: спочатку процес розвивається за сценарієм типу I або II, а після переміщення та додаткового зволоження зсувні маси набувають властивостей в'язкої субстанції. [9]

Отже, можна стверджувати, що зсувні процеси є складним геодинамічним явищем, яке проявляється в різних формах залежно від геологічної будови, морфології схилу, гідрологічних умов та механізму переміщення порід. Різноманіття класифікацій, розроблених як вітчизняними, так і зарубіжними дослідниками, свідчить про багатогранність цього явища та необхідність комплексного підходу до його вивчення. Глибоке розуміння типології зсувів є основою для ефективного прогнозування, оцінки ризиків та розробки заходів щодо стабілізації схилів, що особливо важливо в умовах активного природного та антропогенного впливу.

### *3.3. Поширення зсувних процесів в межах території Тячівського району*

Тячівський район розташований у південно-східній частині Закарпатської області та має надзвичайно різноманітний рельєф: від низинних ділянок до високогірних масивів, що створює складні природні умови та впливає на формування локальних геологічних процесів.

Виберемо найяскравіші приклади зсувів на території Тячівського району: с. Солотвино в Солотвинській селищній територіальній громаді та с. Вільхівці, яке є адміністративним центром Вільховецької сільської територіальної громади.

Аналіз проведемо використовуючи веб-переглядач GeoSES InSAR та картографічні матеріали з реферату «Інформаційний звіт з моніторингу, обліку поширення і активізації екзогенних геологічних процесів гідрогеолого - екологічної партії Закарпатського геолого – гідрогеологічного центру за 2020р.» Стан поширення і активізації екзогенних геологічних процесів на території Закарпатської області (режим, облік і прогноз). [17;47]

Одним із пріоритетних напрямів проєкту GeoSES є дослідження небезпечних геологічних процесів як природного, так і техногенного

походження з метою оцінки рівня їх загрози за допомогою сучасних методів космічної геодезії. Особливу увагу приділено прикордонному регіону, що охоплює території Угорщини, Словаччини, Румунії та України. Крім того, проєкт передбачає створення системи моніторингу геологічних ризиків і надзвичайних ситуацій, зокрема таких як зсуви ґрунту та утворення провалів.

У межах реалізації проєкту активно застосовується одна з найефективніших технологій супутникового дистанційного зондування — інтерферометрія з синтезованою апертурою (InSAR), яка дозволяє здійснювати детальне спостереження за змінами земної поверхні на великих площах. Технологія InSAR дозволяє з високою точністю фіксувати вертикальні зміщення земної поверхні, навіть у межах кількох міліметрів на рік. На карті відображені кольорові точки, що вказують на швидкість вертикальних зміщень у мм/рік: зелений колір означає стабільні ділянки, жовтий і помаранчевий — зони повільних деформацій, а червоний — активні осередки просідань чи зсувних рухів.

Найбільш інтенсивно зсувними процесами охоплений інженерно-геологічний район, що характеризується низькогірним і терасовим рельєфом Солотвинської котловини в межах Закарпаття (3-2-138). Тут було виявлено та нанесено на карту 811 зсувів, що становить близько 24,5% від загальної кількості таких явищ у регіоні. З точки зору структурно-тектонічної будови, ця територія відповідає Солотвинській западині, яка є частиною внутрішнього прогину Закарпатської області. [19]

За типом переміщення найбільш поширеними тут є зсуви-потоки, що формуються в межах покриву четвертинних елювіально-делювіальних, делювіальних та делювіально-колювіальних глин і суглинків, які містять значну кількість уламків корінних порід (до 30–40%). Зсуви ковзання, натомість, переважно приурочені до порід тересвинської світи неогенового віку, де домінують аргіліти та глини з аргілітоподібною структурою.

Цей район також вирізняється найбільшою концентрацією давніх зсувів — 641 випадок, з яких 425 (або 66,3%) активізувалися після потужної повені, що сталася у листопаді 1998 року. Крім того, саме тут зафіксовано найбільшу

кількість сучасних зсувів — 170 випадків, що становить 20,8% від загального числа по області. Серед них — один із наймасштабніших зсувів ковзання, який виник у селі Вільхівчик Тячівського району. [17]

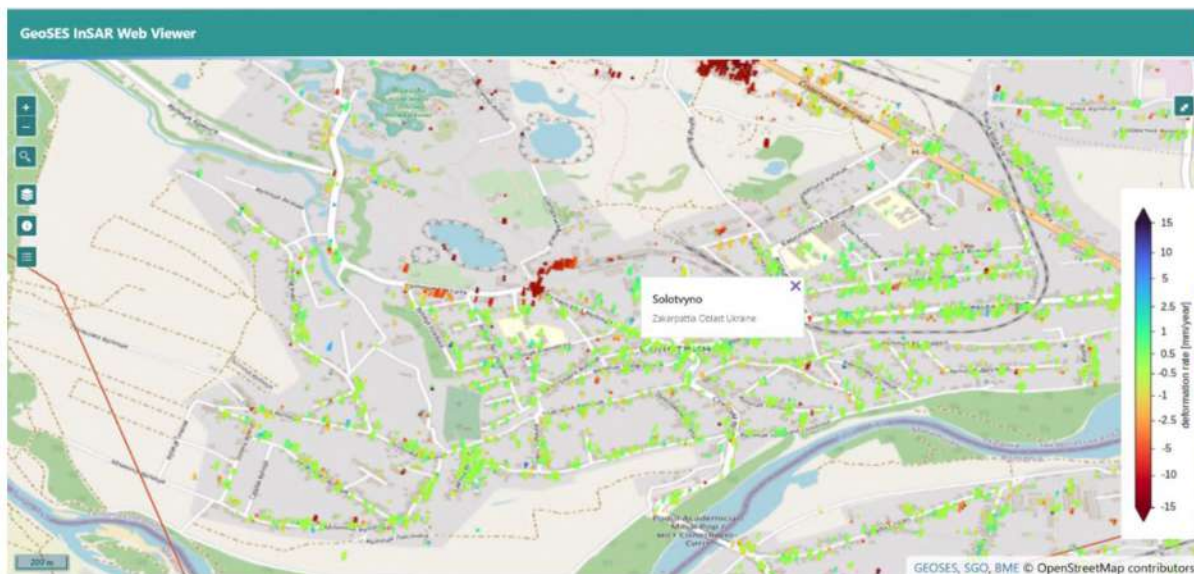


Рис.3.3.1. Зсуви на території с. Солотвино [47]

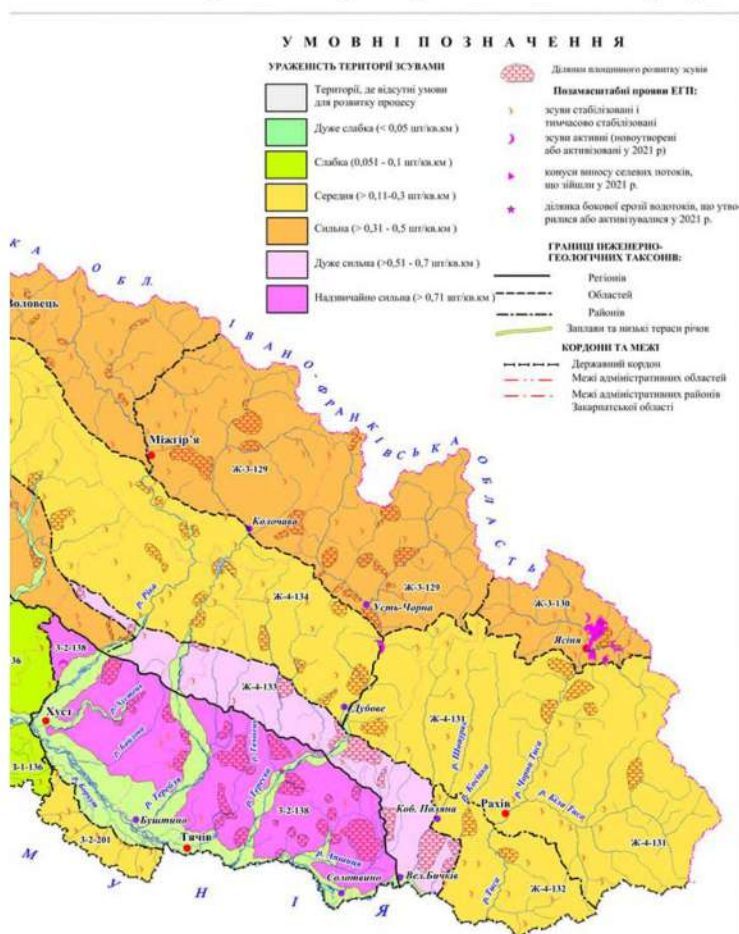


Рис.3.3.2. Зсуви на території с. Солотвино [17]

На рис. 3.3.1 бачимо зображення з вебплатформи GeoSES InSAR Web

Viewer, яке демонструє результати супутникового інтерферометричного аналізу, а на рис.3.3.2 - інженерно-геологічну карту Закарпатської області, яка класифікує території за рівнем схильності до зсувів: від мінімальної до критичної. Крім того, на ній позначено ділянки, де зсуви вже активізувалися та ураженість території. Супутниковий моніторинг InSAR демонструє актуальність проблеми зсувів у Солотвині, фіксуючи сучасні переміщення ґрунтів. Інженерно-геологічна карта надає ширший контекст і підтверджує факти активізації у минулі роки.

На рисунку 3.3.1 у межах Солотвина чітко видно червоні та бордові точки, що свідчать про значні вертикальні переміщення — до - 10–15 мм/рік. Це може бути наслідком як зсувних процесів, так і просідання ґрунтів, пов'язаних із геологічною будовою місцевості, зокрема наявністю соляних порід і порожнин.

Інженерно-геологічна карта показує, що Солотвино належить до зон із слабким і надзвичайно сильним ризиком зсувів. Особливо помітні дві ділянки, де процеси активізувалися у 2021 році, що підтверджує реальну небезпеку, а не лише потенційну загрозу.

Щоб детальніше розглянути характер цих процесів, на рис. 3.3.3–3.3.5 наведено зображення окремих ділянок зсувів у межах Солотвина у деталізованому вигляді. (рис.3.3.3 – рис.3.3.5)

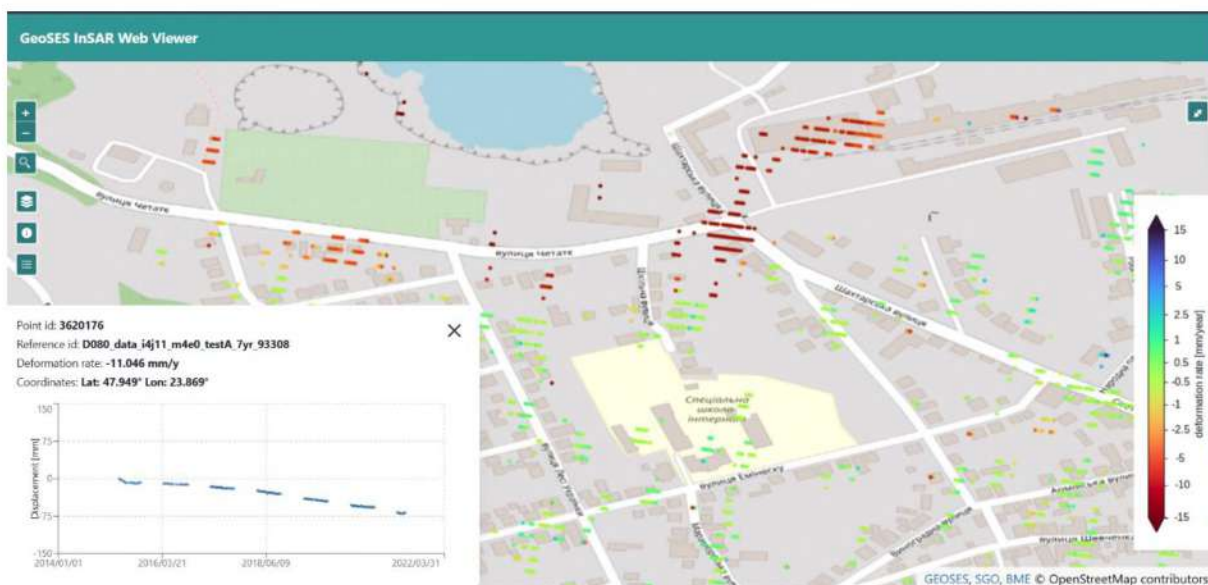


Рис.3.3.3. Зсуви на території с. Солотвино[47]

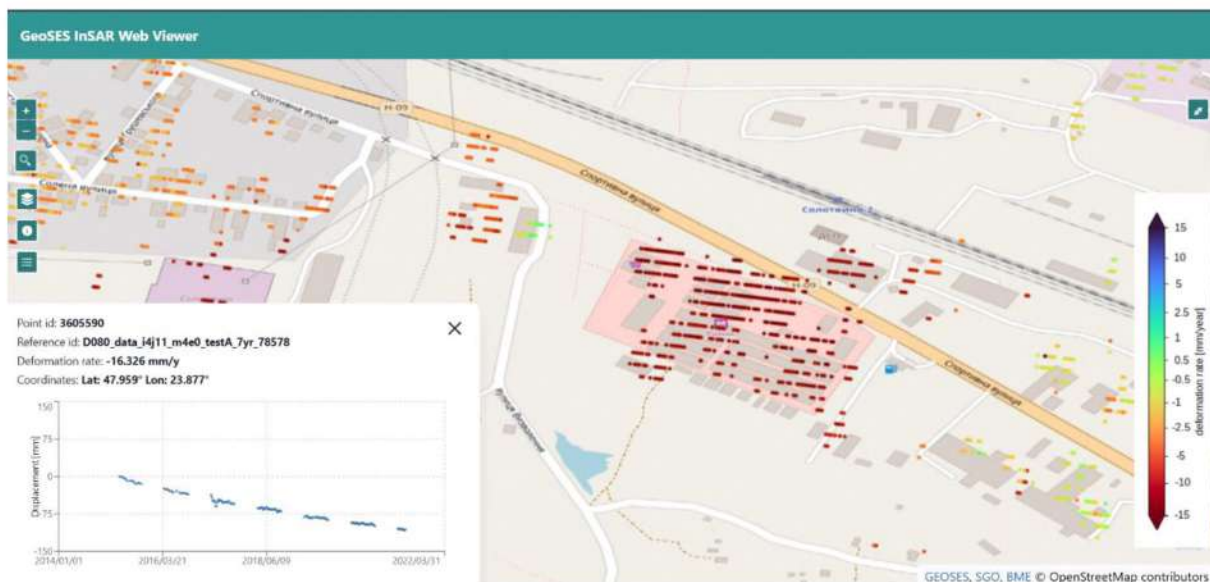


Рис.3.3.4. Зсуви на території с. Солотвино [47]

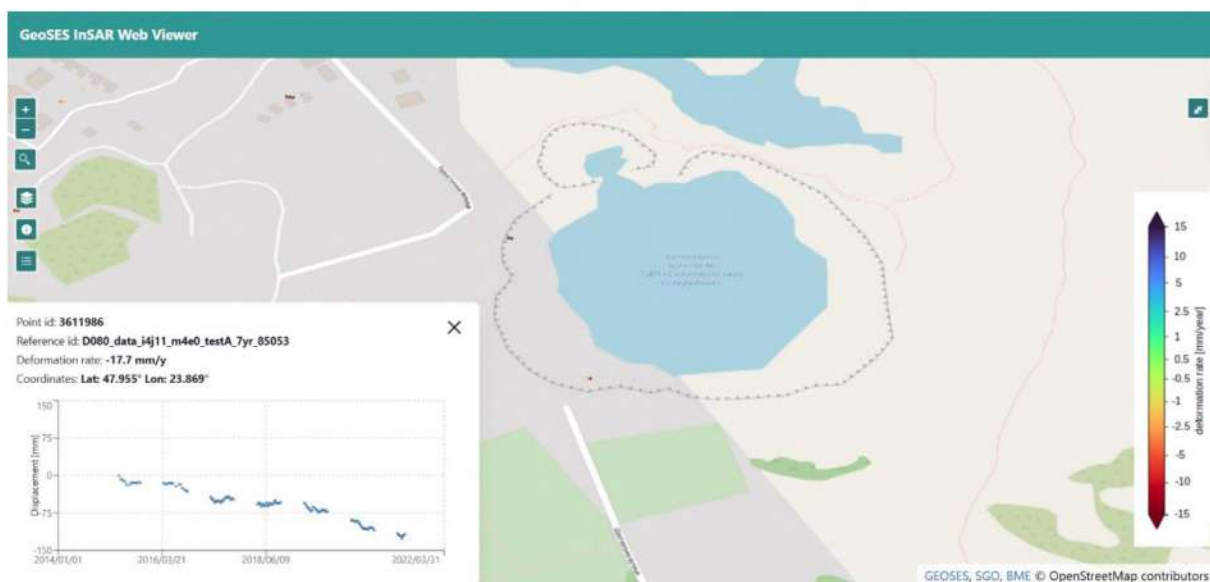


Рис.3.3.5. Зсуви на території с. Солотвино [47]

За умовами розвитку екзогенних геологічних процесів с. Вільхівці розміщені в інженерно-геологічному районі низькогірського рельєфу Солотвинської котловини (З-2-138). Рельєф дрібнопагорбний, зі схилами крутизною до  $30^\circ$ , зайнятими переважно ріллею, садами, чагарниками та молодим лісом.. Геологічна структура представлена породами міоценового віку — аргілітами, алевролітами та пісковиками, які утворюють складчасту будову, що сприяє розвитку зсувних процесів. Поверхневі четвертинні глини та суглинки мають низьку водопроникність, що призводить до накопичення вологи та зниження стійкості схилів.

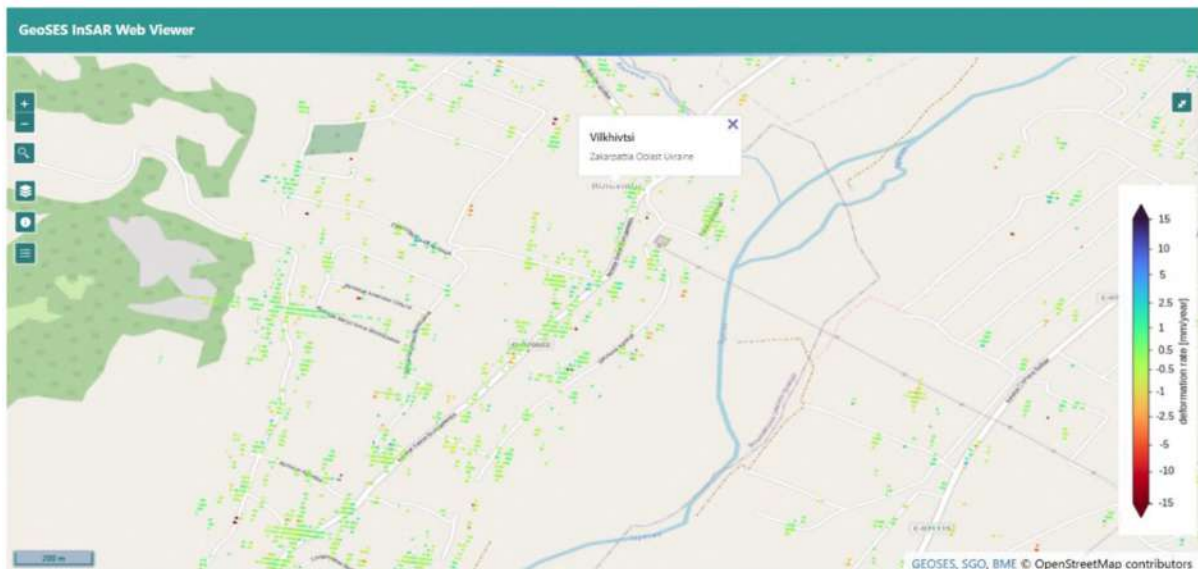


Рис.3.3.6. Зсуви на території с. Вільхівці [47]

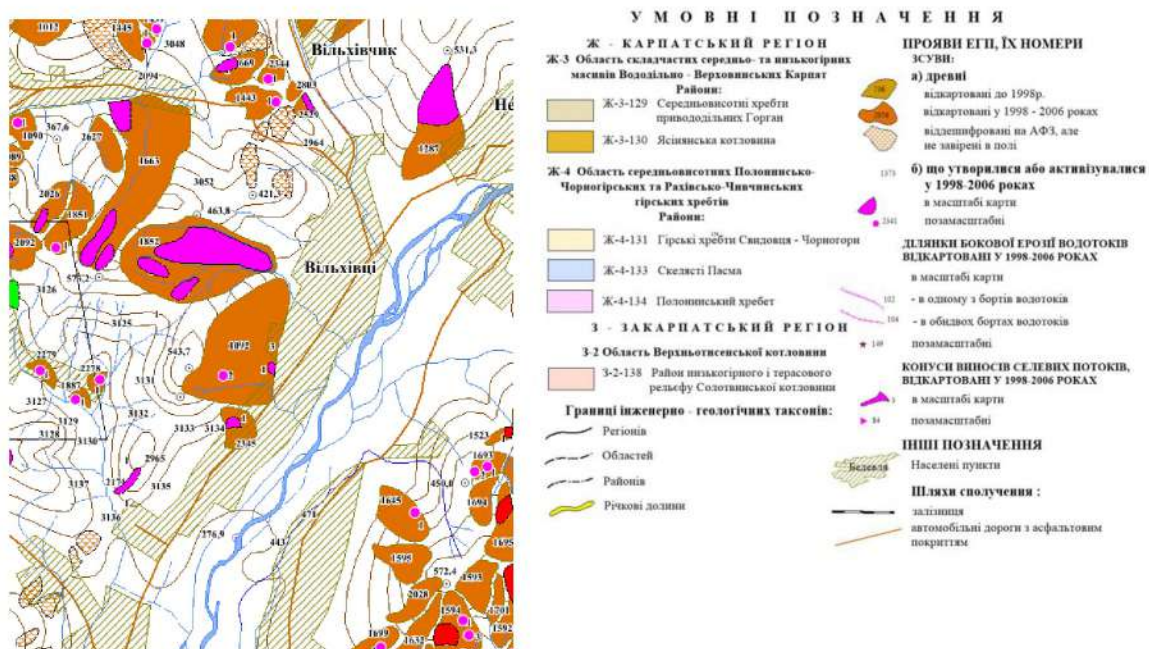


Рис.3.3.7. Зсуви на території с. Вільхівці [17]

На рис. 3.3.6 використано супутникові дані інтерферометрії (InSAR), які відображають сучасні деформації земної поверхні. У районі с. Вільхівці видно скупчення точок із негативними значеннями (до -10 мм/рік), що свідчить про активізацію зсувів та нестабільність схилів поблизу русла річки й на схилах гір.

На рис. 3.3.7 відображені зони зсувів та інших екзогенних процесів, зафіксованих польовими дослідженнями. Полігони коричневого кольору позначають зсуви, що утворилися або активізувалися у 1998–2006 рр. Значна їх концентрація спостерігається на схилах навколо с. Вільхівці, особливо на

південному та західному схилах, що прилягають до долини річки. Фіолетові ділянки показують активні зсуви більш давнього походження.

Обидва джерела підтверджують, що територія навколо с. Вільхівці є зсувонебезпечною. На інженерно-геологічній карті 1998–2006 років видно чітко окреслені полігони зсувів, а сучасні InSAR-дані підтверджують, що ці процеси тривають і сьогодні, проявляючись у вигляді поступових деформацій (до -10 мм/рік).

Розвиток та активізація зсувних процесів зумовлюються передусім постійними геологічними чинниками. Найважливішим серед них є поширення глинистих відкладів у стратиграфо-генетичних комплексах. У Карпатському регіоні це фліш крейдово-палеогенового віку, а в Закарпатському — аргіліти, аргілітоподібні глини та моласи неогену. Ці породи, з одного боку, легко піддаються вивітрюванню і стають сприятливим середовищем для формування зсувів, особливо в зонах тектонічних порушень. З іншого боку, виступаючи водотривким горизонтом, вони утворюють дзеркала ковзання для зсувних мас четвертинних суглинків. Вплив цього чинника посилюється при збігу напрямку падіння шарів з нахилом схилу.

Крім постійних, значну роль відіграють змінні фактори. Найважливішим серед них є клімат, зокрема кількість опадів, товщина снігового покриву та температурний режим. [20] Дослідження свідчать про залежність зсувної активності від рівня зволоження верхньої частини геологічного розрізу. Часто спостерігається запізнення реакції схилів на випадання опадів, що пояснюється поступовим насиченням глинистих товщ та проникненням води до поверхні ковзання. Вплив снігового покриву простежується на ділянці с. Вільхівці. Так, у лютому 2000 року після різкого потепління й дощів на фоні значного снігового запасу відбулося стрімке перезволоження схилів і катастрофічне зрушення мас.

Важливим чинником активізації є також підрізка схилів внаслідок бічної ерозії річок. Не менш суттєво впливають і техногенні фактори: забудова, розорювання, планування майданчиків під житло чи дороги.

Загалом упродовж 1998–2021 рр. активізація зсувів найчастіше відбувалася

восени та наприкінці зими — на початку весни. В окремі роки (2008, 2020, 2021) спостерігалися й літні прояви, що свідчить про посилення впливу кліматичних змін на динаміку цих процесів. [17]

#### *3.4. Методи дослідження зсувних процесів*

Вивчення та прогнозування зсувних процесів є багатокомпонентним завданням, що поєднує польові спостереження, геодезичні вимірювання, геофізичні дослідження та сучасні дистанційні технології. Комплексний підхід дозволяє отримати не лише картину сучасного стану схилів, але й оцінити їхню стійкість у майбутньому. Методи дослідження зсувів зазвичай поділяють на стаціонарні (наземні) та дистанційні. [38]

Стаціонарні (наземні) методи базуються на інженерно-геологічних обстеженнях, бурових роботах, геофізичних вимірюваннях та геодезичних спостереженнях. Польові дослідження передбачають опис геологічних розрізів, визначення складу та властивостей ґрунтів, гідрологічних умов і наявних деформацій. Для кількісної оцінки використовуються спеціалізовані прилади: інклінометри для фіксації глибинних переміщень, тензометри та тріщиноміри для вимірювання швидкості розвитку тріщин, п'єзометри для визначення рівня ґрунтових вод. Геодезичні методи (GPS/GNSS-станції, тахеометри, лазерне сканування) дозволяють з високою точністю фіксувати навіть міліметрові зміни положення контрольних точок. Ці методи особливо ефективні на територіях з інтенсивною забудовою чи інфраструктурою, де локальні зсуви можуть мати критичні наслідки.

З розвитком технологій зростає роль методів дистанційного зондування Землі у дослідженні зсувних процесів. Найбільш поширеним є використання супутникових радарних даних та інтерферометрії SAR (InSAR). Цей метод дозволяє оцінювати деформації земної поверхні з точністю до кількох міліметрів та відслідковувати їх у часових рядах. InSAR забезпечує можливість моніторингу великих територій одночасно, що робить його особливо корисним у гірських регіонах, таких як Закарпаття, де доступ до окремих ділянок є ускладненим. Окрім супутникових методів, застосовується аерофотознімання та

дрони, які дозволяють швидко створювати детальні цифрові моделі рельєфу та фіксувати дрібні зміни схилів. [57,61]

Одним з базових етапів є аналіз картографічних матеріалів. Важливим є використання карт геології корінних порід і кайнозойських відкладів, топографії рельєфу, ґрунтового складу та геоморфологічної структури. Вони дозволяють виділити зони потенційного розвитку зсувів та оцінити загальну вразливість території. Сучасні ГІС-технології значно розширили можливості такого аналізу, оскільки дозволяють поєднувати геологічні, гідрологічні, кліматичні та антропогенні фактори в єдиному інформаційному середовищі. Це дає змогу будувати карти схильності та ризику зсувів, які використовуються як для планування територій, так і для оперативного реагування. [16]

Прогнозування базується на поєднанні польових даних, дистанційних вимірювань та математичного моделювання. Використовуються як емпіричні методики (аналіз критичних умов стійкості схилів), так і чисельні моделі, що враховують фізико-механічні властивості порід, гідрологічні умови та сейсмічні навантаження. Особливе значення має моніторинг рівня опадів та підземних вод, оскільки вони є ключовими факторами активізації зсувів. [15]

### *3.5. Результати застосування методу радарної інтерферометрії*

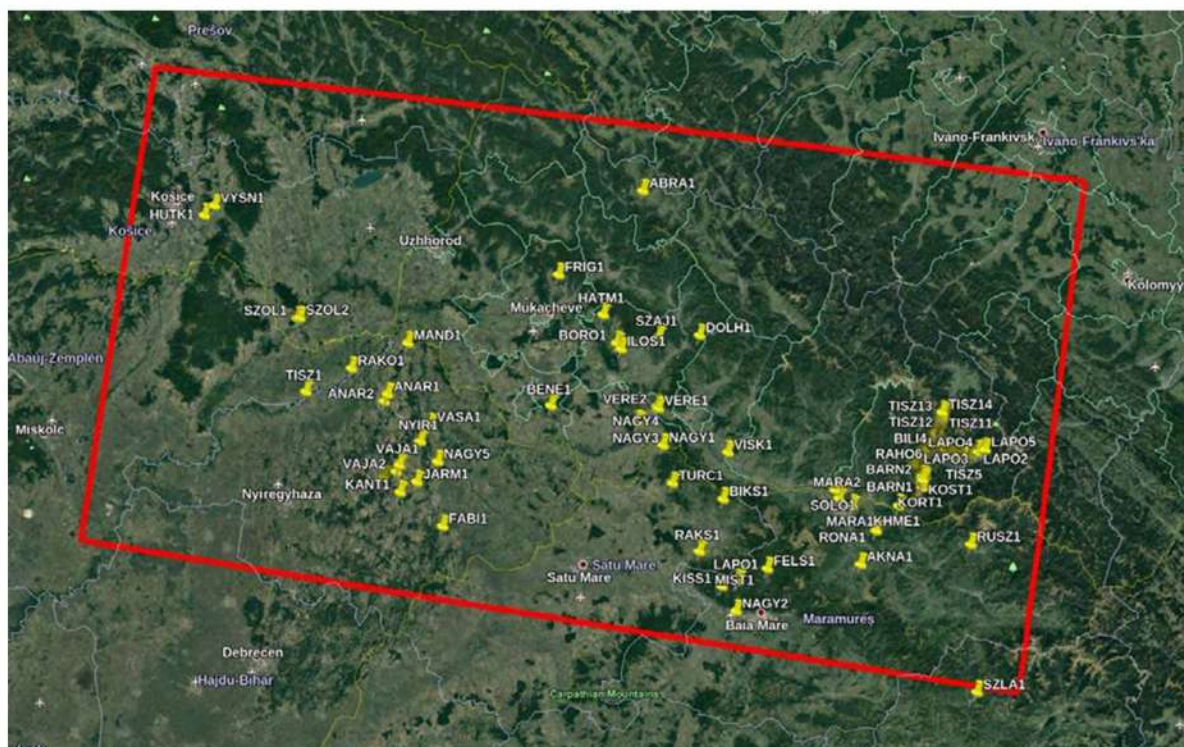
Використання методу радарної інтерферометрії є одним із ключових етапів у дослідженні сучасних екзогенних процесів, оскільки саме цей метод забезпечує можливість виявлення та кількісної оцінки змін рельєфу земної поверхні на великих територіях з високою просторовою точністю. На відміну від традиційних наземних вимірювань, інтерферометрична обробка супутникових радарних знімків дозволяє відслідковувати навіть незначні зміщення (на рівні міліметрів на рік), що є особливо важливим для раннього виявлення потенційно небезпечних процесів, таких як зсуви, просідання чи підняття поверхні.

Моніторинг карстових процесів розпочинався з визначення найбільш уразливих ділянок ґрунтового покриву, схильних до вертикальних деформацій. Для цього було застосовано метод радарної диференційної інтерферометрії (DInSAR), який дозволяє не лише визначати просторовий розподіл деформацій,

а й відстежувати їх зміну у часі. Технологія DInSAR базується на радіолокаційному дистанційному зондуванні з космічних супутників, обладнаних антенами з синтезуючою апертурою (SAR).

Для виконання експериментальних досліджень було обрано території, що належать до Тячівського району Закарпатської області, зокрема — ділянку, розташовану на території с. Солотвино та ділянку в с. Біла Церква.

Вибір ділянок здійснювався на основі даних супутникового моніторингу (рис. 3.5.1) та інформації з веб-переглядача GeoSES InSAR [47] (рис. 3.5.1)



*Рис.3.5.1. Результати інтерферометрії в районі робіт*

Платформа GeoSES (Geohazard Supersites Exploitation System) є інноваційним інструментом для дистанційного моніторингу деформацій земної поверхні, що базується на технології супутникової радарної інтерферометрії (InSAR). Одним із головних завдань GeoSES є моніторинг сучасних деформацій земної поверхні на великих територіях. Використання алгоритмів диференціальної інтерферометрії дозволяє фіксувати зміщення з точністю до кількох міліметрів на рік.

GeoSES InSAR Web Viewer — це інтерактивна онлайн-платформа, створена в рамках європейської ініціативи з моніторингу геодинамічних процесів, яка

призначена для візуалізації та аналізу даних супутникової радарної інтерферометрії (InSAR). Вона надає користувачам доступ до результатів обробки знімків із супутників Sentinel-1 (ESA), що дозволяє відстежувати зміни земної поверхні в динаміці.

Цей інструмент орієнтований на виявлення та аналіз деформацій земної поверхні, таких як просідання, підняття, зсуви, карстові утворення та техногенні порушення. Основною перевагою платформи є її веб-орієнтованість, що дозволяє працювати без необхідності локального опрацювання великих обсягів супутникової інформації. Завдяки цьому інструменти моніторингу стають доступними для широкого кола користувачів — від науковців і студентів до геологів, інженерів і фахівців у сфері геоінформаційних технологій.

На карті легко ідентифікувати зони з підвищеною активністю деформацій, де зміщення сягають кількох міліметрів на рік, а також стабільні ділянки з незначними або відсутніми змінами. Наприклад, у межах Тячівського району найбільш інтенсивні деформації зафіксовані в Солотвині та поблизу населених пунктів, розташованих на схилах річкових долин. (рис.3.5.2 – рис.3.5.3)

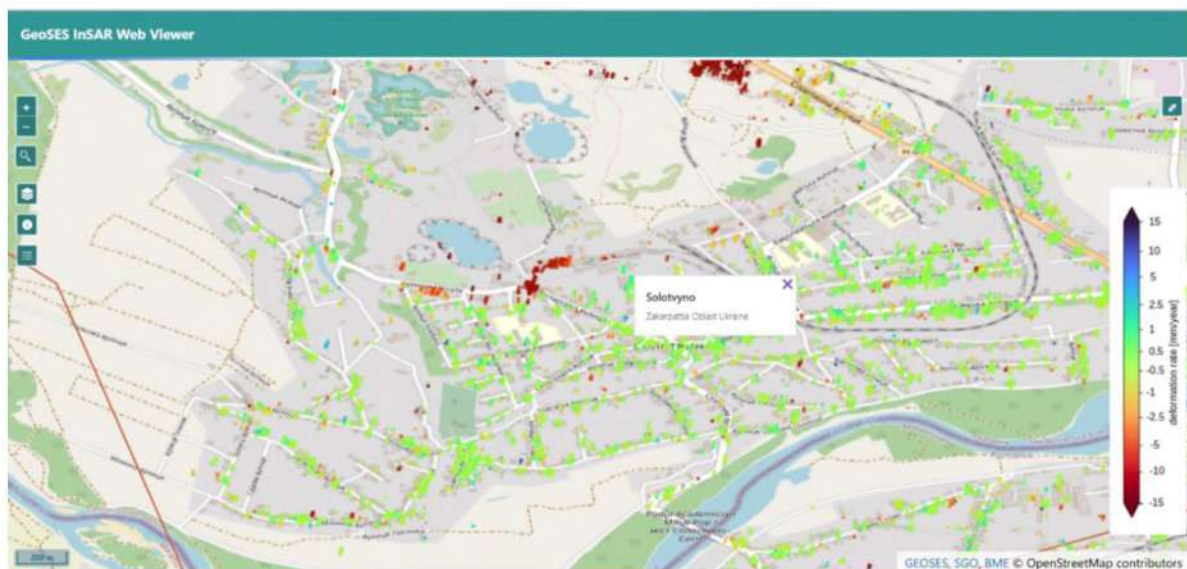


Рис.3.5.2. Результати моніторингу деформації ґрунту на території с. Солотвино [47]

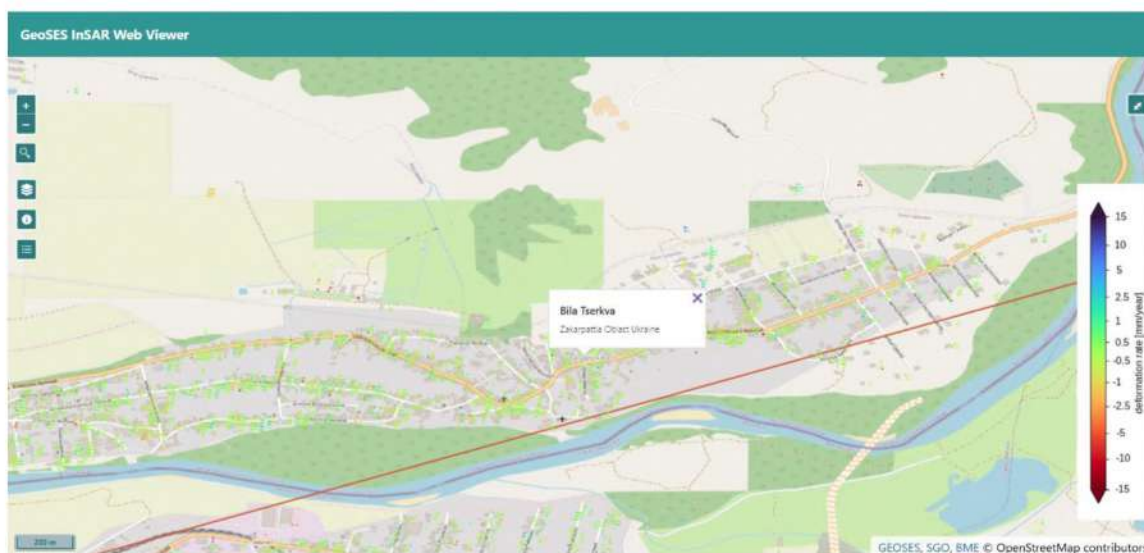


Рис.3.5.3. Результати моніторингу деформації ґрунту на території с. Біла Церква [47]

Користувач має доступ до інтерактивної карти, яка демонструє зони деформації земної поверхні у форматі кольорових градієнтів. Кожен відтінок відповідає певній величині вертикального або горизонтального зміщення (у міліметрах за рік). Також можна обрати окремі точки або невеликі ділянки для отримання часових рядів зміщень, які відображають еволюцію деформацій у динаміці. Це дає змогу простежити розвиток процесів осідання, підняття або схилових зсувів, а також порівнювати зміни у різні часові періоди.

При аналізі повільних та незначних вертикальних зміщень корисний сигнал на інтерферограмі часто є недостатньо чітким через наявність великої кількості перешкод. До них відносяться атмосферні ефекти, неточності орбіт супутників, похибки цифрової моделі рельєфу та апаратурні (термічні) шуми. Щоб знизити вплив цих джерел похибок, було створено методи стійких відбивачів (Persistent Scatterers, PS), що передбачають використання серій супутникових спостережень, а не окремих пар. У результаті цього виділяються об'єкти, що характеризуються стабільним зворотним розсіюванням, які можна відстежувати в часі.

У рамках методу PS аналізуються часові ряди зміщень, що дозволяє відокремлювати високочастотні шумові компоненти, які змінюються між окремими знімками. Це значно підвищує точність оцінки деформацій, зменшуючи вплив не лише апаратурних шумів, а й атмосферних та орбітальних похибок, що робить метод особливо ефективним для виявлення повільних та

малих вертикальних зміщень у карстових та техногенно змінених районах.

За сприятливих умов технологія стійких відбивачів (PS) дає змогу визначати вертикальні зміщення земної поверхні чи штучних споруд з міліметровою точністю, яка для будівель зазвичай становить приблизно 4–6 мм. Головна перевага цього методу порівняно з традиційною радарною інтерферометрією полягає в тому, що він ефективно функціонує навіть за низької когерентності відбитого сигналу, коли більшість пікселів зображення не містять корисної інформації.

За оптимальних умов метод стійких відбивачів (PS) дає змогу визначати вертикальні зміщення земної поверхні та техногенних об'єктів з точністю до кількох міліметрів (приблизно 4–6 мм для будівель та споруд). На відміну від класичної радарної інтерферометрії, цей підхід ефективний навіть за низької когерентності відбитого сигналу, коли більшість пікселів не дають корисної інформації. Завдання визначення зрушень поверхні та вимірювань рельєфу вирішуються шляхом виділення обмеженого набору постійних розсіювачів, які характеризуються стабільним зворотним розсіюванням і відбираються за спеціальною методикою.

Метод SBAS (Small Baseline Subset) також використовує серії супутникових знімків, а не окремі пари, що дозволяє значно зменшити вплив різних шумів і перешкод. Інтерферограми формуються лише для тих пар зображень, у яких нормальні компоненти базової лінії та тимчасові інтервали між зйомками відповідають певним пороговим значенням, що і зумовлює назву методу. Завдяки цьому зменшується вплив просторової та тимчасової декореляції сигналу, що робить SBAS ефективним для аналізу зсувів розподілених об'єктів на відкритій місцевості. У міських умовах метод працює гірше через наявність ефектів накладання, радарної тіні та чергування висококогерентних і низькокогерентних ділянок, що ускладнює розгортку фазового сигналу.

### *3.6. Польові дослідження*

Польові дослідження є важливим етапом комплексного моніторингу екзогенних геологічних процесів, оскільки забезпечують отримання фактичних

даних про стан території, які використовуються для перевірки та уточнення результатів дистанційних спостережень. Метою польових робіт було проведення натурного обстеження ділянок, на яких за результатами інтерферометричного аналізу виявлено ознаки активних деформацій земної поверхні, а також документування проявів сучасних екзогенних процесів, характерних для території Тячівського району.

На основі результатів супутникової інтерферометрії для виявлення найбільш незабезпечених ділянок було організовано локальний геодезичний моніторинг із застосуванням сучасних геодезичних методів:

- Високоточне нівелювання;
- GPS-спостереження;
- Побудова 3D-моделі поверхні за даними лазерного сканування.

У ході проведення польових досліджень з'ясовано, що на досліджуваній території відсутні збережені пункти планової геодезичної мережі.

Під час польового огляду нівелірних реперів виконувалися такі дії:

- здійснювався пошук знаків на місцевості з подальшою оцінкою їхнього технічного стану, зокрема перевірялися якість закріплення марки в бетоні та збереження її зовнішнього вигляду. Для знаків, встановлених у стінах, додатково аналізувався стан будівлі, наявність тріщин у конструкціях, включаючи стіни та фундамент;
- проводилася звірка фактичного розташування знака з описом, наведеним у каталозі, з метою підтвердження його актуальності;
- визначалися координати знаків у системі УСК-2000 за допомогою GPS-обладнання.

Пошук нівелірних реперів здійснювався на основі збережених зовнішніх ознак, таких як залишки каналів, елементи оформлення, охоронні стовпи та інші характерні деталі. Додатково використовувалась інформація, отримана від місцевих мешканців щодо можливого розташування знаків. У результаті

виявлено: 1 стінний репер та 1 стінну марку. (табл.3.6.1 )

*Таблиця 3.6.1*

*Перелік нівелірних знаків, що пройшли обстеження та оновлення*

| № пор. | Тип знака, № марки, клас, рік закладки, тр.м-бу 1:100 000                                           | Характеристика розташування знака                                                                                                                                                                                             | 1. Інформація про стан знака.<br>2. Виконані роботи при його оновленні                                                        | Оновлена характеристика розташування знака                                                           |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.     | Стінний репер (без номерного позначення), належить до I класу, тип 143; дата закладки не визначена. | Біла Церква с., 1,5 км на північний схід від східної околиці, на підпірній стіні залізничного мосту.                                                                                                                          | 1.Репер перебуває у задовільному технічному стані.<br>2.Проведено антикорозійну обробку та нанесено захисне фарбове покриття. | Біла Церква с., 1,5 км на північний схід від східної околиці, на підпірній стіні залізничного мосту. |
| 2.     | Горизонтальна марка №6716 L-34-12-Б, відноситься до I класу, тип 142, закладена у 1988 р.           | Біла Церква с., на відстані 1,5 км на північний схід від його східної межі, приблизно 300 м на південний захід від дорожнього кілометрового стовпчика з позначенням 125/282, на північно-західній стороні залізничного мосту. | 1.Марка не збереглася.<br>2.Конструкція мосту зазнала руйнування в результаті зсуву.                                          |                                                                                                      |
| 3.     | Горизонтальна марка №504 L-34-12-Б, відноситься до I класу, тип 143, встановлена у 1966 р.          | Солотвино, в стіні будівлі вокзалу                                                                                                                                                                                            | 1.Марка перебуває у задовільному стані.<br>2.Виконано фарбування марки для покращення її збереження.                          | Солотвино, в стіні будівлі вокзалу                                                                   |

*Геодезичні роботи з огляду місцевості та встановлення центрів пунктів  
Державної геодезичної мережі*

З метою створення геодезичної основи для топографічних карт на основі вимог Керівного матеріалу та проведеного огляду пунктів планової геодезичної мережі на об'єктах було виконано закріплення 17 пунктів. На відкритих, незабудованих ділянках закріплення та оформлення виконано відповідно до Порядку, встановлено 10 пунктів типу У 15Н та 7 тимчасових реперів. [30]

Під час рекогносрування місць розташування пунктів брали до уваги умови, необхідні для ефективного прийому супутникових сигналів.

- **Проведення супутникових спостережень на пунктах геодезичної мережі**

Виконання супутникових радіонавігаційних спостережень здійснювалося за допомогою двочастотних GPS-приймачів та високоточних геодезичних антен. Перед початком польових робіт було розроблено графік та схему спостережень, розподілених за визначеними датами.

Для кожного пункту в програмі окремо зазначалися виконавець, тип обладнання, час старту та завершення сесії, а також інтервали для перецентрування та переходу до наступного пункту. Усі визначувані пункти обов'язково зв'язувалися щонайменше з трьома пунктами державної геодезичної мережі 1–2 класу, що визначені в системі координат УСК-2000.

Перед початком та після завершення кожного сеансу антена встановлювалась з використанням оптичного центриру точно над маркою пункту, орієнтувалась на північ і фіксувалась її похила висота. Усі роботи виконувалися відповідно до чинних нормативних документів.

Приблизне визначення координат пунктів нівелірної мережі (грунтових, стінних і скельних) I–IV класів у системі координат УСК-2000 здійснювалося за допомогою супутникових навігаційних приймачів із середньоквадратичною похибкою, що не перевищує 5 метрів. Для виконання цих робіт використовувалися GPS-приймачі Trimble R8 GNSS, які забезпечують сумісність із системою координат УСК-2000.

Для отримання достовірних координат прилад працював на кожному пункті протягом 3–5 хвилин, після чого дані фіксувалися у пам'яті навігатора. Процедура визначення повторювали тричі з інтервалами 3–5 хвилин між

вимірюваннями.

### **Створення топографічного плану**

На початковому етапі цієї наукової роботи було сформовано геодезичну основу, необхідну для виконання проектних та передпроектних досліджень. З цією метою проведено базову топографічну зйомку та створено інженерно-геодезичний план з горизонталями через 0,5 м, який відображає актуальну ситуацію на місцевості та рельєф.

План виконано в цифровому форматі за допомогою програмного забезпечення Digitala шляхом створення нової електронно-векторної карти, а також оновленням існуючих топографічних матеріалів відповідно до вимог.

### **Об'єкт Солотвино**

На території с. Солотвино геодезичні роботи були розпочаті Закарпатським топографічним загonom ДП «Західукургелогія», створеним у 1990 році. У цей період було складено топографічний план масштабу 1:10 000 (рис. 3.6.1).

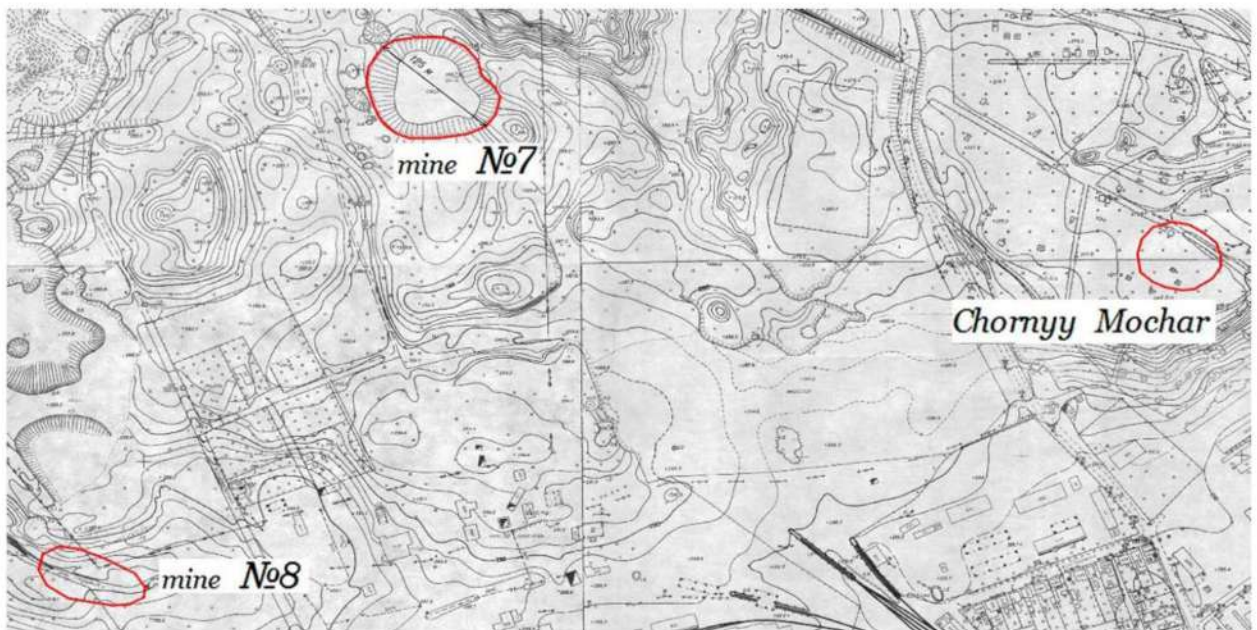


Рис.3.6.1. Стереотопографічне знімання 1995 р.

*Примітка: Об'єкти дослідження показані на рисунках червоним кольором, деформаційні зміщення відображені зеленим кольором.*

У 2010 та 2021 роках на основі матеріалів аерофотознімання було підготовлено ортофотоплани масштабу 1:10 000 (рис. 3.6.2 – рис.3.6.4).

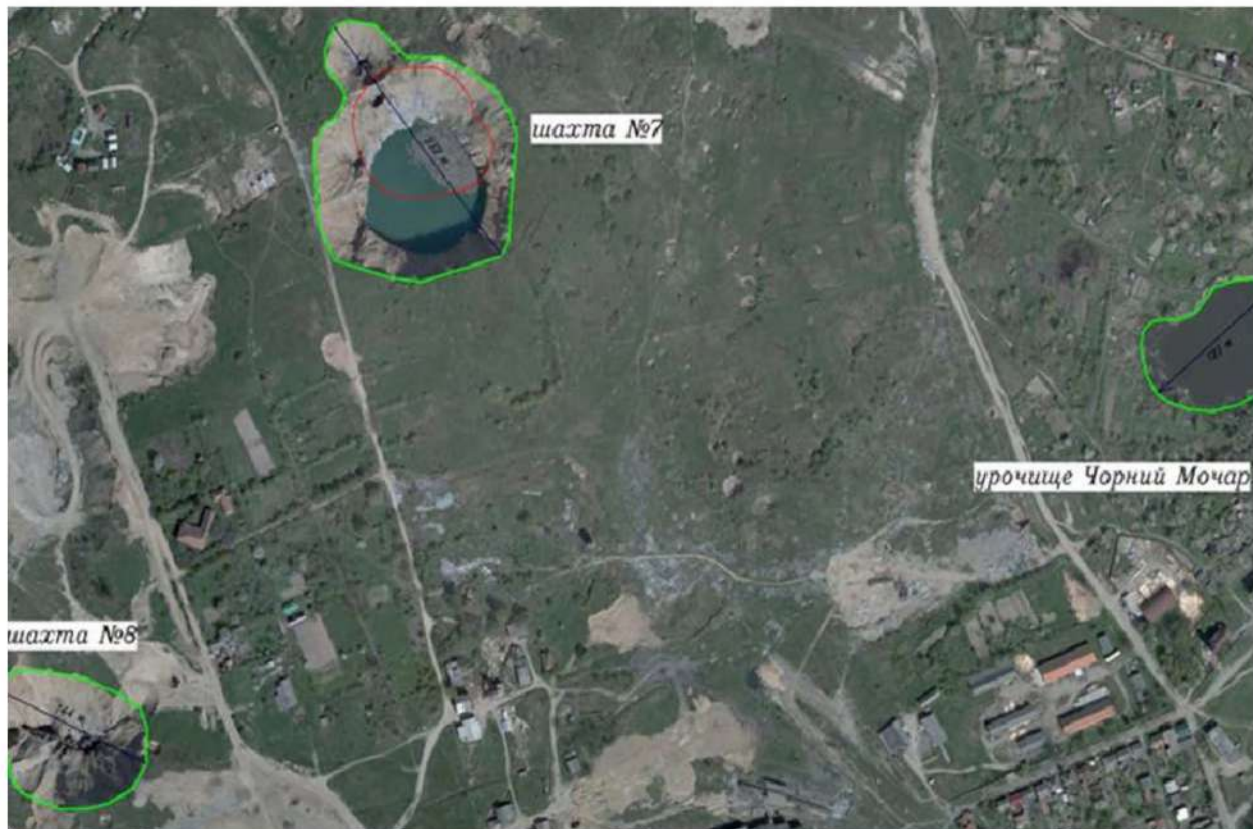


Рис.3.6.2. Моніторинг деформацій (матеріали аерофотознімання станом на 2010 р.)



Рис.3.6.3 Моніторинг деформацій (матеріали аерофотознімання станом на 2018 р.)



Рис.3.6.4. Моніторинг деформацій (матеріали аерофотознімання станом на 2021 р.)

Додатково, у травні 2025 року Закарпатського регіонального філіалу ДП «УкрДАГП» виконано оновлене аерофотознімання території та створено сучасний ортофотоплан, що дозволило уточнити динаміку деформацій за останній період. (рис.3.6.5)



Рис.3.6.5. Матеріали аерофотознімання станом на травень 2025 року

Порівняння цих планів дозволяє простежити зростання карстових воронок протягом 1995–2021 років, а також деталізувати їхню трансформацію за даними 2025 року.

У 2023–2024 роках кафедрою геодезії, землеустрою та геоінформатики Ужгородського національного університету було проведено чотири цикли польових спостережень на зазначеній ділянці (по два цикли на рік). Пункти спостережень були закладені Закарпатським регіональним філіалом ДП «УкрДАГП» у 2020 році.

### **Об'єкт Біла Церква**

На території с. Біла Церква була зроблена аерофотозйомка Закарпатським регіональним філіалом ДП «УкрДАГП» у 2005 та 2011 роках. (рис.3.6.6 – рис.3.6.7) У 2020 та 2021 роках на основі матеріалів аерофотознімання було підготовлено ортофотоплани масштабу 1:10 000. (Додаток Б)



*Рис.3.6.6. Моніторинг деформації (матеріали аерофотознімання станом на 2005 р.)*



*Рис.3.6.7. Моніторинг деформацій (матеріали аерофотознімання станом на 2011 р.)*

З метою дослідження регіональних фонів геодинамічних процесів, визначення масштабу деформацій земної поверхні в зонах активної техногенної діяльності та формування початкової бази епох спостережень на початковому етапі робіт були закладені регіональні нівелювальні лінії, а також виконано точне геометричне нівелювання.

- **Високоточне нівелювання**

Для аналізу регіональних геодинамічних процесів, які можуть впливати на розвиток природно-техногенних явищ, на початковому етапі робіт були закладені нівелірні лінії в межах населеного пункту. За цими лініями планується виконання нівелювання I–II класу точності відповідно до вимог чинного Порядку. [30]

Нівелювання було виконано за допомогою цифрового нівеліра LASERLINER AL 22 classic. (рис.3.6.8)



*Рис.3.6.8. Цифровий нівелір LASERLINER AL 22 classic*

З метою дослідження регіональних фонових геодинамічних процесів та формування епохи спостережень для оцінки їхнього впливу на розвиток природно-техногенних явищ у межах досліджуваних об'єктів, на початковому етапі було закладено регіональні лінії, за якими у 2020 році було проведено нівелювання II класу точності. Ці лінії базуються на пунктах державної нівелірної мережі, створюючи висячі лінії або замкнуті полігони. У вузлових точках розміщено раніше закладені реperi з надійним конструктивним закріпленням.

Для виконання нівелювання II класу використовувалися дерев'яні монолітні штативи та комплект інварних триметрових рейок з BAR-кодом типу LD-13 виробництва компанії Nedo (Німеччина). Рейки оснащені круглими рівнями та обмежувальними насадками на п'яту для стабільного встановлення на башмаку. Під час кожного вимірювання прилад здійснював автоматичну перевірку результату: у разі відповідності вимогам дані виводилися на табло та записувалися в пам'ять приладу; при виявленні розбіжностей або порушень — сигналізувалося про помилку.

Рейки встановлювалися вертикально за рівнем. Спостереження проводилися в ранкові та післяобідні години, не раніше ніж через 30 хвилин після сходу сонця і не пізніше ніж за годину до його заходу, виключно за умов стабільного зображення. Довжина візування становила 15–50 м, при цьому висота променя над поверхнею — не менше 0,5 м, а при коротших візуваннях (до 30 м) — не менше 0,3 м. Відстані між нівеліром і рейками вимірювалися

рулеткою, з допуском нерівності не більше 1,0 м, а сумарне накопичення по секції — не більше 2,0 м.

У разі перерв у роботі спостереження завершувалися на постійному знаку. На кожній станції обчислювалися значення перевищень, розбіжність яких не перевищувала 0,02 мм. Контроль нівелювання здійснювався шляхом порівняння перевищень у прямому та зворотному напрямках. Якщо розбіжність перевищувала допустиме значення, секцію нівелювали повторно. Дані, що не відповідали вимогам, виключалися з обробки. До обробки включалися лише ті результати, які були отримані в обох напрямках і не перевищували встановлений допуск.

Перший цикл нівелювання II класу дозволив отримати значення перевищень між пунктами геодинамічного полігону, що забезпечило формування епохи спостережень. Оцінка точності виконаних робіт підтвердила відповідність результатів вимогам геометричного нівелювання II класу.

Отримані результати формують надійну базу для подальшого виконання запланованих досліджень, спрямованих на вивчення сучасних техногенних вертикальних переміщень земної поверхні в межах досліджуваної території. З метою забезпечення більшої достовірності та повноти даних щодо динаміки вертикальних рухів доцільно здійснювати повторні цикли нівелювання двічі на рік — у весняний та осінній періоди. Нівелювання виконувалося чотири рази, циклічно — один раз на квартал.

На території с. Солотвина було закладено сім реперів для визначення координат і висот. (Додаток В) Нівелірні ходи були прокладені у формі замкнених полігонів, виходячи з початкового репера №504. Репер №504 — це нівелювальна марка, розташована в стіні залізничної будки, висота якої визначена за результатами високоточного нівелювання. Загальна довжина нівелювальних ходів становила 5,5 км. (рис.3.6.9 – рис.3.6.10)

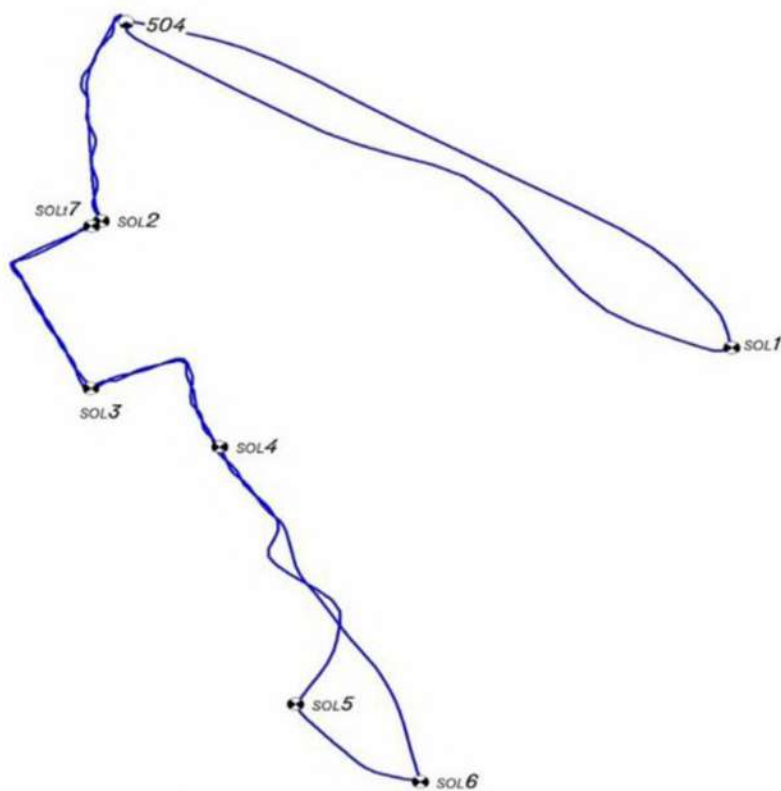


Рис.3.6.9. Схема нівелірних ходів с.Солотвино [50]



Рис.3.6.10. Схема закладання нівелірних ходів с.Солотвино [50]

Схему закладання нівелірних знаків та каталог координат ділянки в с. Біла Церква можна переглянути в додатку Г.

Для здійснення регулярного контролю просторового розташування об'єктів

передбачається використання електронних тахеометрів. Застосування безрефлекторних моделей дає змогу виконувати високоточні вимірювання у точках, де неможливо встановити відбиваючі призми. Поширення технологій безконтактного вимірювання з високим рівнем автоматизації сприяє впровадженню сучасних тахеометрів, здатних визначати відстані без використання відбивача.

Основні переваги роботи в безрефлекторному режимі включають: підвищення безпеки виконавців (відсутність потреби наближатися до потенційно небезпечних зон), зменшення тривалості польових робіт, а також можливість охоплення практично всіх елементів об'єктів. За результатами вимірювань було складено топографічний план масштабу 1:500 з детальним відображенням ситуаційних об'єктів і рельєфу місцевості.

#### • **Аерофотоспостереження**

Для аналізу динаміки зсувних і карстових процесів цифрову аерофотозйомку необхідно здійснювати багаторазово з дотриманням визначених інтервалів. У межах досліджуваних територій зйомка проводилася двічі - навесні 2020 року і восени 2021 року.

За отриманими результатами зйомки були створені цифрові моделі рельєфу та ортофотоплани з метою прогнозування карстових і зсувних процесів. Виконання цифрової аерофотозйомки відбувалося згідно з чинними нормативними вимогами.

#### **Перший етап:**

- БПЛА: Tarot 680PRO Hexacopter [Tarot 680 PRO, 2020]
- Камера: Sony A 6000, 24.3 МП
- Роздільна здатність матриці: 6000×4000 пікселів
- Фокусна відстань об'єктива: 16 мм
- Розмір кадру: 294 м × 195 м
- Масштаб аерофотозйомки: 1:7000

- Просторова роздільна здатність знімків: 5 см/пікс
- Висота зйомки: 110 м
- Поздовжнє перекриття: 70 %, поперечне — 60 %
- Ортомозаїка з роздільною здатністю: 2.68 см/пікс

#### **Другий етап:**

- БПЛА: Autel EVO II Pro RTK [Autel EVO II Pro RTK, 2021]
- Камера: Autel Robotics XT705, 20.0 МП
- Роздільна здатність матриці: 5472×3648 пікселів
- Фокусна відстань об'єктива: 11 мм
- Масштаб аерофотозйомки: 1:10000
- Просторова роздільна здатність знімків: 5 см/пікс
- Висота зйомки: 110 м
- Поздовжнє перекриття: 70 %, поперечне — 60 %
- Отримано 1614 зображень
- Ортофотоплан з роздільною здатністю: 2.72 см/пікс

#### **Об'єкт Солотвино:**

- Площа цифрової аерофотозйомки становить 200 га;
- Зйомка здійснювалася за трьома польотними проєктами тривалістю по 25 хвилин кожен;
- Було застосовано розріджене розташування запланованих висотних ідентифікаційних знаків, які рівномірно розміщені по площі та периметру об'єкта;
- Було зафіксовано координати 46 ідентифікаційних знаків.

#### **Об'єкт Біла Церква:**

- Площа цифрової аерофотозйомки становить 13 га;
- Було використано розріджене розташування запланованих висотних ідентифікаційних знаків, які рівномірно розподілені по площі та периметру об'єкта;
- У результаті визначено координати 7 ідентифікаційних знаків.

Для забезпечення точності аерофотознімання застосовувалося планово-висотне обґрунтування. Воно полягало у створенні геодезичної знімальної мережі та планово-висотної прив'язки аерофотознімків. Розташування розпізнавальних знаків (ОП) здійснювалося таким чином, щоб вони рівномірно покривали площу та периметр об'єкта, зокрема у точках поворотів меж і по напрямках маршрутів аерознімання. Точки вибиралися з чіткими контурами, які легко визначаються як на місцевості, так і на знімках, і закріплювалися штирями, трубками, дерев'яними кілками або іншими стійкими конструкціями.

Для обробки геодезичних GPS-даних використовували програмне забезпечення Trimble Geomatics Office, здійснюючи приведення вимірів до рівня моря та редукцію на площину проекції Гаусса–Крюгера. Точність створеної GPS-мережі повністю відповідала нормативним вимогам: граничні похибки не перевищували 0,2 мм на відкритих ділянках та 0,3 мм в зарослих місцях у відповідному масштабі розробленого плану.

#### • Створення цифрових ортофотопланів

Цифрові ортофотоплани масштабу 1:1 000 були виготовлені на основі растрових аерофотознімків із використанням пубодованої цифрової моделі рельєфу (ЦМР). ЦМР формувалася шляхом визначення висот вузлів регулярної сітки з кроком 10 м у стереорежимі, де висоти окремих вузлів уточнювалися в інтерактивному режимі. На другому етапі вручну у стереорежимі будувалися структурні лінії у ділянках з різкими перепадами висот, таких як укоси, підпірні стінки, яри, а також у характерних місцях зі складною морфологією рельєфу, де щільності регулярної сітки було недостатньо.

При трансформації використовували центральні частини знімків, що

характеризуються мінімальними перспективними спотвореннями. Точність створених ортофотопланів перевіряли за контрольними розпізнавальними знаками, лініями «зшивки» частин, суміжними ортофотопланами та пунктами існуючої геодезичної мережі.

- **Побудова 3D-моделі поверхні за даними лазерного сканування**

Для локального моніторингу нестійких схилів та карстових утворень, а також для оперативного картування зміщень, найбільш ефективним методом є тривимірне лазерне сканування. Принцип роботи лазерних сканерів заснований на вимірюванні відстані від джерела лазерного імпульсу до об'єкта: промінь відбивається від поверхні, після чого приймач сканера визначає відстань за затримкою часу (імпульсний метод) або за зсувом фаз (фазовий метод). Знаючи координати сканера та напрямок імпульсу, отримують тривимірні координати кожної точки, від якої імпульс відбився.

Сучасні лазерні сканери можуть генерувати до сотень тисяч імпульсів на секунду і за допомогою рухомих дзеркал або корпусу сканера рівномірно розподіляти їх по поверхні об'єкта – схилу або групи зсувів. В результаті формується хмара тривимірних точок, яка точно та повно описує об'єкт. Після обробки спеціальними програмними продуктами набір точок може бути представлений у вигляді тривимірної моделі, плоского креслення, набору перетинів або поверхні. Точність вимірювань становить від 1 до 10 мм на відстані до 1000 м. [25,26]

Ефективність моніторингу значно підвищується при інтеграції лазерного сканування з системами раннього попередження про загрозу зсувів та карстових проявів. Такі системи дозволяють виявляти провісники катастрофічних зсувів – наприклад, прискорення руху нестійких мас, інтенсивні опади або коливання ґрунту – і своєчасно видавати сигнали тривоги для населення та служб МНС. Надійність вимірювань є критичною: хибні тривоги можуть становити значну небезпеку, тому система повинна використовувати кілька методів контролю та різні рівні тривоги, забезпечуючи необхідні заходи для захисту людей і майна.

В результаті застосування лазерного сканування та систем раннього

попередження формується комплексна методика геодезичного моніторингу, яка дозволяє оцінювати стан карстових проявів і деформаційних зміщень земної поверхні та може бути застосована на інших закарстованих територіях.

3D-модель поверхні за даними лазерного сканування ділянки в с. Солотвино можна переглянути в додатку Д.

### *3.7. Порівняльний аналіз результатів радіолокаційних та наземних спостережень*

У сучасній геодинаміці ефективно дослідження та прогнозування зсувних і деформаційних процесів неможливе без комплексного використання як дистанційних, так і наземних методів спостережень. Кожен із них має власні переваги, обмеження та сферу доцільного застосування. Узгодження та взаємна перевірка результатів різних методів дозволяють отримати повну й достовірну картину просторово-часової динаміки геологічного середовища.

Одним із найбільш інформативних дистанційних методів сьогодні є радіолокаційна інтерферометрія (InSAR), яка базується на аналізі фазових різниць між двома або кількома радіолокаційними зображеннями тієї самої території, отриманими в різний час. Цей метод забезпечує визначення вертикальних зміщень земної поверхні з міліметровою точністю навіть на великих площах. До основних переваг інтерферометрії належить можливість отримання даних без проведення польових робіт, що робить її особливо цінною для моніторингу важкодоступних або небезпечних ділянок.

Інтерферометричні технології широко застосовуються для виявлення осідань, підняття, карстових провалів, деформацій інженерних споруд та оцінки стабільності схилів. На прикладі територій Солотвина та Білої Церкви за допомогою супутникових знімків Sentinel-1, оброблених в середовищі GeoSES InSAR Web Viewer, були отримані карти вертикальних деформацій, які відображають сучасну геодинамічну активність території.

Попри високу точність, метод InSAR має низку суттєвих обмежень. По-перше, він фіксує лише компоненту зміщення у напрямку лінії візування супутника, тобто не дозволяє визначити реальний напрям і швидкість руху

зсувної маси. По-друге, точність результатів може знижуватися на ділянках зі щільним рослинним покривом або складним рельєфом, де виникають геометричні тіні. По-третє, супутникові спостереження відображають деформації з певною часовою періодичністю, що не завжди дозволяє фіксувати короточасні чи імпульсивні процеси. Саме тому інтерферометрія ефективна для регіонального огляду, але вимагає локального уточнення результатів за допомогою наземних геодезичних методів.

До групи наземних методів належать геометричне нівелювання, тахеометричні спостереження, GPS-вимірювання та лазерне сканування. Ці методи забезпечують безпосередній контроль за змінами положення земної поверхні у плані та по висоті з високою точністю.

Геометричне нівелювання залишається одним із найнадійніших методів визначення вертикальних зміщень. Його перевага полягає у високій точності (до десятих часток міліметра на станцію) та можливості регулярного повторення спостережень. Метод ефективний для тривалого контролю висотних змін на локальних ділянках, наприклад, у зонах розвитку карсту чи осідання ґрунтів.

Просторове положення контрольних точок та горизонтальні зміщення визначаються за допомогою тахеометричних вимірювань. Електронні тахеометри у безрефлекторному режимі дозволяють виконувати вимірювання у важкодоступних місцях або на нестійких схилах без встановлення відбивачів. Завдяки цьому метод дає змогу створити векторне поле зміщень і визначити напрям руху деформованих мас.

GPS-спостереження використовуються для побудови планово-висотної основи моніторингових мереж і фіксації зміщень у тривимірному просторі. Використання сучасних приймачів з фазовою обробкою сигналів дозволяє досягати точності 1–3 мм, що є цілком достатнім для оцінки динаміки деформацій земної поверхні.

Серед найсучасніших методів варто виділити тривимірне лазерне сканування (LiDAR), яке забезпечує надзвичайно детальне відтворення рельєфу. Хмара точок, отримана при скануванні, дозволяє побудувати тривимірну модель

поверхні та простежити навіть незначні зміни в геометрії схилу або зсувної ділянки. Цей метод особливо ефективний у комбінації з аерофотозйомкою, що дозволяє поєднати геометричну точність із візуальним аналізом.

Узагальнюючи, можна зазначити, що InSAR і наземні методи характеризуються різною роздільною здатністю у просторі та часі та призначені для різних умов оптимального використання. Інтерферометрія забезпечує огляд великої території, виявляє загальні тенденції розвитку процесів і дозволяє виявити небезпечні зони ще до появи видимих деформацій. Наземні методи, натомість, забезпечують високу точність, деталізацію та можливість визначення напрямів і швидкостей рухів, але потребують більше часу й трудових витрат.

Тому ефективна система моніторингу за зсувами повинна базуватися на інтеграції обох підходів. Супутникова інтерферометрія виконує функцію попереднього скринінгу території, виявляючи потенційно небезпечні ділянки, після чого на цих зонах проводяться наземні вимірювання для уточнення параметрів і прогнозування подальшого розвитку процесів.

Отже, порівняльний аналіз методів дозволяє зробити висновок, що жоден із них не є універсальним. InSAR забезпечує широкий просторовий огляд і довгострокову динаміку, тоді як наземні спостереження гарантують високу точність і тривимірну інтерпретацію результатів. Їхнє поєднання створює науково обґрунтовану основу для розроблення ефективних систем моніторингу, прогнозування та запобігання розвитку зсувних процесів.

### **Висновки до розділу 3:**

Екзогенні процеси, зокрема зсуви та обвали, активно проявляються на території Тячівського району. Польові та геодезичні спостереження забезпечили точні дані про стан схилів і ґрунтів. Метод радіолокаційної інтерферометрії (InSAR) дозволив визначити вертикальні та горизонтальні деформації з високою точністю. Порівняння супутникових і наземних результатів підтвердило ефективність дистанційного моніторингу для оцінки й прогнозування зсувів. Комплексний підхід дає змогу визначати зсувонебезпечні ділянки та планувати заходи для зменшення ризиків для населення та інфраструктури.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень з отриманих результатів ми можемо сформулювати такі висновки :

- Проведено геодезичні вимірювання на зсувонебезпечних ділянках і територіях карстоутворення, що дозволило виявити активні прояви деформацій і визначити зони підвищеного ризику.

- Створено та закріплено високоточну планово-висотну геодезичну основу, включно з новими пунктами та відновленням реперів, забезпечивши стабільну опорну мережу для повторних спостережень.

- Здійснено комплекс GNSS-вимірювань і нівелювання, що надало точні координати та висотні відмітки, зафіксовано локальні зміщення.

- Опрацьовано та проаналізовано отримані результати, що дозволило оцінити інтенсивність і просторову структуру деформацій, відокремити стабільні ділянки від зон підвищеної активності та сформувати узгоджену модель змін рельєфу.

- Виконано порівняння наземних даних із супутниковими спостереженнями (InSAR), що підтвердило їхню узгодженість і точність.

- Визначено активні зони зміщень, простежено їхню динаміку та охарактеризовано типи сучасних екзогенних процесів.

І в цілому отримані результати свідчать, що територія характеризується складними інженерно-геологічними умовами та різноманітними ґрунтово-гідрогеологічними характеристиками, що сприяють розвитку зсувів, карсту та просадкових явищ. Використання дистанційного зондування, зокрема InSAR, у поєднанні з польовими методами підвищує достовірність оцінки геодинамічних змін і є перспективним для моніторингу, прогнозування зсувів та створення систем раннього попередження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаменко О.М. Екологічна геологія: підручник. Київ: Манускрипт, 1998. 349 с.
2. Аналіз просторових закономірностей поширення зсувів у межах Закарпатської області засобами ГІС. / Шехунова С. Б., Сюмар Н. П., Лобасов О. П., Стадніченко С. М. *Український географічний журнал*. 2022, 3(119). DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011>
3. Баран П. І. Інженерна Геодезія: монографія. Київ: ПАТ «ВІПОЛ», 2012. 618 с.
4. Безродна І. М. Безродний Д.А. Методичні вказівки з лабораторних занять з курсу «Геофізичні методи досліджень» для студентів геологічних спеціальностей. 2012. С. 65.
5. Високоточні нахиломірні вимірювання для моніторингу території шахтних полів рудника № 2 стебницького калійного родовища / О. Заяць та ін. *Геодинаміка*. 2017. №2(23). С. 25-33.
6. Гайдін А. М. Екологічні проблеми районів видобутку калійних солей та сірки. *Екологія і природокористування*. 2013. Вип. 16. С. 127-134.  
URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecolpr\\_2013\\_16\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecolpr_2013_16_17)
7. Геодезія. Частина перша. Топографія: навч. посібник / АЛ Островський, О.І. Мороз, З.Р. Тартачинська, І.Ф. Гарасимчук. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2011. 440 с.
8. Геодезичні дослідження при визначенні зсувних процесів на ділянках шляхів сполучення у гірській місцевості: навч. посіб. / Угненко Є. Б. та ін. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2019. 184 с.
9. ДБН В.1.1-46:2017 Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. Київ: Мінрегіон України, 2017. 37 с.
10. Державна екологічна інспекція у Закарпатській області

URL: <https://zak.dei.gov.ua/>

11. Дорош Л. І. Моніторинг техногенно-небезпечних об'єктів засобами радіолокаційної інтерферометрії: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.24.01. Львів. 2021. 137 с.

12. Дослідження впливу гірничих виробок рудників ДП “Солотвинський солерудник” на земну поверхню, будівлі та споруди із використанням супутникового радарного моніторингу/ Пакшин, М., Ляска, І., Каблак, Н., Яремко, Г. *Геодинаміка*. 2(31), 2021. 41–52 с.

13. Екологічні проблеми Закарпаття: навч. посіб. / Н. Каблак, Я. Гасинець, Л. Фельбаба-Клушина, В. Мірутенко та ін.; за заг. ред. проф. Н. Каблак та проф. Л. Фельбаба-Клушина. Ужгород : РІК-У, 2023. 356+324 с.

URL: <http://dspace.msu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/11741>

14. Железняк О. О., Чубко Л. С. Космічна фотограмметрія: навч. посібник. Київ: НАУ.2012. 220 с.

15. Звіт про науково-дослідну роботу «Моделювання сталого природокористування адміністративно-територіальних утворень з застосуванням ГІС-технологій на прикладі Карпатського регіону» / Калинич І.В. та інші. 2020

URI: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/34482>

16. Іванік О. Методичне забезпечення прогнозування зсувної небезпеки на регіональному та локальному рівні: принципи, методи, моделі. *Геологія*. Вип. 3(66). 2014. С. 55–60.

17. Інформаційний звіт з моніторингу, обліку поширення і активізації екзогенних геологічних процесів гідрогеолого - екологічної партії Закарпатського геолого – гідрогеологічного центру за 2020 р. / Габор М. М. та ін. Берегове. 2021. 45 с.

18. Кохан С.С., Востоков А. Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручник. Київ: Вища шк. 2009. 511 с.

19. Калинич І.В., Каблак Н.І., Скаканді С.В. Динаміка розвитку зсувних процесів на території Закарпатської області Київ: / Містобудування та територіальне планування. 2017. №64. С.535-543

URI: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/17054>

20. Кравець, О. Я. Використання геоінформаційних технологій при дослідженні зсувних процесів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 30 (2). 2020. 113-117. DOI: <https://doi.org/10.36930/40300220>

21. Кузьменко Е. Д., Штогрин Л. В., Чепурний І. В. Аналіз впливу геологічної будови гірських порід на характеристики зсувів. *Геодинаміка*. 2014. № 2. С. 112-124.

URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000465796>

22. Ларь І.Р., Калинич І.В. Перспективи застосування радіолокаційної інтерферометрії для моніторингу сучасних екзогенних процесів у Закарпатській області : збірник тез та доповідей XII міжнародній науково – практичній конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні» GeoTech Zakarpattya 2025 (м. Ужгород, 23-25 жовтня 2025 р.).

23. Лялько, В. І., Апостолов, О. А., Єлістратова, Л. О. Вплив природних та антропогенних факторів на формування небезпечних ситуацій: зсувів, паводків (на прикладі ділянки верхньої течії річки Дністер). *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2017. 31–39 с.

URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/112>

24. Навчально-методичні рекомендації щодо виконання кваліфікаційної роботи (проєкту) магістра (для студентів спеціальності 193 Геодезія та землеустрій); Уклад. Пересоляк В.Ю., Крильо І.В., Романко В.О., Каблак Н.І.,

Калинич І.В., Радиш І.П., Марухнич Т.Б. [Ужгород. нац. ун-т; геогр. ф-т; каф.геодезії, землеустрою та геоінформатики] – Ужгород : Видавництво «УжНУ»,2024. 80 с.

URI: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/65723>

25. Ничвид М. Р. Шейдик А. А. Аналіз програмних продуктів при створенні 3d кадастру/36. матеріалів VIII міжнародної – науково – практичної конференції «Нові технології геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні» Ужгород 6-8 жовтня 2016 року. Вид. Говерла. С.161-166

URI: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/11600>

26. Нові технології 3D знімання / Каблак Н., Калинич І., Ничвид М., Мальчевський А. Матеріали 25-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2020», присвяченої професій ному свята працівників геології, геодезії і картографії України, 1–3 квітня 2020 р., Львів–Брюховичі–Яворів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020.

URI: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/63603>

27. Особливості моніторингу геотехногенної динаміки на шахтних полях калійних родовищ / К. О. Бурак та ін. *Вісник геодезії та картографії*. 2014. № 5. С. 12-18.

28. Оцінка небезпеки приповерхневих деформацій гірських порід у межах Стебницького калійного родовища методом ІЕМПЗ / Кузьменко Е. Д., Багрій С. М., Чепурний І. В. Штогрин М. В. *Геодинаміка*. 2017. №1(22). С. 98-113.

29. Примушко С. І., Коваленко Н. Б., Пишна Н. Г. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП: (ред.). Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2020, 104 с.

30. Про затвердження Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500: наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17.04.2025 р. № 1675

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25#Text>

31. Результати детальних електромагнітних зондувань проблемної ділянки північного борту Домбровського кар'єру / С. А. Дешиця та ін. *Геодинаміка*. 2013. № 2(15). С. 136-138.

32. Ріпецький С. Й., Ріпецький Р.Й., Дорош Л.І. Облік зміни площ лісових угідь в структурі земельного фонду за характеристиками супутникового знімку. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, №№2. С. 15-19

33. Романко В.О., Пересоляк В.Ю., Калинич І.В. Ґрунтознавство. Конспект лекцій. Ужгород: УжНУ «Говерла», 2021. 99 с.

URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/39414>

34. Салюк М., Микита М. Методичні матеріали до вивчення курсу Географія Карпатського регіону (для студентів спеціальності 8.014 – Середня освіта. Географія). Ужгород: Видав. ДВНЗ «УжНУ», 2020. 76 с.

URI: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/47250>

35. Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Павленко В.М. Класифікація і причини виникнення зсувних процесів та методи розрахунку схилів. *Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures*. 2022. № 109. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.184-202

36. {Стан системи моніторингу екзогенних геологічних процесів державного й регіонального рівнів та способи її вдосконалення / А. В. Лущик, І. В. Саніна, Н. Г. Люта, Л. М. Климчук. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*. 2015. № 2. С. 65-77.

URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/UDGRI\\_2015\\_2\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/UDGRI_2015_2_6)

37. Сучасні інженерно-геологічні умови України як складова безпеки життєдіяльності / Климчук, Л.М., Блінов, П.В., Величко, В.Ф. та ін. Київ : ВПЦ "Експрес". 2008.

38. Яковенко М. С., Нестеренко О. В. Аналіз методів геодезичного моніторингу деформацій інженерних споруд та зсувних процесів ґрунтових масивів. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування* : наук.-техн. зб. Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; відп. ред. М. М. Дьомін. Київ : КНУБА, 2020. Вип. 56. С. 345 - 363.

39. Beavan R. J., Litchfield N. J. Vertical land movement around the New Zealand coastline: implications for sea-level rise. *GNS Science Report*. 2012. 29. 41 p.

40. Bürgmann, R., Dresen, G. Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations. *Annu. Rev. Earth Planet.* 2008. Vol. 36. P. 531-567

41. Colombo, D. and MacDonald, B. Using advanced InSAR techniques as a remote tool for mine site monitoring. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015.

URL: [https://site.tre-altamira.com/wpcontent/uploads/2015\\_InSAR\\_mine-site\\_monitoring.pdf](https://site.tre-altamira.com/wpcontent/uploads/2015_InSAR_mine-site_monitoring.pdf)

42. Deformation near the Long Valley caldera, eastern California, 1982-1986/J.C. Savage et. al. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1987. Vol. 92. P. 2721-2746

43. DS-InSAR Based Long-Term Deformation Pattern Analysis in the Mining Region With an Improved Phase Optimization Algorithm / Du, Y., Yan, S., Zhao, F., Chen, D. and Zhang, H. *Front. Environ. Sci.*, 10:799946. 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.799946

44. Estimation of earth's surface moves and deformation of the territory of mine "Khotin" of KalushGolinsky field by method of radar interferometry / Pakshyn,

M., Lyaska, I., Burak, K., Kovtun, V., Dorosh, L., Hrynishak, M., Mykhailyshyn, V., & Grytsyuk, T. *Geodesy and Cartography*, 45(1), 37–42. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3846/gac.2019.6300>

45. Ferretti, A. Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space (EET 9). Houten, Netherlands: EAGE. 2014. Available at: <https://bookshop.eage.org/product/satellite-insardata-reservoir-monitoring-from-space-eet-9/>

46. Froude, M., & Petley, D. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1–44. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-49>

47. GeoSES InSAR Web Viewer

URL: <https://geoses.sgo-penc.hu/>

48. Hein, A. *Processing of SAR Data Fundamentals, Signal Processing, interferometry*. Berlin: Springer. 2004.

49. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation / A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Rrati C., F. Rossa ESA Publication, 2007. 48 p.

URL: [https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19\\_ptA.pdf](https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf)

50. Kablak, N., Pukanska, K., Bartoš, K., Savchyn, I., Nychvyd, M., Kalynych, I., Fehér, J. and Prodanets, I. Application of integrated geodetic and UAV technologies for monitoring environmental changes due to the mining activities in Solotvyno salt mine, Ukraine. *Acta Monstanistica Slovaca*, Volume 29 (2), 2024. C.267-275. DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v29i2.03>

51. Khadka, A., Dhakal, S., & Budha, P. GIS Based Landslide Susceptibility Mapping along the Road Section from Bandeu to Barahabise, Sindhupal Chowk District of Nepal. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 7. 2018. 465–471.

52. Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: examples from the EC-FP7 project SAFER / Casagli N, Cigna F, Bianchini S, Hölbling D, Füreder P, Righini G, Del Conte S, Friedl B, Schneiderbauer S, Iasio C, Vlčko J, Greif V, Proske H, Granica K, Falco S, Lozzi S, Mora O, Arnaud A, Novali F, Bianchi M. *Remote Sens Appl Soc Environ* 4,92–108. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.07.001>

53. Mapping vulnerable urban areas affected by slow-moving landslides using Sentinel-1 InSAR Data / Bejar-Pizarro M, Notti D, Mateos RM, Ezquerro P, Centolanza G, Herrera G, Bru G, Sanabria M, Solari L, Duro J, Fernández J. *Remote Sens* 9,876– 893. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9090876/>

54. Massonnet D., Feigl K.L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Geophysical Research Letters*. 1998. Vol. 36. P. 441-500.

55. Method of Persistent Scatterer Pairs (PSP) and High Resolution SAR Interferometry / M. Costantini et al. *IGARSS*. 2009. № 3. P. 904-907.

56. Monitoring Mining Activities Using Sentinel-1A InSAR Coherence in Open-Pit Coal Mines / Wang, L., Yang, L., Wang, W., Chen, B., Sun, X. *Remote Sens*. 13, 4485. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13214485>

57. Monitoring of geodynamic processes in the tyša river basin using autel EVO II PRO RTK UAV. *Geodesy, cartography and aerial photography*. Issue 95, 2022. DOI: <https://doi.org/10.23939/istegcap2022.95.077>

58. Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements / T. Peternel et. al. *Landslides*. 2017. Vol. 4(1). P. 395-406

59. Petrov S. Compatible processing of results of high precision geometric levelling and inclination measurements. *Modern achievements of geodesic science and industry*. 2015. Issue 1 (29). P. 70-75

60. Richards M. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing. IEEE Aerospace and Electronic. 2007. Vol. 22, № 9. P. 5-29
61. Study of karst manifestations in Solotvyno based on aerial photography from a UAV / Volodymyr Hlotov atc. Reportson Geodesy and Geoinformatics, 2023, Vol. 115, pp. 27–34. DOI: 10.2478/rgg-2023-0004
62. The extensive geodetic system used for the monitoring of a 185 metre high arch dam in Southern Africa / Pretorius C. J., Schmidt W. F., van Staden C. S., Egger K. Session VI: Deformation monitoring and modelling of large dams. Orange. California, USA. 19-22 March. 2001. P. 203-213.
63. Tretyak, K. and Kukhtar D. Application of Sentinel-1 radar interferometric images for the monitoring of vertical displacements of the earth's surface affected by non-tidal atmospheric loading. *Geophysical Journal*, № 1. 2023. Vol. 45. 87-101
64. Urban area geodynamic risk mapping using long-term time series of Sentinel-1 satellite radar interferometry / Stankevich, S., Piestova, I., Titarenko, O., Filipovych, V., Samberg, A., Dudar, T.; Svideniuk, M. Information Security: An International Journal 40(1), 39-50. 2018. DOI: <https://doi:10.11610/isij.4003>
65. Wu M., Wang, H. F. Deformations and inferred stress field for ellipsoidal sources at Long Valley, California, 1975-1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1988. Vol. 93. P. 13285-13296.

# ДОДАТКИ

**Моніторинг деформацій (аерофотозйомка 2020–2021 років, село Біла Церква)**



**Каталог координат та висот пунктів Солотвино**

| Назва<br>пункту | Координати  |             | Висота   |
|-----------------|-------------|-------------|----------|
|                 | X           | Y           | Z        |
| SOL1            | 5305064,673 | 1328013,690 | 286,5520 |
| SOL2            | 5305262,075 | 1327235,803 | 281,9816 |
| SOLt7           | 5305253,909 | 1327223,653 | 281,7937 |
| SOL3            | 5305001,432 | 1327222,929 | 280,7608 |
| SOL4            | 5304910,044 | 1327381,982 | 272,9211 |
| SOL5            | 5304509,232 | 1327475,492 | 287,3017 |
| SOL6            | 5304388,248 | 1327629,473 | 291,5917 |

### Схема закладання нівелірних знаків (с.Біла Церква)



### Каталог координат та висот пунктів(с.Біла Церква)

| Назва пункту | Координати  |             | Висота   |
|--------------|-------------|-------------|----------|
|              | X           | Y           | Z        |
| BCt5         | 5305302,340 | 1333628,017 | 288,8524 |
| BCt4         | 5305318,054 | 1333645,101 | 288,8320 |
| BCt3         | 5305333,116 | 1333661,805 | 288,6437 |
| BC1          | 5305352,046 | 1333665,536 | 290,3436 |
| BC2          | 5305295,393 | 1333601,779 | 290,3236 |

## ДОДАТОК Д

