

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Дорош Любов Ігорівна

УДК 528.88

ДИСЕРТАЦІЯ
МОНІТОРИНГ ТЕХНОГЕННО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАСОБАМИ
РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

05.24.01 Геодезія, фотограмметрія та картографія
05 – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів, текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Л. І. Дорош

Науковий керівник Бурак Костянтин Омелянович – д.т.н., професор

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*

Б. Б. Паляниця

Львів – 2021

АНОТАЦІЯ

Дорош Л. І. Моніторинг техногенно-небезпечних об'єктів засобами радіолокаційної інтерферометрії.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія. Національний університет «Львівська політехніка». Львів. 2021.

У першому розділі обґрунтовано необхідність проведення моніторингу вертикальних зміщень на техногенно-небезпечних об'єктах та об'єктах інфраструктури. Розглянуто наявний світовий досвід застосування радіолокаційних даних в інженерно-геодезичній галузі.

Опрацьовано та доповнено схему застосування радіолокаційних систем для вирішення інженерно-геодезичних завдань.

Встановлено доцільність застосування космічної інформації для моніторингу за деформаціями земної поверхні, що мають на меті запровадження загальної системи аерокосмічного моніторингу змін об'єктів на земній поверхні. Запропоновано методичні рішення для підвищення оперативності, зменшення матеріальних та трудових витрат на стадії підготовчих та проєктних робіт під час проведення інженерно-геодезичних робіт на техногенно навантажених територіях. Сформульовано основні завдання досліджень, цілі та засоби їхньої реалізації.

У другому розділі подано теоретичні основи формування радіолокаційних знімків. Висвітлено основні принципи функціонування радіолокаційних систем та їхні характеристики. Проаналізовано джерела спотворень радіолокаційних знімків, причини їхнього виникнення та шляхи зменшення їхнього впливу на результати досліджень.

Розглянуто основні етапи опрацювання радіолокаційних знімків та прийняті методи для їхньої реалізації. Проведено порівняльний аналіз застосування методів постійних відбивачів (PS) та малих базисних ліній (SBAS) для опрацювання радіолокаційних знімків. Запропоновано

комплексну методику опрацювання радіолокаційних даних для моніторингу об'єктів техногенно-небезпечного характеру.

У третьому розділі виконано низку досліджень для підтвердження можливості застосування даних радіолокаційного знімання. Апробовано комплексну методику опрацювання радіолокаційних знімків на територію техногенно-небезпечного об'єкту – шахтного поля «Хотінь», Івано-Франківська область, Україна. Здійснено порівняльний аналіз результатів спостережень наземним (високоточним геометричним нівелюванням) та космічним (радіолокаційною інтерферометрією) методами на територію шахтного поля «Хотінь». Досліджено точність радіолокаційних вимірювань в залежності від типу підстильної поверхні знімання.

Встановлено точність визначення деформацій будівлі шляхом порівняльного аналізу даних радіолокаційної інтерферометрії з даними перманентної станції FRKV, що входить до мережі перманентних станцій System Solution.

Застосування технології радіолокаційної інтерферометрії за короткий період часу дозволило проаналізувати стан території шахтного поля «Хотінь» і виокремити ділянки з нетиповими деформаціями земної поверхні з метою подальшого детального уточнення абсолютних величин зсувів геодезичними методами.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, радіолокаційна інтерферометрія, деформації земної поверхні, лінійні залежності, методи PS та SBAS, статистичний аналіз, техногенно-небезпечні об'єкти.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в науковому періодичному виданні іншої держави, яке включено до міжнародної наукометричної бази даних

1. Estimation of earth's surface moves and deformation of the territory of mine "Khotin" of Kalush-Golinskyu field by method of radar interferometry / L. Dorosh

et. al. *Geodesy and cartography. Vilnius*. 2019. Vol. 45, Issue 1. P. 37– 42. (“Scopus”)

2. Research of influence of the earth’s subsidence outside the loads contour on the stability of the heigh position of the points of local leveling networks / L. Dorosh et. al. *Geodesy and cartography. Vilnius*. 2020. Vol. 46, Issue 1. P. 113– 122. (“Scopus”)

Стаття в наукових фахових виданнях України

1. Гера О., Гринішак М., Дорош Л. Чинники утворення мульд осідання земної поверхні у районах підземних гірничих виробок. *Технічні науки та технології*. 2021. № 2(24). С. 227-234.

Стаття в науковому неперіодичному виданні іншої держави

1. Study on perspectives of the interferometric synthetic aperture radar method to ensure the operational reliability of main gas pipelines on sites with complicated engineering-geological conditions / L. Dorosh et. al. *KSIĘGA JUBILEUSZOWA. Publikacje Wydziału Nauk Technicznych z okazji xx lat. Wyższej Szkoły Gospodarki Krajowej w Kutnie*. 2019. № I. P. 19–28.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Дослідження можливостей радарних супутникових даних для геодезичного моніторингу / Л.І. Дорош та ін. *Геопростір 2017: зб. тез 3-ої міжнародної науково-технічної конференції* (м. Київ, 4-6 грудня 2017 року). С.73-76.

2. Геодезичний моніторинг деформацій методом радарної інтерферометрії / Л. І. Дорош та ін. *Розвиток технічних наук: проблеми та рішення: зб. матеріалів міжнародної науково-практичної конференції* (м. Брно, Чеська Республіка, 27-28 квітня 2018 р.). Брно, 2018. С.168–171.

3. Оцінка зрушень і деформацій земної поверхні території рудника "Хотінь" Калуш-Голинського родовища / Л.І. Дорош та ін. *GEOFORUM 2019: зб. тез 24-ої міжнародної наук.-техн. конференції* (м. Львів, 10-12 квітня 2019 р.). Львів. С. 32-34.

4. Dorosh L., Gera O. Satellite monitoring of the mining lease areas using radar interferometry data. *GEOFORUM 2020*: зб. тез 25-ої міжнародної наук.-техн. конференції (м. Львів, 1-3 квітня 2020 р). Львів. С. 31–34.

5. Monitoring of mining branches according to satellite radar interferometry / L. Dorosh et. al. *GeoTerrace-2020*: collection of materials international conference of young professionals (t.Lviv, December 7-9, 2020 Ukraine). Lviv, 2020. P.1-5. (Scopus)

ANNOTATION

Dorosh LI Monitoring of technogenic-dangerous objects by means of radar interferometry.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering in the specialty 05.24.01 - Geodesy, Photogrammetry and Cartography. Lviv Polytechnic National University. Lviv. 2021.

The First Section substantiates the necessity of monitoring the vertical displacements at technogenically dangerous objects and infrastructure facilities. It considers the available world experience of using the radar data in the engineering-geodetic branch.

The scheme of applying the radar systems was worked out and supplemented to solve the engineering-geodetic assignments.

The reasonability of using cosmic information was established to monitor the deformations of the Earth's surface, which is aimed at introducing a general system of aerospace monitoring of changes in the objects located on the Earth's surface. The methodical solutions were suggested to increase the rate and reduce the material and labor expenses at the preparatory and engineering stage during engineering-geodetic works at the technogenically loaded territories. The main objectives of research, goals and means of their implementation have been formulated.

The Second Section presents the theoretical bases of radar imaging. It highlights the basic principles of radar systems functioning along with their characteristics. It analyzes the sources of radar image distortions, the reasons of their occurrence and ways of reducing their impact on the research results.

The main stages of radar image processing are studied therein, the methods for their implementation are adopted. The comparative analysis is performed with regard to applying the methods of permanent reflecting shields (PS) and small baselines (SBAS) for radar image processing. It offers a complex range of methods for radar data processing to monitor the technogenically dangerous objects.

The Third Section includes a number of research studies to confirm the possibility of using the data of radar imaging. The complex range of methods have been tried out to process the radar images at the territory of technogenically dangerous object - mine field "Khotin" in Ivano-Frankivsk oblast, Ukraine. The comparative analysis was performed based on the results of observations by surface method (high-precision geometric leveling) and spacial method (radar interferometry) at the territory of mine field "Khotin". The accuracy of radar measurements was defined depending on the type of possible surface imaging.

It defines the accuracy of determining the deformations in a building by comparative analysis between the radar interferometry data and the permanent station data FRKV, which is part of the network of permanent stations System Solution.

The application of radar interferometry technology within a short period of time has enabled to analyze the condition of mine field "Khotin" and separate the areas with atypical deformations on ground surface for detailed specification of absolute values of landslides that will be made afterwards by geodetic methods.

Keywords: remote sensing of the Earth, radar interferometry, deformations of the Earth's surface, linear dependences, PS and SBAS methods, statistical analysis, technogenically dangerous objects.

LIST OF PUBLICATIONS BY THE SUBJECT OF DISSERTATION

Publications in scientific editions of other countries, which are included in international science-computer databases

1. Estimation of earth's surface moves and deformation of the territory of mine "Khotin" of Kalush-Golinsky field by method of radar interferometry / L. Dorosh et. al. *Geodesy and cartography. Vilnius*. 2019. Vol. 45, Issue 1. P. 37– 42. (“Scopus”)
2. Research of influence of the earth's subsidence outside the loads contour on the stability of the heigh position of the points of local leveling networks / L. Dorosh

et. al. *Geodesy and cartography. Vilnius*. 2020. Vol. 46, Issue 1. P. 113– 122. (“Scopus”)

Publications in scientific professional editions of Ukraine

1. Gera O., Hrynishak M., Dorosh L. Factors of formation of ground surface deposit mold in areas of underground mining departments. *Technical sciences and technologies*. 2021. № 2(24). C. 227-234.

Publications in scientific editions of other countries

1. Study on perspectives of the interferometric synthetic aperture radar method to ensure the operational reliability of main gas pipelines on sites with complicated engineering-geological conditions L. Dorosh et. al. *KSIĘGA JUBILEUSZOWA. Publikacje Wydziału Nauk Technicznych z okazji xx lat. Wyższej Szkoły Gospodarki Krajowej w Kutnie*. 2019. № I. P. 19–28.

Proceedings that certify an improvement of thesis materials

1. Investigation of the Possibilities of Radar Satellite Data for Geodetic Monitoring / L. Dorosh et al. *Geospace 2017: coll. materials of the 3rd international scientific-technical. Conference (Kyiv, December 4-6, 2017)*. Kyiv, 2017. P.73–76.

2. Geodetic monitoring of deformations by the method of radar interferometry / L. Dorosh et al. *Development of Engineering Sciences: Problems and Solutions: coll. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Brno, Czech Republic, April 27-28, 2018)*. Brno, 2018. P.168–171.

3. Estimation of shifts and deformations of the earth's surface of the territory of the mine "Hotin" of Kalush-Golinsky deposit / L.I. Dorosh et. al. *GEOFORUM 2019: coll. abstracts of the 24th international scientific and technical conference (Lviv, April 10-12, 2019)*. Lviv. P. 32-34.

4. Dorosh L., Gera O. Satellite monitoring of the mining lease areas using radar interferometry data. *GEOFORUM 2020: coll. abstracts of the 25th international scientific and technical conference (Lviv, April 1-3, 2020)*. Lviv. P. 31– 34.

5. Monitoring of mining branches according to satellite radar interferometry / L. Dorosh et. al. *GeoTerrace-2020: collection of materials international conference*

of young professionals (t.Lviv, December 7-9, 2020 Ukraine). Lviv, 2020. P. 1-5.
(Scopus)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	12
ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1. СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	20
1.1. Необхідність проведення моніторингу деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів	21
1.2. Класифікація методів вимірювань деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів	25
1.3. Аналіз методів вимірювання деформацій земної поверхні	32
ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ	42
РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ОПРАЦЮВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ДАНИХ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ	45
2.1. Особливості застосування радіолокаційного зондування Землі ...	45
2.2. Аналіз спотворень радіолокаційних знімків	52
2.3. Формування зображень радіолокаційних спостережень	55
2.4. Комплексна методика диференціального інтерферометричного опрацювання часових рядів	60
ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ	69
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ТА ПРИПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ	71
3.1. Моніторинг деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів методами радіолокаційної інтерферометрії	71
3.2. Застосування комплексної методики на підставі методів PS та SBAS для оцінки стану території шахтного поля «Хотінь»	71
3.3. Порівняльний аналіз результатів радіолокаційних та наземних спостережень для оцінки стану шахтного поля «Хотінь»	82
3.4. Застосування методу PS для оцінки вертикальних деформацій будівлі	97
3.5. Аналіз оцінювання надійності будівель за даними радіолокаційної інтерферометрії	104

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	123
ВИСНОВКИ	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	130

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

DInSAR (Differential interferometric synthetic aperture radar)	Диференціальні інтерферометричні радіолокатори з синтезованою апертурою
GNSS (Global Navigation Satellite System)	Глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС)
H	Горизонтальна поляризація
InSAR (Interferometric synthetic aperture radar)	Інтерферометричний синтетичний апертурний радіолокатор
PS (Persistent Scatterers)	Метод інтерферометрії постійних розсіювачів радіолокаційного сигналу
SAR (Synthetic-aperture radar)/ PCA	Радіолокатор із синтезованою апертурою
SBAS (Small Baselines Series)	Метод інтерферометрії серій малих базисних ліній
SLC (Single-Look Complex)	Комплексне зображення першого рівня
V	Вертикальна поляризація
БПЛА	Безпілотний літальний апарат
ГІС	Геоінформаційні системи
ДЗЗ	Дистанційне зондування Землі
ЕМ	Електромагнітне випромінювання
ЗВЕ	Загальний вміст електронів
ІФНТУНГ	Івано-Франківський національний університет нафти і газу
КА	Космічний апарат
НС	Надзвичайні ситуації
ПЕПР	Питома ефективна поверхня розсіювання
РЛС	Радіолокаційні системи
РЛЗ	Радіолокаційний знімок
СКП	Середньоквадратична похибка
ЦММ	Цифрова модель місцевості
ЦМР	Цифрова модель рельєфу

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

Згідно з даними Національних доповідей про стан техногенної та природної безпеки в Україні, внаслідок надзвичайних ситуацій (НС) геологічного характеру держава зазнає багатомільйонних збитків [45, 46]. Процеси деформації земної поверхні загрожують важливим об'єктам інфраструктури території: будівельним спорудам, лініям електропередач, автодорогам, залізниця, газопроводам, водогонам тощо.

Зокрема, протягом останніх років у межах Калуш-Голинського та Стебницького родовищ калійної солі на Передкарпатті (Івано-Франківська область) спостерігається тенденція до активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів, таких як: зсуви, просідання поверхні землі, карстопровальні явища. Карстові провали утворюються як на території шахтних полів, так і в прибортових частинах територій родовищ.

Унаслідок прийнятих свого часу неправильних рішень щодо розробки родовища, розташування й експлуатації хвостосховищ, відвалів, акумуляційних місткостей та способу ліквідації шахтних порожнин, що утворилися в результаті господарської діяльності хімічних підприємств у Калуському районі, було порушено екологічну рівновагу в товщі гірських порід Калуш-Голинського родовища калійних солей. Зокрема, деякі підземні шахти були засипані твердими матеріалами для того, щоб підтримувати розроблені порожнини, більшість з яких була заповнена розсолем, частина – прісною водою. Однак заповнення шахт розсолем не гарантує стійкості проміжних колон. Внаслідок руйнації цих колон земля над шахтою просідає. Як правило, це повільний, поступовий процес, який спричинив численні провали земної поверхні над площею шахтних полів у Калуші, руйнування будинків і комунікацій, засолення водоносних горизонтів у місті, селах Кропивник і Сівка-Калуська [45, 46].

У лютому 2010 року відбулося засідання Ради національної безпеки і оборони України розгляду питань про екологічну ситуацію м. Калуш, за

підсумками якого були прийняті Указ Президента «Про оголошення територій міста Калуш та сіл Кропивник і Сівка-Калуська Калуського району Івано-Франківської області зоною надзвичайної екологічної ситуації» і Закон на його підтвердження. Указом і законом передбачалося, що Кабінет міністрів України повинен був терміново забезпечити у зоні надзвичайної екологічної ситуації добровільне відселення людей з територій просідання земної поверхні, утворення провальних вирв, карстів, зсувів ґрунтів, з обов'язковим забезпеченням їх житловими приміщеннями для тимчасового, а надалі постійного проживання; здійснення запобіжних заходів щодо недопущення забруднення джерел питного водопостачання; здійснення технічних заходів з укріплення, гідроізоляції, зменшення динаміки приросту розсолів у Домбровському кар'єрі калійних руд.

Парламентський адвокат у Молдові Аурелія Григоріу заявив, що ситуація, що склалася на Домбровському кар'єрі в Калуші Івано-Франківської області, де необмежено набираються засолені води, утворився відстійник для небезпечних токсичних речовин та існує неукріплена дамба, що може спричинити екологічну катастрофу, внаслідок якої до Дністра потраплять близько 2 млн м³ отрутохімікатів, а Молдова (особливо м. Кишинів) та частина Одеської області можуть залишитись без питної води.

Для того щоб контролювати перебіг таких процесів та оперативно впроваджувати відповідні заходи, необхідно забезпечити моніторинг розвитку цих процесів.

Оскільки визначення активних (аномальних) зон деформацій земної поверхні геодезичними та геофізичними методами є часозатратними та дороговартісними, варто доповнити традиційні методи спостережень шляхом залучення сучасної технології – радіолокаційної інтерферометрії. Використання цієї технології під час виконання інженерно-геодезичних робіт остаточно не врегульоване, тому постає потреба у виявленні альтернативних методик. Метою таких досліджень є висвітлення нерозкритих аспектів застосування радіолокаційної інтерферометрії, а саме: 1) питання вибору радіолокаційної системи та режиму виконання знімання; 2) питання вибору

методу опрацювання радіолокаційних знімків під час моніторингу деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів, для досягнення регламентованої точності. З огляду на науковий, економічний та екологічний аспекти тема дисертаційного дослідження є, безперечно, актуальною, а здобутки можуть стати в нагоді широкому колу фахівців.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження, результати яких відображені у дисертаційній роботі, виконані відповідно до наукового напрямку кафедри геодезії та землеустрою Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу «Геодезичне та землевпорядне забезпечення збалансованого розвитку територій». Результати досліджень пов'язані з госпдоговірними та науково-дослідними державно-бюджетними темами: «Геодезичний контроль експлуатаційної надійності будівель та споруд і техногенного обладнання об'єктів паливно-енергетичного комплексу» (№ держ. реєстр. 0115U007099, 2015-2017 рр.) та «Оцінка сучасного стану та прогнозування розвитку деформацій ґрунту на ділянці проходження магістрального газопроводу в зоні впливу шахтного поля «Хотінь» рудника «Калуш» (№ держ. реєстр. 0117U006758), що провадилися на кафедрі геодезії та землеустрою.

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є обґрунтування доцільності застосування засобів дистанційного зондування Землі для вивчення характеристик земної поверхні та приповерхневих об'єктів, на основі яких можна проводити моніторинг деформацій земної поверхні.

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

- здійснити аналіз світового досвіду застосування радіолокаційних даних у картографічній та інженерно-геодезичній галузях;
- проаналізувати методи опрацювання радіолокаційних даних для моніторингу деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів;

- опрацювати комплексну методику радіолокаційної інтерферометрії для розв’язання інженерно-геодезичних завдань;
- дослідити вплив різних типів підстильної поверхні на результати радіолокаційних вимірювань;
- виконати порівняльний аналіз результатів радіолокаційної інтерферометрії з даними високоточного геометричного нівелювання для оцінки зрушень і деформацій земної поверхні на прикладі шахтного поля «Хотінь»;
- виконати оцінку надійності будівель (споруд) за результатами радіолокаційної інтерферометрії та за даними перманентної станції GNSS для виявлення деформацій будівлі на прикладі корпусу № 5 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ);
- обґрунтувати загальний підхід застосування радіолокаційних знімків для виконання моніторингу за деформаціями земної поверхні та прибудинкових територій.

Об’єкт дослідження

Об’єктом дослідження є процеси та явища, пов’язані з оцінкою зрушень і деформацій земної поверхні та приповерхневих об’єктів на прикладі шахтного поля «Хотінь» Калуш-Голинського родовища та корпусу № 5 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Предмет дослідження

Предметом дослідження дисертаційної роботи є методи та технології моніторингу вертикальних зміщень техногенно-небезпечних об’єктів на підставі радіолокаційних знімків.

Методи дослідження

Дисертаційна робота базується на комплексному використанні загальнонаукових методів: монографічного – для вивчення актуального стану використання даних радіолокаційної інтерферометрії для вирішення інженерно-геодезичних завдань у вітчизняній та зарубіжній практиці; статистичних методів математичного опрацювання геодезичних спостережень

та порівняльного аналізу отриманих результатів; комп'ютерних технологій – для опрацювання даних радіолокаційної інтерферометрії та їх порівняння; методів радіолокаційної інтерферометрії, зокрема методу постійних розсіювачів (PS) та методу малих базисних ліній (SBAS), – для опрацювання радіолокаційних знімків. Інформаційною базою досліджень слугували статистичні дані, фондові матеріали, польові дослідження автора.

Наукова новизна одержаних результатів:

– проведено аналіз методів постійних розсіювачів радіолокаційного сигналу (PS) та серії малих базисних ліній (SBAS) для опрацювання радіолокаційних інтерферограм;

– запропоновано комплексну методику опрацювання радіолокаційних даних для моніторингу техногенно-небезпечних об'єктів;

– досліджено точність радіолокаційних вимірювань для об'єктів із різним типом підстильної поверхні;

– обґрунтовано використання технології радіолокаційної інтерферометрії для прогнозування техногенних катастроф.

Практична цінність одержаних результатів

На підставі результатів досліджень встановлено можливості використання даних радіолокаційного знімання під час спостережень за осіданнями земної поверхні на промислових об'єктах. Запропоновані методичні рішення сприяють підвищенню оперативності та зменшенню матеріальних і трудових витрат на стадії підготовчих та проектних робіт у процесі виконання інженерно-геодезичних робіт на техногенно-небезпечних об'єктах. Застосування даних радіолокаційної інтерферометрії відкриває можливості контролювати і вживати своєчасні заходи для попередження техногенних катастроф, нерационального використання природних ресурсів тощо.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропоновані методика, рекомендації можуть бути використані як

науковцями, так і спеціалістами галузі народного господарства «Геологія і розвідка надр, геодезична і гідрометеорологічна служби».

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес на кафедрі геодезії та землеустрою Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу для підготовки фахівців за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій», зокрема для викладання дисциплін «Інженерна геодезія» і «Фотограмметрія та дистанційне зондування».

Основні положення, що виносяться на захист.

1. Комплексна методика використання радіолокаційної інтерферометрії для моніторингу об'єктів техногенно-небезпечного характеру.
2. Дослідження ефективності використання фільтра Гольдштейна для опрацювання радіолокаційних знімків.
3. Аналіз точності використання даних радіолокаційної інтерферометрії для різних типів об'єктів.

Особистий внесок здобувача

Основні положення та результати досліджень дисертаційної роботи, висновки та пропозиції одержані автором самостійно. У роботі проаналізовано можливості використання космічних знімків для забезпечення проведення інженерно-геодезичних робіт, виконано низку експериментальних досліджень для визначення деформацій земної поверхні на прикладі шахтного поля «Хотінь». Запропоновано комплексну методику опрацювання радіолокаційних знімків для розв'язку інженерно-геодезичних завдань.

Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві, такий: оцінено точність визначення динаміки деформацій споруди [13, 19]; опрацьовано дані радіолокаційної інтерферометрії та перманентної станції GNSS та виконано аналіз результатів [19]; апробовано запропоновану методику опрацювання радіолокаційних знімків для визначення вертикальних зміщень на ділянці дослідження [15, 74]; проведено порівняльний аналіз результатів серій спостережень наземним геодезичним методом з даними радіолокаційної інтерферометрії для підтвердження

наявності зони активних осідань на територіях гірничих виробок [15, 20, 50, 74, 107]; створено графіки осідань земної поверхні території шахтного поля «Хотінь» [107]; проведено опрацювання радіолокаційних даних методами PS та SBAS [19, 94, 107]; проведено розрахунок осідань фундаментів методом еквівалентного шару ґрунту [104].

Апробація результатів дисертації

Основні теоретичні та експериментальні результати досліджень дисертаційної роботи представлені у доповідях та обговорювалися на:

1. 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Геопростір 2017», м. Київ, 4-7 грудня 2017 р.
2. Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток технічних наук: проблеми та рішення», м. Брно, Чеська Республіка, 27-28 квітня 2018 р.
3. XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «GEOFORUM'2019», Львів – Брюховичі – Яворів, 10-12 квітня 2019 р.
4. XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «GEOFORUM'2020», Львів – Брюховичі – Яворів, 1-3 квітня 2020 р.
5. Міжнародній науково-технічній конференції «Geoterrace-2020», Львів, 07-09 грудня 2020 р.
6. XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «GEOFORUM'2021», Львів – Брюховичі – Яворів, 9-11 червня 2021 р.

Публікації. Результати досліджень за темою дисертації опубліковані в 9 працях, зокрема: одна – у науковому неперіодичному виданні іншої держави (Польща); дві – у науковому періодичному виданні іншої держави, яке включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, одна – у науковому фаховому виданні України та п'ять – у збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (120 найменувань). Загальний обсяг дисертації становить 141 сторінка, ілюстрації складають: 56 рисунків, 13 таблиць.

РОЗДІЛ 1. СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Сьогодні найдоступнішим та найбільш актуальним видом просторових даних є космічні знімки високого та середнього просторового розрізнення [30, 31, 32]. Застосування космічних знімків здебільшого дає змогу приймати обґрунтовані та своєчасні рішення [57]. Сучасні способи отримання картографічного матеріалу на основі супутникових знімків, їхня доступна (або помірна, конкурента) вартість відкривають нові горизонти для їхнього широкого впровадження [36].

Зі зростанням зацікавлення до продукції супутникових систем збільшується і кількість досліджень, спрямованих на визначення придатності космічних знімків для розв'язання тих чи інших науково-практичних завдань у різних сферах людської діяльності [116].

Технології отримання даних дистанційного зондування, їхнє подальше опрацювання та інтерпретація постійно розвиваються на основі синергетичних підходів. Способи отримання космічних знімків земної поверхні, особливості їхнього опрацювання і використання розглянуто у працях таких вчених як: О. Барладін, Х. Бурштинська, О. Дорожинський, М. Косарєв, А. Кучейко, В. Лялько, А. Лященко, В. Мишляєв, В. Соїфера, С. Ясенєв, Г. Шліхт, Mirko Ahmadfaraj, С. Ünsalan, L. Kim Boyer та інших.

Сьогодні застосування даних дистанційного зондування для аналізу рельєфу місцевості є пріоритетною тенденцією для багатьох галузей діяльності, таких як картографія, будівництво, промисловість, сільське господарство та наукові дослідження.

Останнім часом все більше уваги почали приділяти радіолокаційній інтерферометрії, оскільки застосування даної технології дає змогу виконувати просторовий моніторинг горизонтальних і вертикальних деформацій поверхні. Особливо актуальними є спостереження за динамікою рухів поверхні

техногенно-навантажених територій, де розташовані об'єкти енергетичного комплексу, греблі, мости та тунелі, родовища корисних копалин тощо, які вимагають ведення періодичних спостережень.

Для ефективного здійснення моніторингу вертикальних зміщень техногенно-небезпечних об'єктів з використанням сучасних приладів та технологій необхідне розроблення нових та вдосконалення існуючих методів проведення вимірювань.

1.1. Необхідність проведення моніторингу деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів

Протягом ХХ та на початку ХХІ століття відбулися значні техногенні катастрофи на підприємствах з видобутку корисних копалин (руйнівні землетруси на Нефтегорська, Охи (Росія), Газлі (Узбекистан), на підприємствах хімічної промисловості (Індія, Італія, США, Мексика), об'єктах паливо – енергетичного комплексу (Чорнобильська (Україна) та Фукусімська (Японія) АЕС, СаяноШушенській (Росія)). Це призвело до величезних людських жертв та великих матеріальних і моральних втрат. До прикладу, під дією незначних поштовхів Нефтегорськ практично був стертий з лиця землі, практично усі будівлі перетворилися на купу уламків. Під ними залишалися заживо похованими понад 2300 осіб. Дістати живими вдалося трохи більше 400 осіб, 37 з яких померли в лікарні. Також у результаті руйнування греблі на гідроелектростанції Banqiao від затоплення прилеглих територій загинуло 14 600 чоловік. Ще 145 000 померло від голоду та епідемій, близько 11 000 000 залишилося без житла. Уникнути або мінімізувати такі втрати можливо лише за умови організації комплексного вивчення стану техногенно-навантажених територій. Для цього необхідно враховувати не тільки техногенні та екзогенні фактори впливу на досліджувану територію, але й вплив природних геодинамічних процесів, які відбуваються на цих територіях.

Тому вивчення рухів земної поверхні, поряд з великим значенням для фундаментальної галузі наук про Землю, відіграє важливу роль у вирішенні

найважливішої прикладної проблеми – запобігання природотехнічних катастроф на техногенно-навантажених об'єктах. До таких об'єктів можна віднести території підприємств з видобутку корисних копалин (користування надрами), території АЕС і ГЕС, ключові транспортні елементи (тунелі, мости), екологічно небезпечні підприємства, деякі оборонні об'єкти тощо [63].

За останні десятиліття на гірничих підприємствах з видобутку твердих корисних копалин в Україні відбулися значні техногенні катастрофи. Так на початку жовтня 2018 року в зоні розробок підприємства “Полімінерал” (Стебник, Львівська область) над старою карстовою порожниною обвалилося склепіння. Локація обвалу в діаметрі склала 300 метрів, глибина – до 50 метрів.

До об'єктів підвищеної екологічної небезпеки в зоні виробничої діяльності Калуського гірничопромислового комплексу відносять перш за все рудники «Калуш», «Голинь» і «Ново-Голинь», Домбровский кар'єр, солевідвали №1 і №4 Домбровського кар'єру, хвостосховища №1 і №2 та акумулюючі ємності. Мапа цих об'єктів зображена на рисунку 1.1.

Вивченням впливу розробки Калуського гірничопромислового комплексу на геологічне середовище займалися А.М. Гайдін, В. В. Долін, І.Ю. Костів, Е.Д. Кузьменко, Я.М. Семчук, Л.Є. Шкіца, Є.О. Яковлев та інші.

Оскільки експлуатація підземних шахт для видобування калійних солей іноді спричиняла просідання підземних шахтних полів, то для уникнення цієї проблеми деякі підземні шахти засипали твердими матеріалами для того, щоб підтримувати розроблені порожнини, більшість з яких була заповнена розсолем, частина – прісною водою. Але заповнення шахт розсолем не гарантувало стійкості проміжних колон. Внаслідок руйнації цих колон земля над шахтою просідає. Як правило, це повільний, поступовий процес, який спричинює хвилясту деформацію землі.

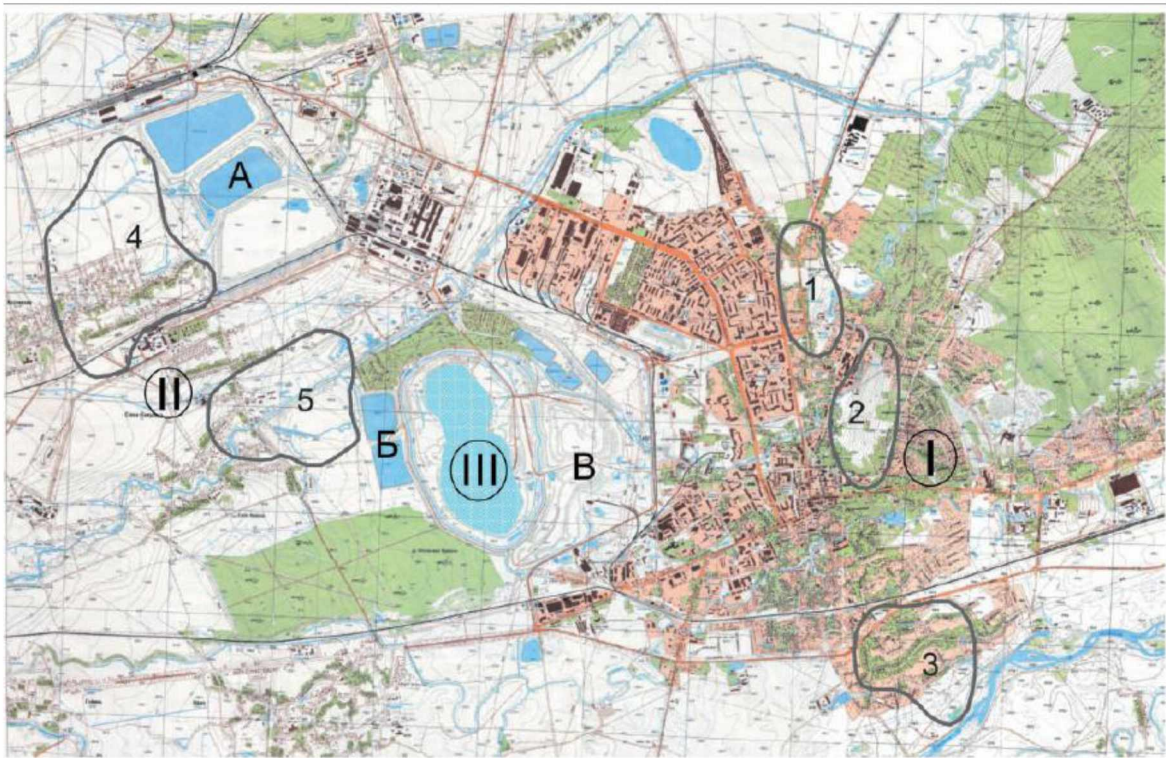


Рис. 1.1. Оглядова карта Калуш–Голинського родовища
 Рудники: I – “Калуш”, II – “Нова Голинь”, III – Домбровський кар’єр;
 шахтні поля: 1 – Північне каїнітове, 2 – Центральне каїнітове, 3 –
 Хотінське силвінітове, 4 – Східна Голинь, 5 – Сивка–Калуська;
 А – хвостосховища, Б – акумулюючі ємності, В – відвали кар’єру

У 1986 році сейсмічна активність зумовила раптові розломи. Це явище пов’язане зі зсувами вздовж тріщин або зрушеннями в землі. На ділянках з активними деформаціями земної поверхні відбулося засолення земель, оскільки розсіл, використаний для заповнення шахт, був витиснений з шахтних порожнин до поверхні.

На шахтних полях відбуваються осідання земної поверхні та просадко–провальні процеси з утворенням солоних озер за рахунок розсолів, витіснених із підземних порожнин. Територія навколо солевідвалів, хвостосховищ та акумулюючих ємностей є досить незахищеною від природніх опадів, які розчиняють галіти та надалі інфільтруються у водоносний горизонт. Таким чином, екологічна небезпека означеної території полягає в засоленні горизонту підземних вод, подальшому руху цих вод у природному напрямку

та забрудненні річкової системи басейну р. Дністер. Окрім того, забруднення водоносного горизонту загрожує функціонуванню водозабірних споруд, які постачають питну воду в місто Калуш.

Для визначення деформацій будівлі обрано корпус № 5 Івано-Франківського національного університету нафти і газу (рис. 1.2) (ІФНТУНГ), якому понад 50 років.



Рис. 1.2. Територія Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

З історії відомо, що у 1960 році за наказом МВ і ССО СРСР у Станіславі (нині Івано-Франківськ) було відкрито загальнотехнічний факультет Львівського політехнічного інституту, на базі якого у 1963 році був організований Івано-Франківський філіал Львівського політехнічного інституту. У 1967 році на його базі було відкрито Івано-Франківський інститут нафти і газу (ІФІНГ).

Корпус № 5 ІФНТУНГ зведено на стійких та надійних ґрунтах, породи яких представлені на рис. 1.3.

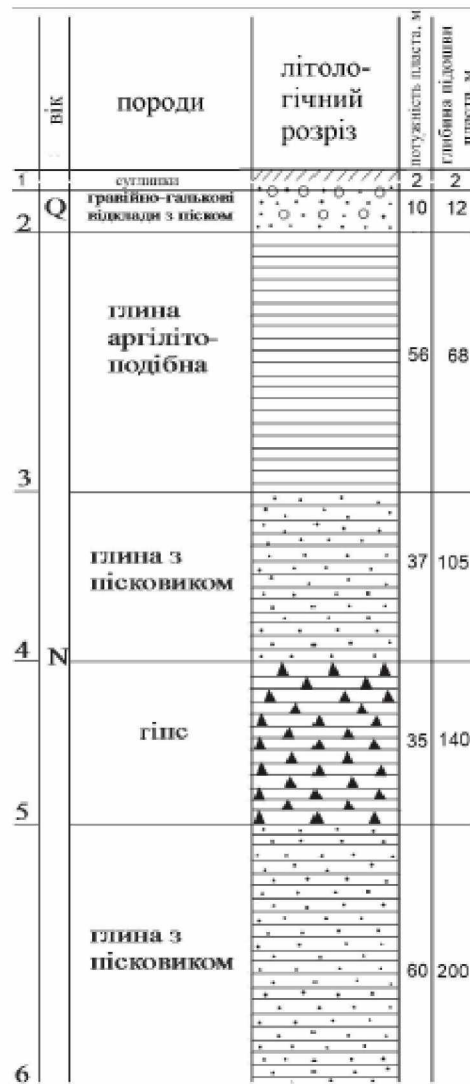


Рис. 1.3. Літолого-стратиграфічна колонка для свердловини неподалік навчального корпусу ІФНТУНГ № 5

Четвертинні відклади представлені суглинками та гравійно-гальковими відкладами з піском. Товщина порід сягає 12 м. В інтервалі глибин 12-68 м глина аргілітоподібна, 68-105 м – глина з пісковиком, в інтервалі 105-140 м – гіпс, 140-200 м – глина з пісковиком [64].

1.2. Класифікація методів вимірювань деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів

Внаслідок конструктивних особливостей, природних умов і діяльності людини, земна поверхня та приповерхневі об'єкти в цілому і їхні окремі елементи отримують різного виду деформації. У загальному випадку під терміном «деформація» розуміють змінення форми об'єкта спостережень. У

геодезичній практиці прийнято розглядати деформацію як зміну положень об'єкта відносно якого-небудь первісного. Спостереження за зсувами, осіданнями і деформаціями земної поверхні та приповерхневих об'єктів мають велике значення для своєчасного запобігання їхнього руйнування або своєчасного сигналу про настання аварійної ситуації. Спостереження за деформаціями земної поверхні та приповерхневих об'єктів можна здійснювати шляхом геодезичних, геотехнічних, геологічних та геофізичних методів [69].

Геологічні методи (морфометричні, геохімічні) (рис. 1.4) дають змогу визначити зміни земної поверхні на основі кількісних та якісних характеристик порід і тектоніки регіону, на підставі чого з'ясовують умови формування рельєфу. Ці методи використовуються для періодичних вертикальних рухів, тривалість яких сягає більше тисячі років [8].

Геофізичні методи ґрунтуються на вивченні тих фізичних сил на поверхні Землі, які впливають на стійкість рельєфу. До геофізичних методів вивчення деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів відносяться сейсмічні, магнітні та гравітаційні методи. Сейсмічні методи базуються на вивченні структури середовища і швидкості поширення пружних хвиль в ньому, які виникають не тільки під час природних джерел (землетрусів), а й штучних джерел (вибухів тощо). В основу магнітного методу лягли особливості розподілу магнітного поля і його просторово-часових варіацій, викликаного гірськими породами, які володіють різною намагніченістю. Гравітаційний метод заснований на вивченні поля сили тяжіння Землі, його просторової зміни і його градієнтів, які відображають густинні неоднорідності в надрах планети [9].

Основними перевагами цих методів є: можливість визначати зміщення та деформації земної поверхні за значні інтервали часу; відтворювати ці рухи на якийсь період минулого. Суттєвим недоліком геологічних та геофізичних методів є те що, отриманий результат відображає якісну характеристику вертикальних зміщень і лише їх відносну кількісну оцінку.

Геотехнічні методи (нахиломірні та акселерометричні спостереження) ґрунтуються на принципі горизонтального маятника, підвішеного на двох нитках. Із поєднанням геодезичних методів спостережень за вертикальними зміщеннями з геотехнічними можна підвищити ефективність результатів.



Рис. 1.4. Класифікація методів моніторингу за деформаціями земної поверхні

Геодезичні методи поділяються на наземні, наземно-дистанційні (ГНСС – метод, фотограмметричні методи) та дистанційні (InSAR, аерокосмічні методи) (рис. 1.5) [5].

У сучасній геодезичній практиці високоточне геометричне нівелювання широко застосовуються не тільки для визначення висот точок нівелірних мереж державного чи місцевого значення, а і визначення вертикальних рухів земної кори. Висоти спеціальних опорних та знімальних нівелірних мереж визначають із високоточного геометричного нівелювання для спостереження за осіданням земної поверхні та інженерних споруд.

Геометричне нівелювання застосовують для створення державної висотної мережі, висотного обґрунтування топографічних знімачів, а також при проектуванні і будівництві інженерних споруд, при спостереженні за деформаціями інженерно-геодезичних споруд тощо. Перевагою даного методу є те, що високоточне геометричне нівелювання на даний час є одним із

найточніших методів спостереження за деформаціями земної поверхні. До недоліків можна віднести вплив людського фактору під час вимірювання, низький рівень автоматизації процесу вимірювання [14].

Спосіб тригонометричного нівелювання дозволяє визначати осідання точок, розташованих на істотно різних висотах, у важкодоступних місцях. Такі випадки виникають при спостереженнях за високими будівлями (спорудами), вежами, греблями, при проведенні вимірів через перешкоди. Однією з переваг використання тригонометричного методу є – застосування сучасних високоточних електронних тахеометрів на територіях з великим перепадом висот між пунктами спостережень; зменшення витрат часу та матеріальних ресурсів у порівнянні з геометричним нівелюванням. Головним недоліком даного методу є вплив рефракції на отримані результати.



Рис. 1.5. Класифікація методів геодезичного моніторингу за деформаціями земної поверхні та приповерхневих об'єктів

Спосіб мікронівелювання використовують при спостереженнях за взаємним висотним положенням близько розташованих точок на відстані 1 - 1,5 м. Даний спосіб часто застосовують при вивченні осідань і нахилів

окремих конструкцій, а саме: фундаментів, балок, ферм, технологічного устаткування. Точність мікронівеліра характеризується середньою квадратичною похибкою визначення перевищення, яка є рівною 0,01 мм. Цей метод є найточнішим, а вагомим недоліком є обмежене коло застосування мікронівелювання – лише при контролі параметрів окремих конструкцій споруд [14].

Гідронівелювання забезпечує таку ж точність, як і геометричне нівелювання, але дозволяє створювати стаціонарні автоматизовані системи з дистанційним зніманням інформації. При використанні гідростатичного нівелювання застосовують різні системи, конструкція яких залежить від умов проведення робіт, необхідної точності та від способу вимірювання положення рівня рідини відносно відлікових штрихів вимірювальних посудин.

Гідростатичне нівелювання застосовують для вимірювань відносних вертикальних переміщень великої кількості точок, важкодоступних для вимірювання іншими методами, а також у випадках, коли немає прямої видимості між марками або коли на місці виконання вимірювальних робіт за умовами техніки безпеки неможливо знаходитись людям [14, 21]. Аналізуючи використання гідронівелювання можна виділити основні переваги, а саме (рис 1.3): використання даних систем на об'єктах, де перебування людини небажано або взагалі виключається; одержання інформації про стан об'єкту в реальному часі. До недоліків даного методу слід віднести: необхідність врахування інструментальних помилок та помилок зовнішнього середовища для одержання результатів високої точності; застосування гідросистем налічує ряд організаційних та технологічних труднощів під час вимірювання.

До наземно-дистанційних методів можна віднести фотограмметричні методи знімання, а також лазерне сканування. Фотограмметричні методи передбачають застосування фототеодолітів або цифрових камер для фотознімання об'єкта. Визначення деформацій осідань цими способами полягає у вимірюванні різниці координат точок споруди, що знайдені на фотознімках початкового (або попереднього) циклу та фотознімках

деформаційного (або наступного) циклів. Деформації визначаються в одній вертикальній площині, тобто в площині, паралельній площині фотознімка. Для обчислення деформацій, крім вимірювань координат або паралаксів, на знімках необхідно знати відстань фотокамери від об'єкта та фокусну відстань об'єктива фотокамери. Перевагою фотограмметричних методів над іншими існуючими методами спостережень за деформаціями земної поверхні є: висока швидкість проведення вимірювань, мінімальні затрати часу перебування у «польових умовах». Вагомим недоліком даних методів є невисока точність отриманих результатів.

Слідом за сучасними комп'ютерними програмами та електронними геодезичними приладами приходять інноваційні методи дослідження територій. Один з таких нових способів отримувати більш точні і детальні дані при проведенні геодезичних робіт належить лазерне сканування. З його допомогою можна віддалено вести знімання певних об'єктів або територій в тривимірній площині. Воно характеризується високою швидкістю роботи, що лежить в діапазоні від 5 000 до 1 000 000 вимірів за секунду, високою щільністю точок на поверхні об'єкта (тисячі або сотні тисяч точок) більш високою точністю вимірювання, безконтактністю з об'єктом досліджень, який може бути важкодоступним і небезпечним для людини (встановлення відбивної призми, рейки, як у разі тахеометричного знімання). Ще однією істотною перевагою цього методу є те, що лазерне сканування дає змогу збирати інформацію про досліджуваний об'єкт у цифровому вигляді.

Інтенсивний розвиток космічної навігації дозволив створити супутникові методи точного визначення координат рухомих в просторі об'єктів, одним із таких методів є GNSS. При цьому використовується сузір'я супутників, координати яких ідентифікуються в будь-який момент часу з метою визначення навігаційних даних рухомих різнотипних об'єктів наземного, морського і повітряного базування з міліметровою точністю. Завдяки цьому цей метод набув широкої популярності при проведенні різного роду досліджень. На даний час існує мережа перманентних станцій розташованих

по всій Землі. В результаті спостережень можна отримати величину деформації земної поверхні в горизонтальній і вертикальній площинах. В порівнянні з іншими методами геодезичного моніторингу методи GNSS мають ряд переваг: безперервний моніторинг; висока точність та оперативність вимірів; високий рівень автоматизації виконання вимірювань. До недоліків GNSS-методу можна віднести: необхідність враховувати зміни фазового центру антени на перманентних станціях при їх заміні; стійкість самих перманентних станцій.

До дистанційних методів спостережень за деформаціями земної поверхні та приповерхневих об'єктів можна віднести аерокосмічні методи [34, 61]. Існують два способи дистанційного вивчення властивостей земної поверхні та їхніх змін аерокосмічними методами: за допомогою оптико-електронних і радіолокаційних систем. Для проведення аерокосмічного моніторингу територій застосовуються різноманітні космічні апарати, повітряні засоби (літаки, вертольоти, безпілотні літальні апарати, дирижаблі), оснащені широким набором пасивної і активної апаратури, а також геофізичною апаратурою, засобами зв'язку, наземними засоби прийому супутникових даних [2, 10, 56].

Оптико-електронні системи використовують пасивне відбите випромінювання земної поверхні у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах [34, 56]. У таких системах випромінювання потрапляє на відповідні датчики, що генерують електричні сигнали в залежності від інтенсивності випромінювання.

Суть радіолокаційних систем (РЛС) полягає у використанні власного джерела випромінювання, яке виробляється спеціальним генератором, та фіксації його часу повернення в приймач [22].

Перевагами цього методу є: значна економічна ефективність при моніторингу великих територій земної поверхні; одержана інформація є наглядною та зручною для подальшого опрацювання; До недоліків слід віднести: значну (на даний час) вартість знімків; невелику кількість супутників.

Використання аерокосмічних методів дистанційного зондування земної поверхні для геодезичного моніторингу має ряд переваг (рис.1.5): економічно-ефективний при застосуванні спостережень великих територій земної поверхні; отримана інформація є наглядною та зручною для подальшого опрацювання. Вагомим недоліком є даного методу є невисока точність одержуваної інформації.

Проаналізувавши вищезгадані методи моніторингу за деформаціями земної поверхні можна зробити наступні висновки:

- 1) жоден із перелічених методів не є універсальним і має як позитивні так і негативні особливості, тому для моніторингу за деформаціями земної поверхні доцільно поєднувати різноманітні геодезичні та геотехнічні методи спостережень;
- 2) найбільш ефективним методом спостережень за деформаціями земної поверхні є GNSS-метод;
- 3) надалі альтернативним методом може стати метод радіолокаційної інтерферометрії (при здешевленні вартості знімків).

1.3. Аналіз методів вимірювання деформацій земної поверхні

Спостереження за сучасними геодинамічними рухами Землі відіграє основну роль у запобіганні природотехнічних катастроф на територіях не тільки гірничо-промислових комплексів із видобутку, переробки і транспортування корисних копалин, а також під час зведення інженерно-геодезичних споруд, будівель на земній поверхні. Оскільки на таких територіях виникає руйнування промислових та житлових будівель, інженерних споруд, транспортних та підземних комунікацій.

Осідання земель, спричинене гірничорудними роботами, є однією з основних категорій щодо вимірювань деформації. У багатьох районах світу відбувається осідання (або піднесення) через видобуток води, газу, нафти, солі чи інших мінеральних ресурсів. До того ж, будівельні роботи, такі як прокладання тунелів, часто спричиняють просідання, що призводить до

пошкодження інфраструктури, завдає шкоди довкіллю і навіть призводить до загибелі людей.

На сьогодні для вимірювання переміщення земної поверхні доступні різні методи та інструменти: починаючи з інклінометрів [12, 75, 100], систем глобального позиціонування [67, 82]; закінчуючи більш інноваційними підходами, такими як безпілотні літальні апарати [95, 108] та наземне лазерне сканування [110]. Повторні спостереження дозволяють оцінити поширення та швидкість деформації. Ці методи та інструменти, незважаючи на їхню надійність, здебільшого дають лише статичну картину стану досліджуваної області під час кожного вимірювання. Тому для визначення можливих зон розвитку процесів просідання та деформацій земної поверхні практично завжди застосовують геодезичні та геофізичні методи спостережень.

На практиці, під час визначення зрушень і деформацій земної поверхні для отримання даних техногенного впливу підземних гірничих виробок традиційно використовують натурні маркшейдерські спостереження, фізичне і математичне моделювання. Перевагою використання натурних маркшейдерських спостережень є достовірність результатів вимірювань, оскільки вони дозволяють отримати фактичні величини. Цей метод характеризується високою трудомісткістю і, як правило, не дозволяє оцінити всю мульду зрушення, а тільки певну її частину.

Переваги та ефективність геодезичних методів для дослідження екзогенних геологічних процесів та прогнозування їхнього розвитку простежуються у публікаціях як зарубіжних вчених Бургманна Р., Дрезена Г. [70], Ванга Х. Ф. [113], Саваге Й.Ц. [72], так і вітчизняних фахових видань. Зокрема у наукових працях Бурака К. О., Гринішака М. Я. та ін. [49] запропоновано використовувати високоточні цифрові нівеліри та штрихкодові рейки для досліджень геотехногенної динаміки на території родовищ калійних солей. Результати досліджень показали, що у процесі застосування зазначених приладів є можливість визначити перевищення з точністю до 0,19 мм; автоматизувати процес передавання відомостей у базу даних і практично

усунути пов'язані з цим похибки.

У роботі Преторіуса К. та інших [98] детально описано геодезичну систему лінійно-кутових вимірювань греблі Катсе у Африці. Спостереження виконувалися декількома циклами з використанням високоточних тахеометрів. Даний метод дав змогу спостерігати деформації під час роботи самої дамби, пов'язаної з підняттям рівня води у водосховищі.

Методику визначення місць імовірних підземних обвалів за результатами геометричного нівелювання та нахиломірних вимірювань інклінометрами висвітлено у наукових працях, зокрема Заяць О. С., Петрова С. Л. [12], Третьяка К. Р. [100]. Перевагою використання даного інструменту є автоматизованому знаходження величини та азимуту максимального кута нахилу території. За результатами сумісного опрацювання вимірів отримано похибку вимірювання кута нахилу інклінометром $m_i = 0,05$ мрад, а відхилення зміни висоти точок від еталонного значення становить 0,02–0,06 мм. Аналіз отриманих результатів досліджень у наукових працях Заяць О. С., Петрова С. Л., Третьяка К. Р. показав, що дані нахиломірних спостережень дозволяють прогнозувати можливі руйнування об'єктів інфраструктури.

У публікації [65] представлено детальний опис будови та особливості експлуатації інклінометра. У роботі автор зосередив свою увагу на точності результатів спостережень, отриманих під час вимірювань у різних режимах роботи.

Для визначення активних зон, де зберігається певне просідання ґрунту, спричинене крахом занедбаних підземних гірничих робіт, А. Е. Альварес- Вігіль та ін. запропонували використовувати криміналістичний аналіз просідання ґрунту [77]. Цей метод аналізує часову та просторову еволюцію тріщин, знайдених у будівлях для встановлення активних зон осідання земної поверхні.

У науковій праці Тіни Петернель та інших [95], для оцінювання характеру руху поверхні запропоновано проводити періодичний моніторинг за допомогою двох незалежних методів знімання: безпілотного літального

апарату (БПЛА) та тахеометричного вимірювання. Загальна оцінка динаміки руху поверхні створена шляхом аналізу ЦМР, що генерується на даних БПЛА, та значень зміни висоти і об'єму поверхні, отриманих за результатами тахеометричного знімання. Грунтуючись на одержаних результатах, для кращого розуміння динаміки зрушень земної поверхні, автори пропонують поєднувати ці два незалежні методи знімання, щоб отримати дані моделювання, такі як швидкість переміщення, зміну висоти.

Теоретичними і практичними питаннями моніторингу деформацій земної поверхні на геодинамічних полігонах займалися такі вчені як: Баран П. І., Бурак К. О., Войтенко С. П., Мазницький А. С., Островський А. Л., Третяк К. Р., Черняга П. Г., Ганьшин В. Н., Гуляев Ю. П., Зайцев А. К. та інші. Зокрема обґрунтуванню доцільності використання методу визначення природного електромагнітного поля Землі для оцінювання небезпеки приповерхневої деформації гірських порід унаслідок експлуатації соляних родовищ Передкарпаття присвячено наукові праці Багрія С. М., Кузьменка Е. Д. [35, 51], Дешиці С. А. [55]. На основі електророзвідувальних методів оцінено стан геологічного середовища у межах шахтних полів соляних родовищ Передкарпаття. У працях Е.Д. Кузьменка, А.В. Лущика та інших [51] детально розглянуто застосування методу природного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) для встановлення оцінки небезпеки приповерхневої деформації гірських порід. На основі побудованих карт інтенсивності випромінювання природного імпульсного електромагнітного поля Землі можна спостерігати відповідні зміни інтенсивності та аномалії електромагнітного поля, що свідчать про наявність небезпечних процесів, які можуть призвести до руйнування земної поверхні.

Для інформаційного забезпечення вирішення наукових, екологічних, господарських проблем необхідною є геопросторова інформація, що може бути отримана засобами космічного спостереження [44]. Суттєвими перевагами космічного спостереження над іншими видами технічного контролю є глобальність, екстериторіальність, довготривалість,

оперативність, безперервність та комплексність, які і визначають його провідне місце у вирішенні інженерно-геодезичних завдань [4, 6, 24, 38].

З моменту впровадження перших радіолокаційних систем, як доведено у працях Карнека К., Кінга Х., Масонетта Д. [92], відкриваються нові можливості отримання інформації про рухи земної поверхні. Одним із важливих аспектів практичного застосування цих радіолокаційних систем є вивчення властивостей та структури великих площ земної поверхні за результатами диференціального опрацювання двох і більше радіолокаційних зображень, отриманих за майже однакової геометрії знімання. Ця технологія спостереження дозволяє визначити небезпечні ділянки, на яких відбуваються нетипові деформації земної поверхні, для подальших детальних спостережень геодезичними методами. Як показано в працях зарубіжних науковців Феоктистова А. А., Захарова А. І. [25], Феретті А. [88], Костантіні М. [93], диференціальне опрацювання даних понад 30 радіолокаційних зображень дозволяє визначати вертикальні зміщення земної поверхні до сантиметрової точності. Це відкриває широкі перспективи використання радіолокаційних систем (РЛС) для більш глибокого вивчення процесів зрушення земної поверхні і моніторингу стану об'єктів на великих територіях. Очевидними перевагами цього підходу є: 1) зменшення трудомісткості; 2) отримання комплексної картини техногенного впливу, що охоплює всю територію досліджень.

Радіолокаційна інтерферометрія є дуже потужною технологією спостережень за Землею [76, 84, 92]. Цю технологію широко застосовують для картографування рельєфу Землі [90], а також для моніторингу деформації ґрунту, пов'язаної, наприклад: із землетрусами [102], тектонічними скороченнями [68], міграцією гідротермальної / магматичної рідини [112], підземного видобування [78], підземного перекачування води [96], видобутку нафти [76] та рекультиваций земель [73].

Особливо поєднання радіолокаційних даних із GNSS-спостереженнями значно розширює аналіз та інтерпретацію виникнення та поширення наслідків

землетрусів [106]. Постсейсмічну деформацію спостерігали, наприклад, Массонне [92] та Пельтцер [101]. Як показано в роботах [7, 37], застосування диференціального опрацювання даних радіолокаційних зображень дозволяє визначати вертикальні зміщення земної поверхні з точністю до сантиметрів.

Через неприступність місцевості, наприклад, Гренландії чи Антарктики, інтерферометричні вимірювання дають неоціненну інформацію про динаміку руху льодовика, яка може бути використана для складніших проблем, таких як глобальне потепління та підвищення рівня моря [81]. Залежно від швидкості льодового покриву та швидкості руху льодовика, інтервал повторення 35 днів може бути занадто довгим, щоб зображення SAR залишалися на відстані сітки. У такому разі додаткові методи SAR, такі як відстежування спеклів (випадкові інтерференційні картини, які утворюються у разі взаємного впливу когерентних хвиль, що мають випадкові зміщення фаз і / або випадковий набір інтенсивностей) [83], можуть стати у нагоді у поєднанні з інтерферометричною комбінацією у даних SAR.

У праці Річардса М. А [103], за результатами багатопрохідних космічних радіолокаційних зніманих однієї і тієї ж території, виконаних з однаковими параметрами і геометрією, продемонстровано можливість оцінювати зміщення земної поверхні або будівель і споруд із сантиметровою (для земної поверхні), і навіть, із міліметровою (для будівель і споруд) точностями.

Упродовж останнього десятиріччя застосування радіолокаційної інтерферометрії стає поширеним у гірничодобувному виробництві не лише через високі технічні показники і здатність працювати незалежно від метеорологічних умов, але і завдяки можливості накопичувати результати, аналізувати їх і прогнозувати критичні деформації за кілька діб до їхнього виникнення [60].

Також методи радіолокаційної інтерферометрії успішно застосовують для оцінювання зрушень у районах нафтовидобування [3, 77], динаміки зсувних і карстових процесів [39, 43]. Такий досвід дослідників відкриває перспективи використання радіолокаційних методів для моніторингу

деформацій земної поверхні і під час видобутку вугілля з пластових родовищ для захисту об'єктів на техногенно-навантажених територіях.

Успішне застосування інтерферометрії для виявлення осідань ґрунтів у районах вугільних шахт у Великій Британії, нафтових родовищ Росії, великих мегаполісах Європи, зонах землетрусів і діючих вулканів висвітлено у роботах [23, 62].

Доцільність радіолокаційної інтерферометрії для цих застосувань залежить від швидкості осідання, тобто градієнта деформації у поєднанні з впливом декореляції. Хоча часова декореляція створює значне обмеження для отримання карт безперервної деформації, оскільки міські райони або специфічні природні чи антропогенні особливості залишаються когерентними протягом тривалих часових інтервалів [88].

У роботі М. Константіні та інших [93] удосконалено способи опрацювання радіолокаційних інтерферометричних даних, а також висвітлено шляхи послаблення впливу систематичних похибок.

У роботі А. А. Феоктистов та ін. [25] представлено основні характеристики методу малих базисних ліній (Small BASeline, SBAS) та результати комплексних експериментальних досліджень на прикладі території префектури Тіба (Японія).

У працях вітчизняних науковців [1, 12, 39, 43] детально розглянуто можливість застосування технології РСА для моніторингу на гірничодобувних територіях для зменшення ризику аварій і катастроф на виробництві.

Проте з огляду вітчизняних літературних джерел виявлено, що питання використання методів радіолокаційної інтерферометрії для спостережень за деформаціями земної поверхні висвітлено недостатньо. Хоча потрібно зазначити, що деякі дослідження успішно проведені за участі працівників Центру прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля (ЦПОСІ та КНП). У працях Мордвідова І., Ляски І., Пакшина М. [39, 43] розглянуто застосування методів радіолокаційної інтерферометрії для виявлення відхилень параметрів об'єктів і доквілля від критеріїв безпеки, щоб

оцінити небезпечний розвиток процесів та явищ, пов'язаних із земною поверхнею.

Можливість отримувати високодетальні карти рельєфу для будь-якої території дистанційним методом є вагомою альтернативою геодезичного знімання, що особливо актуально для важкодоступних місцевостей. Супутниковий моніторинг активних динамічних процесів (зсувів, карстових явищ, опускання ґрунту в районах нафтогазовидобутку та інших підземних виробках тощо), особливо поблизу населених пунктів і об'єктів інфраструктури, має важливе господарське значення [16].

У результаті детального вивчення характеристик різних радіолокаційних знімальних систем [115] та інженерно-геодезичних робіт доповнено схему (табл. 1.1) для можливості застосування цих знімальних систем. У табл. 1.1 подано перелік інженерно-геодезичних робіт з відповідною регламентованою точністю, які можна виконувати з залученням радіолокаційних систем при цьому забезпечивши задану точність робіт [21]. Використання радіолокаційних даних дистанційного зондування дозволяє проводити моніторинг деформацій поверхні землі в різних ситуаціях незалежно від погодних умов і хмарності.

Треба зазначити, що методи ДЗЗ ефективні в основному для моніторингу поточного стану навколишнього природного середовища та визначення за різночасовими знімками змін, що сталися. Об'єднуючи інформацію ДЗЗ в ГІС, накопичуючи інформацію ДЗЗ в базі даних та доповнюючи її даними польових досліджень, атрибутивними даними, можна [18, 58, 59]:

- проводити просторовий аналіз за великою кількістю космічних знімків;
- моделювати складні природні і техногенні процеси та зміни екологічного стану довкілля під впливом тих чи інших несприятливих чинників та подій;
- прогнозувати розвиток потенційних надзвичайних ситуацій (НС);
- оцінювати рівень техногенного навантаження на території;

- моделювати соціально-економічну ситуацію в регіоні;
- сприяти ефективному прийняттю управлінських рішень у сфері природоохорони та природокористування;
- сприяти запобіганню техногенних аварій і НС, ліквідування їхніх наслідків, соціальному захисту населення [33].

Таблиця 1.1

Застосування РСА в залежності від типу інженерно-геодезичних робіт

Перелік інженерно-геодезичних робіт	Точність інженерно-геодезичних робіт	Космічні апарати, які зможуть забезпечити відповідну точність
Створення цифрових моделей рельєфу	1-4 м (залежно від типу рельєфу)	TerraSAR-X, TANDEM-X
Визначення осідань та деформацій споруд різних типів; на зсувних ділянках	1 мм - 15 мм (залежно від типу ґрунтів) 30 мм	Точність визначається різними умовами і залежить від багатьох параметрів, може варіюватися від 5 до 25 мм. TerraSAR-X, Sentinel 1A/1B, ASNARO-2, Kompasat-5
Визначення кренів споруд(димарів, щогл, високих веж тощо)	0,0005 Н (Н висота споруди)	
Під час знімання та обстеження підземних комунікацій, що не мають виходів на поверхню землі, а також спостереження за трасами трубопроводів	0,1 м (за умов розміщення підземних комунікацій на глибині 10 м)	
Виявлення геодинамічних полігонів	мм/ рік	TerraSAR-X, Sentinel 1A/1B, ASNARO-2, Kompasat-5, COSMO-SkyMed-1-4

Методи ДЗЗ дозволяють оперативно проводити аналізування зміни, що відбуваються з об'єктами в часі і просторі, а отже вирішувати величезну кількість завдань, пов'язаних із моніторингом і контролем територій у різних галузях народного господарства [28, 29].

Розглянемо різноманітні інженерно-геодезичні завдання (табл. 1.1), які можна вирішити за допомогою супутникової радіолокаційної інтерферометрії:

1. Моніторинг міської інфраструктури.

В умовах міського середовища або забудованих територій можна здійснювати моніторинг стану будівель і споруд, оцінювати вплив підземних робіт (наприклад, метрополітен) та несприятливих умов.

2. Спостереження зсувів, зокрема у важкодоступній місцевості, виявлення і оцінювання активність схилів зсувів [71, 87].

3. Спостереження геодинамічних полігонів, гірничих відводів.

Технологія радіолокаційної інтерферометрії дозволяє проводити моніторинг зсувів земної поверхні в місцях видобутку корисних копалин. Наприклад, оцінювати зсуви на родовищах нафти і газу для визначення місць відбору вуглеводнів і закачування рідини, а також оцінювати просідання ґрунту над шахтами та тунелями. За допомогою інтерферометричного методу можна планувати геодезичні профільні лінії. Отже, такі методи необхідно використовувати для планування геодинамічних полігонів.

4. Моніторинг кар'єрів і відвалів.

Супутникову інтерферометрію можна використовувати для спостережень за діючими кар'єрами. Ця технологія дозволяє отримати повну картину зсувів на об'єкті, навіть таких зміщень, які з певних причин, не видно наземним системам на ранніх етапах процесу зсувів.

5. Спостереження за трасами трубопроводів.

Моніторинг зсувів уздовж трас трубопроводів дозволяє контролювати ризики ушкоджень у разі нерівномірних деформацій під час зсувів, карстових явищ, а також локалізувати ділянки деформацій магістральних трубопроводів тощо.

Аналіз сучасного стану нормативних документів [47, 48], що регламентують інженерно-геодезичні роботи в Україні, не передбачає використання даних ДЗЗ, а саме космічних знімків. Така ситуація могла виникнути через відставання в оновленні нормативних документів від сучасного стану розвитку технічних засобів.

Стислий огляд перелічених робіт свідчить, що в них розглянуто окремі завдання одержання даних ДЗЗ. Системні методи для кожного конкретного

випадку мають свою специфіку і потребують виконання нових досліджень та формування відповідних критеріїв, оскільки експерти не завжди можуть передбачити результати нелінійних взаємодій між підсистемами складної системи [118].

Не зважаючи на великий обсяг досліджень, питання використання космічної інформації для вирішення різних геодезичних завдань недостатньо опрацьоване і потребує застосування спеціальних методів. У літературі не конкретизовано дослідження існуючих методів опрацювання радіолокаційних даних для різних техногенно-небезпечних об'єктів. Тому постає необхідність виконання нових досліджень та розроблення методології на основі узагальнень наявних знань та досвіду експертів, що дозволить підтвердити можливість та перспективи використання радіолокаційних даних для моніторингу за осіданням (підняттям) земної поверхні техногенно-небезпечних об'єктів.

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

На основі опрацювання літературних джерел та наведених вище даних, можна сформулювати такі висновки до першого розділу:

1. Перспективи підвищення ефективності вирішення завдань моніторингу земної поверхні в усіх сферах людської діяльності залежать від таких факторів: використання нових методів, технологій і апаратури ДЗЗ; розроблення та широкого застосування нових методів опрацювання аерокосмічної інформації; застосування сучасних геоінформаційних технологій; поєднання аерокосмічних і наземних методів.

2. Аналіз методів вимірювання деформацій земної поверхні на техногенно-небезпечних об'єктах, підтверджує важливість і необхідність ведення комплексного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні на цих територіях саме геодезичними методами та потребу залучення новітніх технологій для уникнення / попередження техногенної небезпеки.

3. Аналіз наукової, технічної і нормативної літератури показав, що з методів космічного ДЗЗ для моніторингу за техногенно-небезпечними об'єктами найбільш перспективним є застосування радіолокаційної інтерферометрії. Оскільки дана технологія за короткий проміжок часу дозволяє: 1) вивчити властивості та структуру великих площ земної поверхні; 2) відновити на основі архівних даних радіолокаційного знімання хронологію геодинамічних процесів, які відбулися у часі; 3) визначити небезпечні ділянки з нетиповими деформаціями земної поверхні для подальшого уточнення детального спостереження традиційними геодезичними методами.

4. У результаті детального аналізу світового досвіду застосування радіолокаційних даних у інженерно-геодезичній галузі та вивчення характеристик різноманітних радіолокаторів із синтезованою апертурою, опрацьовано та доповнено схему застосування засобів радіолокаційного знімання під час виконання інженерно-геодезичних робіт. А саме – доповнено перелік інженерно-геодезичних робіт (дослідження деформації багатоповерхівок; визначення осідань на зсувних ділянках, геодинамічних полігонах) та запропоновано перелік радіолокаторів з синтезованою апертурою, які забезпечують відповідну точність інженерно-геодезичних робіт.

5. Проте впровадження цього методу при геодезичному контролі вимагає додаткових досліджень для розв'язку таких двох основних питань: 1) питання вибору радіолокаційної системи та режиму виконання знімання; 2) питання вибору методу опрацювання радіолокаційних знімків під час моніторингу деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів для досягнення регламентованої точності.

РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ОПРАЦЮВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ДАНИХ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

2.1. Особливості застосування радіолокаційного зондування Землі

Радіолокаційне знімання – це один із видів аерокосмічного знімання, яке здійснюється за допомогою радіолокатора – активного мікрохвильового сенсора, здатного випромінювати та приймати розсіяні земною поверхнею поляризовані радіохвилі в певних діапазонах довжин хвиль (частот) [10, 22, 27]. Зворотний сигнал несе в собі інформацію про фізичні та геометричні властивості поверхні [17, 27, 53, 79]. Радіолокаційне знімання (РЛЗ) забезпечує спостереження за об'єктами, прихованими рослинністю і навіть розташованих у неглибокому приповерхневому шарі землі або води (заглиблені трубопроводи, лінії електропередач, підводні споруди тощо) [114]. Крім того, за радіолокаційними зображеннями можна виявити рухомі об'єкти, отримати інформацію про рельєф зондованої місцевості, і про її певні фізичні властивості: електропровідність, вологість тощо [26].

Особливості геометричних властивостей радіолокаційних зображень зумовлені нахилом зондувального променя до поверхні.

У процесі польоту супутника на орбіті (напрямок руху носія радіолокаційної системи називають азимутом знімання) антена на його борту випромінює радіохвилі в напрямку земної поверхні під кутом до неї (напрямок випромінювання називають дальністю) [105, 111]. Радіолокаційне зображення формується шляхом реєстрування відбитого поверхнею (зворотного) сигналу на похилій дальності (цим терміном прийнято називати віддаль від антени до поверхні). Знімання безпосередньо під носієм (у надир) не проводять, оскільки в цьому разі дальність не розрізняється, зворотні сигнали від близьких об'єктів місцевості повертаються до радіолокатора майже одночасно і на знімку ці об'єкти нечіткі [103].

Кутом знімання називають кут падіння θ_{inc} (рис. 2.1) між напрямком радіосигналу і прямовисною лінією, проведеною через точку, в яку

спрямований сигнал. Ділянки місцевості під час знімання, які найменш віддалені від надир, називають ближньою зоною, а найбільш віддалені – дальньою зоною. Відповідні їм кути падіння – θ_b і θ_d (рис. 2.1). У разі нахилу зондувальної поверхні виділяють локальний кут падіння θ_l – кут між напрямком радіохвилі і нормаллю до схилу. Кут падіння хвилі для сучасних космічних радіолокаційних систем може варіювати у великих межах: наприклад, для Radarsat-2 – від 10° до 60° , для ALOS-2 / PALSAR-2 – від 8° до 70° . Весь діапазон кутів падіння визначає ширину смуги огляду – смугу на земній поверхні, в межах якої може проводитися знімання. Більш вузька смуга на поверхні Землі, знімання якої проводиться за поточного стану променя, називається смугою захоплення (див. рис. 2.1) [112].

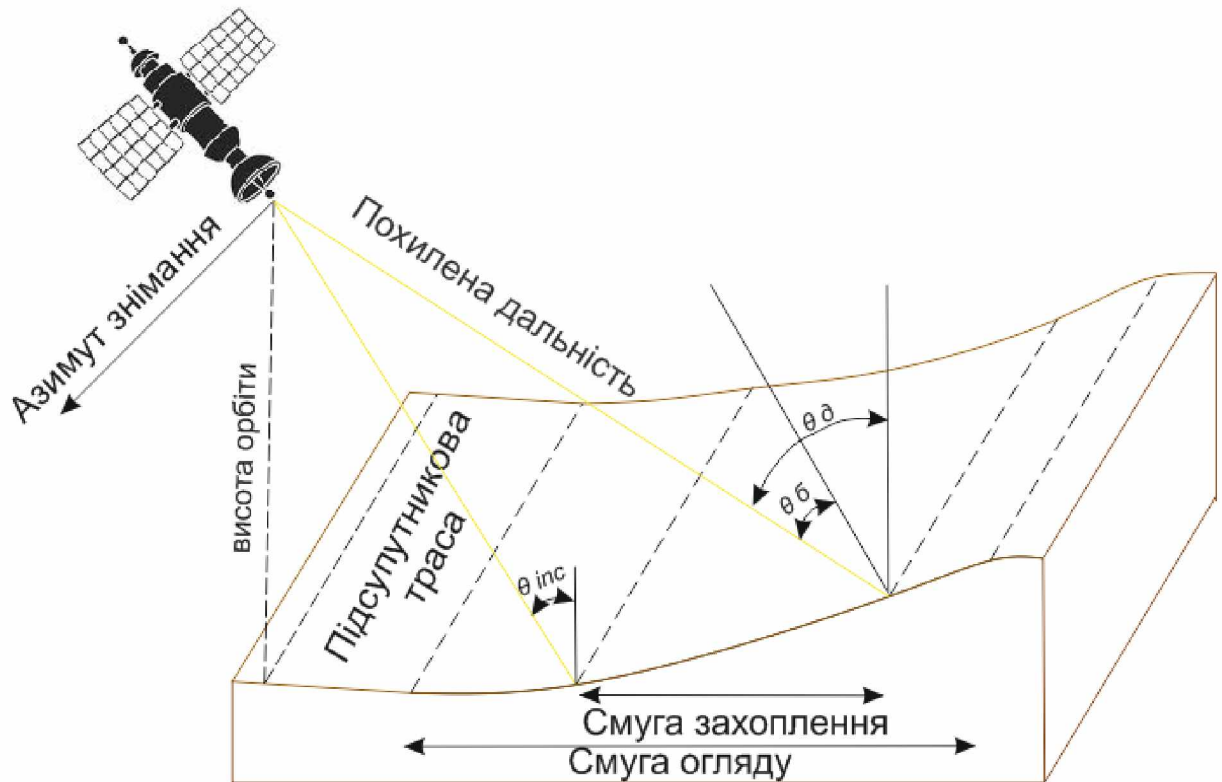


Рис. 2.1. Геометрія радіолокаційного знімання

Якщо вихідні радіолокаційні зображення представлені в проєкції похилої дальності, то об'єкти, розташовані ближче до радіолокатора, виглядатимуть більш стиснутими порівняно з об'єктами, розташованими далі від нього. Для правильного відображення місцевості зображення з проєкції похилої дальності перераховують у проєкцію наземної дальності.

Радіолокаційне космічне знімання виконується в ультракороткохвильових (надвисокочастотних) діапазонах, які поділяються на X-, C-, S- і L-діапазони [10] (рис. 2.2):

- X-діапазон: від 2,4 до 3,75 см (від 12,5 до 8 ГГц). Дані цього діапазону найбільш застосовувані для вирішення цивільних завдань та військової розвідки, а також для вивчення льодовикового покриву;
- C-діапазон: від 3,75 до 7,5 см (від 8 до 4 ГГц). Дані цього діапазону використовуються для вирішення великої кількості завдань у цивільному секторі, в тому числі для побудови цифрових моделей місцевості (ЦММ) і цифрових моделей рельєфу (ЦМР), моніторингу зсувів земної поверхні;
- S-діапазон: від 7,5 до 15 см (від 4 до 2 ГГц). Цей діапазон використовують для забезпечення ряду військових і цивільних прикладних програм;
- L-діапазон: від 15 до 30 см (від 2 до 1 ГГц). Проникає рослинність, у тому числі не дуже щільний ліс. Випромінювання цього діапазону може частково (на глибину до декількох метрів) проникати в сухий сніг, лід, у сухий ґрунт;
- P-діапазон: від 30 до 100 см (від 1 до 0,3 ГГц). Просвічує рослинність, у тому числі щільну, сухий ґрунт, сухий сніг, лід на глибину до декількох метрів. Використовують цей діапазон для оцінювання біомаси.

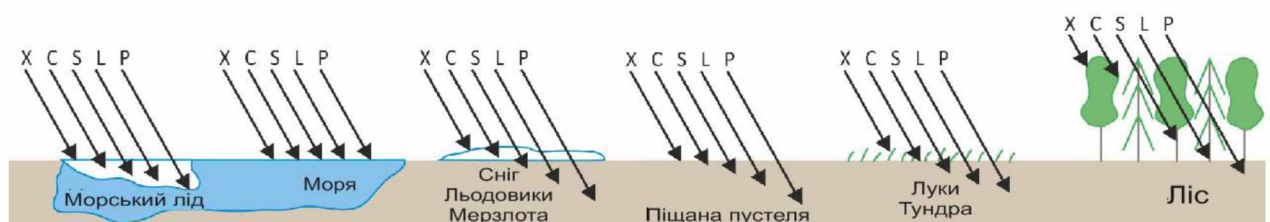


Рис. 2.2. Проникаюча здатність радіохвиль [37]

Дистанційне зондування Землі в радіохвильовому діапазоні має низку принципових відмінностей від інших видів знімання [17, 84]:

- для радіолокаційного знімання використовують хвилі набагато більшої довжини, ніж для знімання в оптичному діапазоні. Ці хвилі майже не

поглинаються і не розсіюються хмарами, що дозволяє отримувати зображення земної поверхні і розташованих на ній об'єктів практично незалежно від метеорологічних умов;

– радіолокатор є засобом цілодобового спостереження, оскільки принцип активного знімання надає можливість отримувати радіолокаційні знімки незалежно від сонячного освітлення. З огляду на цю властивість радіолокаційного знімання, можна отримувати інформацію на приполярних широтах, де значну частину року спостерігається явище полярної ночі;

– одержані матеріали з РЛС містять інформацію про такі компоненти сигналу як амплітуда і фаза. Відмінності в амплітуді сигналу дозволяють розпізнавати об'єкти або їхні властивості, а фазова складова дозволяє отримувати інформацію про висоти поверхні та швидкість руху об'єктів;

– у радіолокаційному зондуванні часто використовують таку властивість хвиль як поляризацію, що визначається напрямком вектора напруженості електричного поля в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. У поляризаційних РСА (див. табл. 2.1) передбачено паралельну роботу з декількома комбінаціями поляризацій [10, 22];

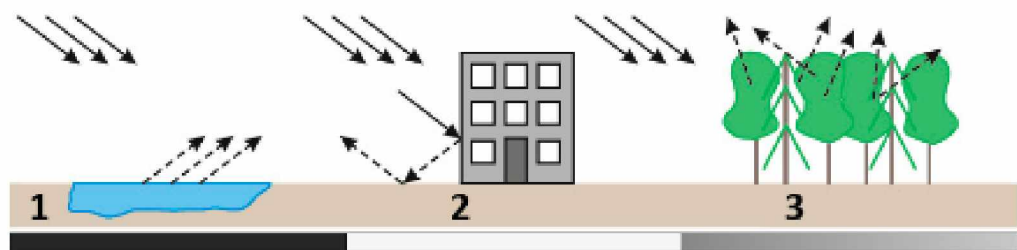
Таблиця 2.1

Основні характеристики радіолокаційних систем

Назва космічного апарата	Просторове розрізнення, м	Ширина смуги знімання, км	Спектральний діапазон	Поляризація (параметри змінюються залежно від режиму знімання)
RadarSat-1	8-100	50-500	C	HH
RadarSat-2	1,6-160	1,6-160	L	Одна, дві або чотири
TerraSar-X	<1-40	4-270	X	Одна або дві
TanDem-X				
Alos-2	1-100	25-350	L	Одна, дві або чотири
Sentinel 1A, B	5-40	20-400	C	Одна або дві
Kompsat-5	1-20	5-100	C	Одна на вибір
COSMO-SkyMed-1-4	1-100	10-200	X	Одна або дві
ASNARO-2	<1-16	10-50	X	Одна на вибір

– у деяких випадках на радіолокаційних знімках виявляються підповерхневі об'єкти. Як правило, проникаюча здатність сигналу зростає зі збільшенням довжини хвилі [88];

– орієнтація щодо напрямлення випромінювання впливає на відображення об'єктів на радіолокаційних знімках, тобто внутрішня структура цих об'єктів, які в сукупності призводять до формування різних механізмів розсіювання хвиль. Під час одноразового розсіювання хвилі відбиваються дзеркально в бік від радіолокатора. Об'єкти, що характеризуються одноразовим розсіюванням, мають рівну поверхню (наприклад, вода, відкритий ґрунт тощо) і на радіолокаційному зображенні відображаються найтемнішими кольорами (рис. 2.3). Під час об'ємного розсіювання відбувається багаторазове відбивання радіохвиль від частин об'єктів, внаслідок чого до радіолокатора повертається деяка частина випромінювання. Дворазове розсіювання утворюється у разі, якщо хвиля відбивається двічі: від вертикально і горизонтально орієнтованих об'єктів, у результаті чого значна частина випромінювання повертається в бік радіолокатора. Як правило, найменшу яскравість на радіолокаційних знімках мають об'єкти, що характеризуються одноразовим розсіюванням, а найбільшу – дворазовим (рис. 2.1) [10, 22, 42];



Яскравість пікселів радіолокаційного знімка

Рис. 2.3. Схематичне представлення механізмів розсіювання хвиль:

1 – одноразове; 2 – дворазове; 3 – об'ємне

– для радіолокаційних зображень також притаманні специфічні радіометричні яскравості і геометричні особливості. Після відбивання від

земної поверхні когерентні хвилі інтерферують, що призводить до ослаблення або посилення амплітуди сигналу, і це проявляється на зображенні як зернистість, так званий спекл-шум (накладання когерентних хвиль, внаслідок чого прилад нездатний правильно розрізнити дрібні об'єкти);

– радіолокаційне знімання проводиться завжди за бічного огляду (не в надир, зумовлює наявність геометричних спотворень, що поєднуються одночасно з яскравістю): розтягування і стиснення схилів на зображенні, що супроводжується підвищенням яскравості схилів, повернутих у бік радіолокатора; перенакладання і радіолокаційна тінь. Ці спотворення спостерігаються на ділянках за наявності високих вертикальних об'єктів, наприклад, багатопверхових будівель.

Режими роботи радіолокаторів із синтезованою апертурою (РСА)

1 Поляриметричний режим – режим отримання радіолокаційних зображень одночасно за різної поляризації радіохвиль. Таке знімання здійснюється не всіма системами і залежить від технічних особливостей конкретної знімальної апаратури. Можливе знімання в скороченому (комбінації HH і HV, VV і VH або HH і VV) або повному поляриметричному режимі (одночасно HH, HV, VH і VV). В останні роки з'явилися знімальні системи (наприклад, Risat-1), що здійснюють знімання у режимі так званої компактної поляриметрії, коли в напрямку земної поверхні посиляється сигнал, що має кругову поляризацію [84].

2 Багаточастотний режим – режим отримання радіолокаційних знімків одночасно за різних довжин радіохвиль. Таке знімання з космосу на сьогодні не проводять. Унікальною в своєму роді можна назвати систему SIR- C / X- SAR, що знімала одночасно в трьох діапазонах: X, C і L. У найближчій перспективі (2019–2021 рр.) планується створення кількох багаточастотних систем радіолокаційного спостереження Землі: канадська OptiSAR (діапазони X і L), індійсько-американська NISAR (S, L) [1, 84].

3 Інтерферометричний режим – повторні радіолокаційні знімання однієї і тієї ж ділянки місцевості за дотримання таких умов: зондування ідентичною апаратурою за однаковими параметрами; зондування з близько розташованих точок орбіти, відстань між якими називається інтерферометричним базисом. Виділяють поздовжній, поперечний і тимчасовий інтерферометричні базиси, що характеризують взаємне положення радіолокаторів у часі і просторі (див. рис. 2.4). Різні види інтерферометричного базису використовують для вирішення різних завдань: поздовжній – для виявлення рухомих об'єктів, поперечний – для побудови цифрових моделей рельєфу, тимчасовий – для виявлення змін об'єктів, зсувів земної поверхні.

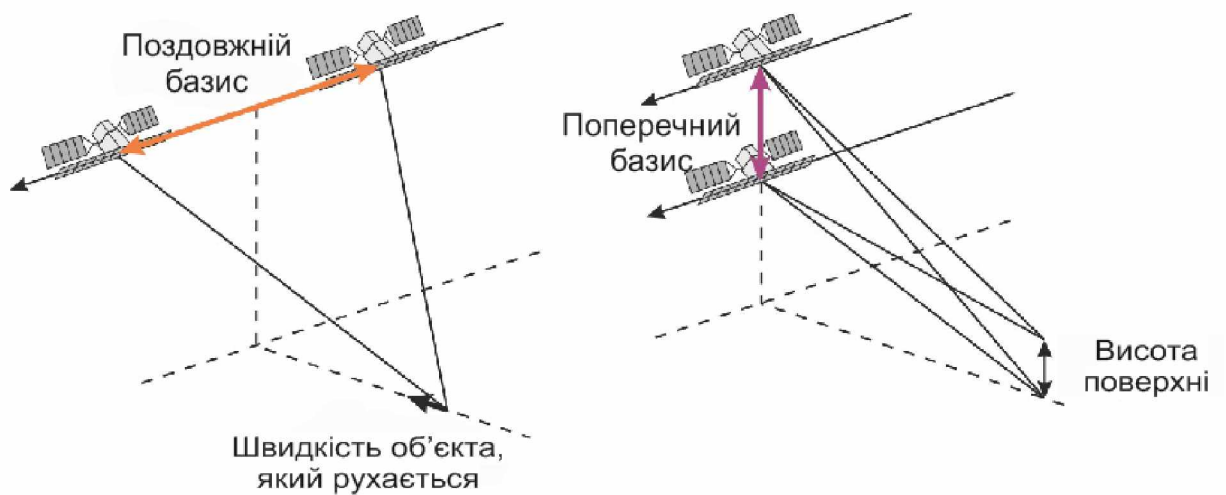


Рис. 2.4. Види інтерферометричного базису

Повторність знімання однієї і тієї ж території у інтерферометричному режимі реалізується різними шляхами (рис. 2.5):

- синхронно, якщо на літальному апараті встановлені два радіолокатори, на деякій віддалі одне від одного, один з яких працює і на випромінювання і на приймання сигналу, а другий – тільки на приймання (інтерферометрія з «жорстким» базисом) (приклад такого знімання – Shuttle Radar Topography Mission);

- в режимі «тандем» – двома ідентичними радіолокаторами під час руху космічних апаратів-носіїв на близько розташованих паралельних орбітах

(один із різновидів інтерферометрія з «м'яким» базисом) (наприклад, TerraSAR- X / TanDEM-X);

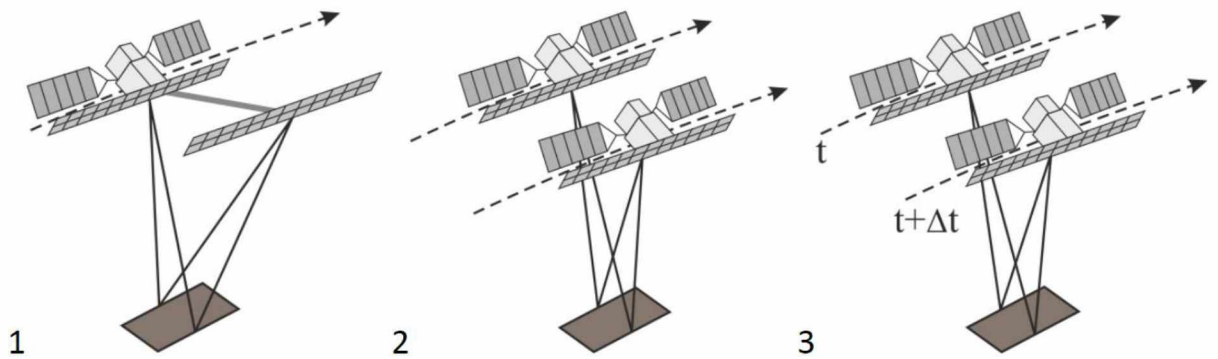


Рис. 2.5. Види проведення інтерферометричних знімків:

1) синхронний; 2) в режимі «тандем»; 3) послідовний

– послідовно – перше знімання виконується в момент часу t , такі знімання – з цього ж супутника (або аналогічного) на повторному витку орбіти через інтервал часу Δt , кратний періоду повторення траси польоту (іноді такий варіант знімання також називають інтерферометрією з «м'яким» базисом) (наприклад, повторне знімання з супутника Radarsat-2 можливе з інтервалом у 24 дні, з супутника ALOS-2 – 14 днів).

Загалом спостерігається тенденція до збільшення кількості знімальних режимів, у яких ведеться робота космічних радіолокаторів. Так, системою Radarsat-1 здійснювалося знімання в семи, а Radarsat-2 – уже в 17 режимах, що характеризуються комбінацією таких параметрів: просторове розрізнення, ширина смуги захоплення, діапазон кутів знімання і набір поляризаційних каналів.

2.2. Аналіз спотворень радіолокаційних знімків

Спотворення космічних радіолокаційних знімків поділяються на дві групи: радіометричні, за яких порушується відповідність рівня вхідного сигналу для відображення властивостей об'єктів (їхньої ефективної поверхні розсіювання (ЕПР)); та геометричні спотворення, що погіршують точність вимірювання координат об'єктів на радіолокаційному знімку і ускладнюють проведення картографічних робіт (див. рис. 2.6) [11].



Рис. 2.6. Чинники, що впливають на величину коефіцієнта зворотного розсіювання

Перш ніж переходити до питання моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні на основі радіолокаційних знімків, проаналізуємо, які об'єкти місцевості або їхні властивості відображаються на цих знімках.

Розглянемо джерела спотворення:

- нестабільності апаратури і спотворення, пов'язані з проходженням сигналів через тракт РСА;
- нестабільності траєкторії руху носія РЛС;
- загасання сигналів, фазова і поляризаційна нестабільності поширення сигналів;
- нестабільність властивостей, що відображають об'єкти, рух поверхні (море, рослинність).

Для космічних РСА основний траєкторний чинник – помилки вимірювання параметрів відносного руху і похибки орієнтації космічного апарата.

Однією з особливостей зображень, одержаних космічними РЛС, є нерівномірність фону, зумовлена когерентним спекл-шумом. Спекл-шум

може використовуватися для ідентифікації просторово-розрізненних об'єктів і оцінювання деяких характеристик РСА, проте в переважній більшості випадків він є небажаним чинником і ускладнює дешифрування РЛЗ (може призвести до помилкового виявлення точкових цілей або до пропускання слабконтрастних об'єктів).

Отже, на якість формування інтерферограми впливає велика кількість чинників. Більшість із них може бути згруповано за такими розділами:

1) точність визначення параметрів орбіти (знання базисної лінії непаралельність орбіт тощо);

2) характеристики супутникової системи (кут огляду, просторова розрізненість, системні шуми);

3) характеристики радіолокаційного сигналу (частота, поляризація, співвідношення сигнал / шум);

4) атмосферні впливи і погодні умови (швидкість вітру, сніговий покрив, хмарність тощо);

5) властивості поверхні (електричні характеристики, локальний нахил рельєфу).

Під час зондування у короткохвильових діапазонах (X, C) можливе отримання високого (метр і менш) просторового розрізнення радіолокаційних знімків. З використанням довгохвильових діапазонів (S, L) контраст у зображенні місцевості на радіолокаційних знімках вищий, ніж на короткохвильових (X, C).

Як правило, яскравість знімків і величина питомої ефективної поверхні розсіювання (ПЕПР) в узгоджених поляризаціях (VV і HH) вища, ніж у перехресних (VH і HV). Особливо яскраво ця різниця проявляється на зображеннях щодо рівних поверхонь (наприклад, хвилі на поверхні води).

Як правило, зі зростанням висоти, покриття рослинності, запасів фітомаси, шорсткості ґрунту збільшуються і значення ПЕПР. Використання даних в одній поляризації не завжди дозволяє однозначно розділяти об'єкти (в узгоджених поляризаціях майже не відрізняється ПЕПР чагарників і зораного

грунту, у перехресних – сухих ефемерів та поверхні води). Використання ж декількох поляризацій одночасно дозволяє впевнено розділяти ці об'єкти. Наявність різночасових знімків дозволяє однозначно розділяти стабільні і змінювані об'єкти.

Також на характер зворотного розсіювання впливає цілий комплекс особливостей місцевості, які тією чи іншою мірою можуть визначити тематичний зміст карти: вид розчленування рельєфу (ерозійне або термокарстове) і його ступінь, тип рослинності (тундрова, болотна, полярно-пустинна), ступінь зволоження поверхні, характер пухких відкладень на деяких ділянках. Істотний внесок у зворотний сигнал вносить стан поверхні, зумовлений протаюванням і промерзанням сезонно-талого шару. Наявність радіолокаційних знімків, отриманих у зимовий період, дозволяє розділяти неглибокі озера, які промерзають повністю, від глибоких, що не промерзають до дна.

2.3. Формування зображень радіолокаційних спостережень

Радіолокаційні дані містять у собі дві характеристики радіохвилі: її амплітуду і фазу, тобто містять інформацію як про інтенсивність відображення, так і про час знімання поверхні Землі [117]. Інтенсивність відображення I зазвичай представлена як величина або амплітуда $A = \sqrt{I}$, тоді як час ходу діапазону визначає вимірювану часткову фазу прийнятого радіолокаційного сигналу ψ [84].

Загальне вимірювання РЛС на піксель позначається комплексним вектором P :

$$P = A \exp(i\psi), \quad (2.1)$$

Ці складові сигналу записують у вигляді комплексного числа, що складається з двох частин: дійсної $\text{Re} \{P\} = A \cos(\psi)$ і уявної $\text{Im} \{P\} = A \sin(\psi)$, та зберігаються в звичайній сітці, утворюючи двовимірне радіолокаційне зображення (рис. 2.7) [84, 109].

Співвідношення між комплексними значеннями $\text{Re} \{P\}$ та $\text{Im} \{P\}$ та амплітудою A та фазою ψ залежною від діапазону (рис. 2.7):

$$A = \sqrt{(\operatorname{Re}\{P\})^2 + (\operatorname{Im}\{P\})^2}, \quad (2.2)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}\{P\}}{\operatorname{Re}\{P\}}\right). \quad (2.3)$$

Відмінності в амплітуді дозволяють розпізнавати об'єкти або їхній стан на радіолокаційних знімках.

Фазова складова радіосигналу є основою для визначення віддалі від радіолокатора до ділянки місцевості і подальшого визначення висот та зсувів поверхні.

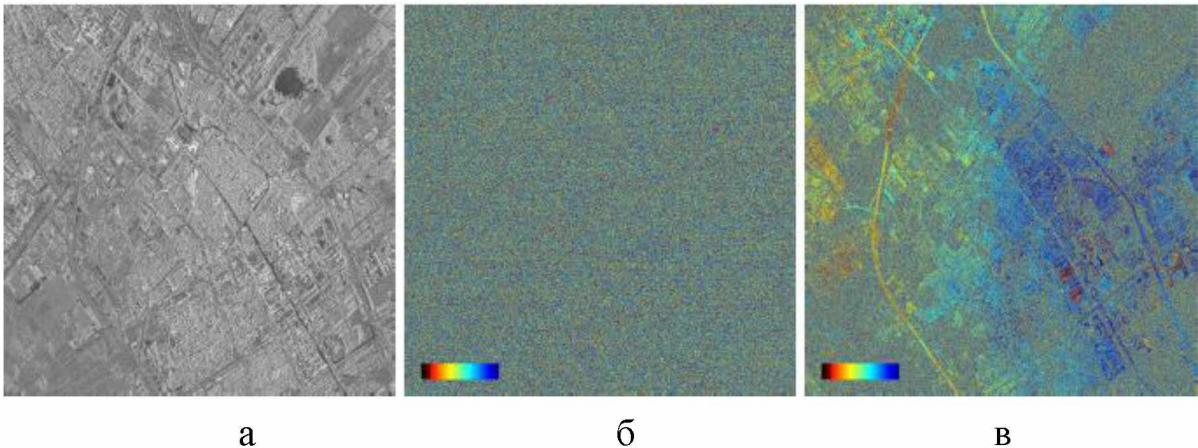


Рис. 2.7. Фрагмент території зображення Делфт, Нідерланди, отриманого з супутника TerraSAR-X: а – амплітуда зображення SLC; б – фаза зображення SLC (записується лише часткова фаза прийнятого сигналу, в результаті чого значення фаз між $-\pi$ та $+\pi$); в – фаза інтерферограми (після поєднання двох зображень SLC отримується інтерпретована фазова інформація)

Комплексне значення клітинки просторового розрізнення в межах радіолокаційного зображення формується шляхом підсумовування всіх відбитих хвиль від поверхні Землі. Сила відображення залежить від фізичних (наприклад, нахилу, морфології, шорсткості, неоднорідностей) та електричних (тобто діелектричної постійної) властивостей поверхні. Крім того, взаємодія сигналу з поверхнею залежить від характеристик датчика, таких як довжина хвилі сигналу та кута падіння.

Складна інтерферограма створюється складним спряженим множенням двох вирівняних зображень SLC, отримуючи:

$$P^{ms} = P^m * P^{s*} = A^m * A^{s*} \exp(i(\psi^m - \psi^s)), \quad (2.3)$$

де (...) * позначає складний кон'югат; m, s – основного і додаткового (тобто таке зображення із серії зніманих, яке під час опрацювання буде порівнюватися із основним зображенням) зображень. Тут передбачається схема придбання повторного проходу. Інтерферометрична фаза ψ^{ms} для одного пікселя дорівнює:

$$\psi^{ms} = \psi^m - \psi^s$$

$$\psi^{ms} = -2\pi a + \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{defo} + \varphi_{atmo} + \varphi_{orb} + \varphi_{scat} + \varphi_{noise}, \quad (2.4)$$

де різниця інтерферометричних діапазонів складається з: плоскоземної фази – φ_{flat} , топографічної φ_{topo} та деформаційної φ_{defo} частин, φ_{atmo} – атмосферної фази (затримка сигналу атмосферою), φ_{scat} – фази розсіювання і φ_{noise} – шуму. Похибками в параметри орбіти основного і додаткового зніманих називають – φ_{orb} [84].

Усі складові інтерферометричної фази визначені щодо ефективного центру розсіювання комірки просторового розрізнення. Це віртуальне розташування вектора, що виникає в результаті когерентних відображальних елементів у комірці просторового розрізнення. Фаза розсіювання є перешкодою, тоді як фаза шуму описує вимірювальний шум, наприклад, тепловий шум.

Затримки атмосферного сигналу складається з іоносферної та тропосферної частин.

Іоносфера, що розміщена в межах від 70 до 1000 км над поверхнею Землі, є дисперсійним середовищем, в результаті чого затримка залежить від довжини хвилі. Наприклад, з огляду мінімального та максимального загального вмісту електронів (ЗВЕ) 5 та 100 загальних одиниць вмісту електронів відповідно, затримка зеніту в одну сторону коливається від 0,02 до 0,4 м для діапазону X та 1,2 до 25 м для діапазону L [84, 109].

Недисперсна і незалежна від радіолокаційної довжини хвилі тропосфера простягається від поверхні Землі на висоту менше ніж 11 км над полюсами і 16 км на екваторі. Це викликає гідростатичну затримку та затримку вологості.

Затримка гідростатичного зеніту, яка залежить від тиску і температури в тропосфері, буває в межах 2–3 м, що є постійною [82]. Затримка вологості зеніту, викликана розподілом водяної пари, обмежена значеннями нижче ніж 0,35 м [82]. Однак затримка вологості більш мінлива порівняно з гідростатичною затримкою. За допомогою функції відображення затримки зеніту можуть бути перетворені на радіолокаційну лінію візування (РЛС візування). Невелика радіолокаційна довжина хвилі (від 3 до 20 см) порівняно з інтервалом пікселів, затримкою атмосфери та розподілом об'єктів розсіювання призводять до того, що спостереження за фазою SLC не можна інтерпретувати безпосередньо (рис. 2.7, б). Однак інформацію можна отримати з різниці між двома SLC, тобто з інтерферограми (рис. 2.7, в).

Завданням кожного радіолокаційного інтерферометричного аналізу є отримання інформації з пікселів, що демонструє достатньо узгоджену поведінку розсіювання. Вихідною точкою аналізу є дані у форматі Single-Look Complex (SLC). Цей формат зберігає інформацію про фазу та амплітуду вихідних даних SAR. Крім того, дані SLC зберігають оптимальне просторове розрізнення, доступне для кожного режиму променя [109].

Після створення інтерферограми в оригінальному просторовому розрізненні зображення або в зразковому вигляді інтерферограма може бути інтерпретована. Для вдосконалення інтерпретації можна попередньо застосувати низку додаткових етапів опрацювання. Прикладами цих етапів опрацювання є:

- спектральне фільтрування. Рівень шуму в інтерферограмі можна знизити, фільтруючи неперекриті частини спектрів головного та додаткового зображень перед формуванням інтерферограми. Спектральне фільтрування застосовують окремо в напрямку азимуту та діапазону. Цим зменшується геометрична та доплерографічна декореляція центроїдів;

- просторове фільтрування. Залишок шуму, наприклад, викликаний тимчасовою декореляцією, може бути зменшений просторовим (згладжувальним) фільтром на складних інтерферометричних спостереженнях

[86];

– розгортання фази. Отримана інтерферограма все ще містить фазові значення в інтервалі $[-\pi, +\pi)$. Отже, інтерферограма показує кольорові цикли, відомі як бахром. Для отримання абсолютних фазових значень, що містять інформацію про висоту або значення деформації, фазу потрібно розкрити [97].

Завданням радіолокаційного інтерферометричного аналізу може бути вивчення деформації, рельєфу чи атмосферних умов у певній місцевості. У разі досліджень деформації, фазу деформації φ_{defo} слід ізолювати від інших складових фази рівняння. Особливо атмосферний сигнал разом із тимчасовою та геометричною декореляцією є обмежувальними чинниками щодо інтерпретації у разі єдиної інтерферограми. Щоб обійти ці тривожні чинники, для дослідження деформації часто застосовують множинні інтерферограми однієї області: радіолокаційний інтерферометричний часовий ряд.

Послідовність опрацювання пари знімків загалом складається з декількох базових кроків:

1. Поєднання основного і допоміжного радіолокаційних знімків інтерферометричної пари (в автоматичному режимі або з ручним введенням контрольних точок).

2. Генерація інтерферограми, що є результатом комплексного поелементного множення основного та додаткового зображення, геометрично поєднаного з основним.

3. Поділ компонентів фази f_{def} і f_{topo} у наслідок синтезу фази рельєфу за допомогою наявної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) або цифрової моделі місцевості (ЦММ), або моделі еліпсоїда, або шляхом завдання середньої за площею знімка висотної позначки (для рівнинних областей) з отриманням на виході диференціальної інтерферограми. На цій інтерферограмі один повний спектр кольорів (інтерференційний цикл) відповідає зсувам земної поверхні, рівним половині довжини хвилі радіолокатора.

4. Фільтрування інтерферограми, що дозволяє певною мірою зменшити

фазовий шум (перешкоди) в наслідок вихідної карти зсувів земної поверхні.

5. Отримання файлу когерентності для області перекриття двох знімків, складових інтерферометричної пари, в значеннях від 0 до 1 для кожної пари відповідних один одному пікселів.

6. Розгортання фази (процедура переходу від відносних значень фази до абсолютних) і усунення розривів фази.

7. Коригування значення базисної лінії на основі наземних контрольних точок.

8. Перетворення абсолютних значень фази зміщення земної поверхні в міліметрах.

2.4. Комплексна методика диференціального інтерферометричного опрацювання часових рядів

Супутникова радіолокаційна інтерферометрія (іншими словами InSAR) – це потужна методика вимірювання руху земної поверхні. Однак застосування традиційного підходу обмежене через низку помилок: часова декореляція, геометрична декореляція та затримка атмосферного сигналу. Використовуючи інформаційний вміст повного стеку радіолокаційних знімків, можна зменшити вплив низки помилок і оцінити часовий ряд деформацій.

Використання довгих часових серій зображень отриманих РСА, ефективно пригнічуються похибки орбітальних даних, вплив атмосферних явищ. Для опрацювання радіолокаційних даних існує метод постійних розсіювачів (PS), метод малих базисних ліній (SBAS) або гібридні методи, які ґрунтуються на спільному використанні довгих тимчасових серій знімків [66, 69, 80]. Результатами опрацювання є тематичні цифрові карти з точністю оцінки швидкості вертикальних зміщень об'єктів 4 - 6 міліметра методом PS, 6 - 20 методом SBAS.

Метод PS є одним із підходів часових рядів, заснований на когерентній фазі точкових розсіювачів. Оскільки розташування цих точкових розсіювачів заздалегідь невідоме, PS включає як оцінювання, так і проблему виявлення.

Ускладнювальним чинником в процесі оцінювання та виявлення є стан завершеного фазового спостереження, тобто фазові спостереження в інтервалі $[\pi, +\pi)$. Як наслідок, когерентність пікселя зображення у часовій ряді неможливо оцінити безпосередньо. Крім того, для оцінювання невідомих фазових неоднозначностей необхідні припущення щодо просторової та / або часової плавності сигналу деформації, вираженого моделлю. Тому слід оцінити як правильність використовуваної моделі, так і фактичну фазову стійкість попередньо вибраних пікселів. Багаторазові, залежні від моделі, можливі рішення в поєднанні з невизначеністю фактичного рівня шуму певного пікселя зображення потребують збалансованої процедури в процесі оцінювання та виявлення.

Метод PS [88, 89] фокусується на підмножині точок, які демонструють відносно постійні властивості розсіювання у часі. Було визнано, що певні особливості, часто техногенні, демонструють стабільну фазову поведінку протягом тривалих часових інтервалів, отже, з мінімальною часовою декореляцією. Через домінування відбиття цих точкових розсіювачів у комірці просторового розрізнення зображення ефект геометричної декореляції також сильно зменшується. Метод PS використовує ці відокремлені точкові розсіювачі для отримання часового ряду переміщень. Завдяки використанню пакета радіолокаційних даних тимчасово некорельований компонент атмосферної фази в спостереженнях може бути оцінений та усунутий. А саме, інтерферограми утворюються шляхом рекомбінації повторно впорядкованих зображень SLC, спочатку фільтруючи за азимутом, щоб виключити доплерівський спектр, що не перекривається, і в діапазоні, щоб зменшити ефекти геометричної декореляції. Тим самим зменшується складова цього шумового коефіцієнта у часовий ряд деформацій постійних розсіювачів (PS).

Метод PS зазвичай вважають надійним, якщо використовують 30 або більше знімків однієї і тієї ж території за різні дати, зроблених в одній і тій самій геометрії знімання супутникового радіолокатора. PS слід використовувати виключно в міських районах або взагалі там, де розсіювачі

залишаються стабільними в умовах радіометричної та інтерферометричної фаз. Залежно від стійкості розсіювача (когерентності часу) точність переміщення може досягати точності міліметрів, тоді як максимальна швидкість обмежена мінімальною часовою віддалю між захопленням і довжиною хвилі датчика. Щодо висоти, то метод PS забезпечує для визначених розсіювачів більш високу точність відносно малої базисної лінії.

Алгоритм роботи методу PS

Програма автоматично вибирає основне зображення, на яке з точністю до 1/100 пікселя корегіструються інші знімки інтерферометричного ланцюжка. Далі програма будує так звані інтерферограми (комплексно поелементно перемножені фазові шари радіолокаційних знімків) з кожною парою знімків.

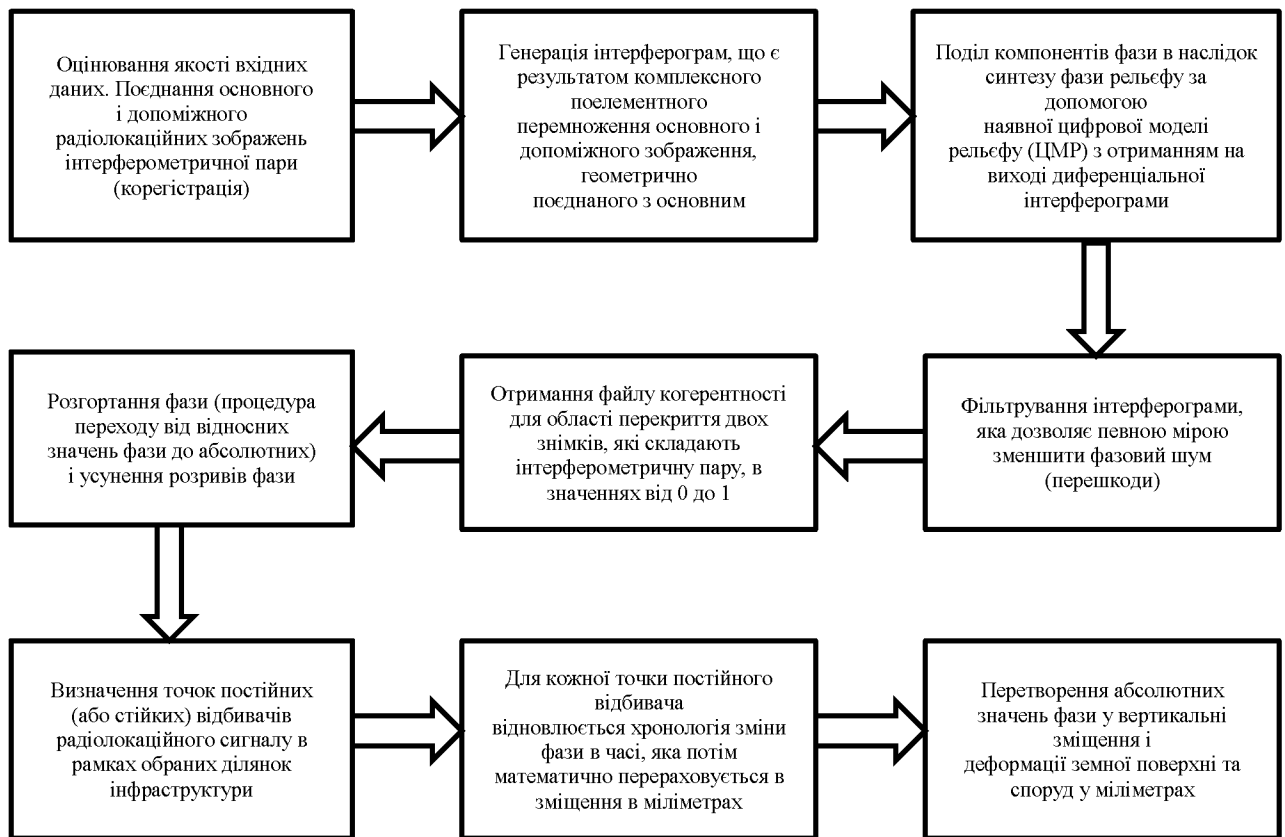


Рис. 2.8. Алгоритм роботи методу PS

Потім для кожної пари оцінюються величини когерентності (заходи кореляції фаз радіолокаційних знімків). Також для кожної пари будуються карти величин стандартних відхилень амплітуд знімків.

Наступним кроком є визначення точок – постійних (або стійких)

розсіювачів радіолокаційного сигналу. Для вибору точок використовують кілька порогів (порог кореляції амплітуд, порог когерентності, порог просторового і тимчасового відхилень величин зсувів першої ітерації тощо). Після того як постійні розсіювачі визначені, для них виконують процедуру оцінювання фазових різниць і мультитимчасове розгортання фази для точкових цілей. Саме в різниці фаз кожного знімка «зашита» величина зсувів за період між зніманнями цих знімків.

Отже, для кожної з обраних точок відновлюється хронологія зміни фази в часі, яка потім математично перераховується у зміщення в міліметрах. Додатково в процесі опрацювання застосовують спеціальний фільтр, що видаляє можливий вплив атмосфери на інтерферометричну фазу.

Результатом опрацювання є векторний файл точок, в атрибутах яких записані: зміщення на кожен дату знімання; середньорічна швидкість зсувів; сумарна величина зсувів; когерентність; висота над еліпсоїдом WGS-84 (приклад векторного файлу див. у розділі 3).

У методі PS запропоновано інноваційний підхід, що дозволяє видалити ці систематичні помилки внаслідок додаткового опрацювання пар сусідніх постійних відбивачів. Додатковою перевагою цієї технології є велика максимально доступна щільність точок – до 30 000 точок на км² (для щільно забудованих територій).

Основним недоліком технології постійних розсіювачів є її придатність тільки для забудованих територій, або територій без рослинності, а також для окремих будівель і споруд під час знімання з високим просторовим розрізненням.

Альтернативний підхід у аналізованні радіолокаційних інтерферометричних часових рядів ґрунтується на використанні підмножини інтерферограм із малими базисними рівнями, позначеними як метод серій малих базисних ліній BASline (SBAS) [66]. Базисна лінія є віддаллю між двома залученими радіолокаційними зніманнями або в положенні супутника, або в момент отримання. Отже, за допомогою невеликих базисних ліній

зменшується як геометричний, так і часовий декореляційний ефект. Через невеликі базисні лінії та багатооглядність часто застосовуваних пікселів зображення, підхід SBAS, особливо, підходить для розподілених механізмів розсіювання, які трапляються в сільських регіонах із незасіяними територіями.

SBAS призначений для аналізування розподілених цілей. Отриманий продукт нагадує вироблений звичайним DInSAR: основна відмінність полягає в тому, що SBAS дозволяє аналізувати великі часові ряди, тоді як DInSAR обмежений 2-, 3- і 4-прохідними. Щодо PS, метод SBAS менш чутливий до кількості знімків; оскільки він використовує просторово розподілену когерентність, замість того щоб розглядати виключно окремі точки, як у PS.

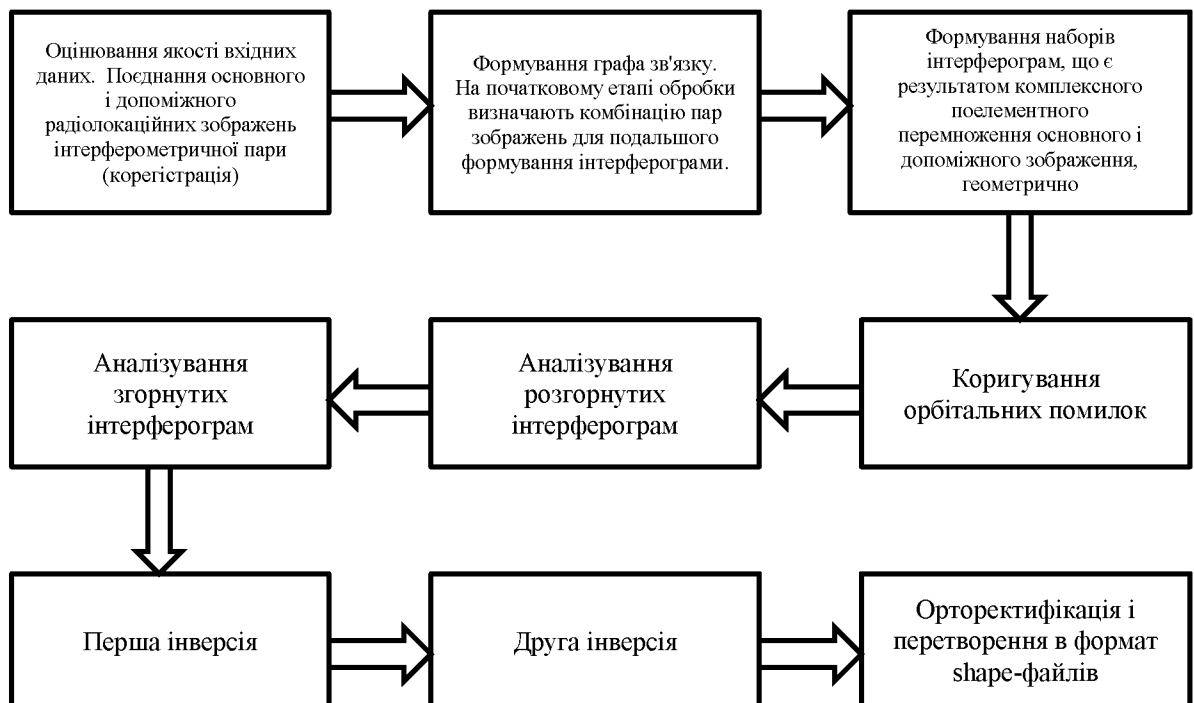


Рис. 2.9. Алгоритм роботи методу SBAS

Однак загалом варто зазначити, що чим більше знімків, тим краща якість продукції, що виходить, це також тому, що затримку атмосферного сигналу можна краще оцінити та зменшити. Щодо зміщень земної поверхні, SBAS не обмежується виключно лінійним: насправді, крім лінійного переміщення, підтримуються квадратичні та кубічні моделі.

Метод серій малих базисних ліній, на відміну від методу PS, є менш автоматизованим методом. Наприклад, у разі 15-прохідного ланцюжка,

кількість пар знімків досягає 105. З них, за величиною найменшого просторового базиса, вибирають, наприклад, 30–40 пар. Пари можуть бути перехресними (перший прохід із другим, другий – з третім, перший – з третім, другий – з четвертим тощо).

Кожну пару опрацьовують у напівавтоматичному режимі з виконанням зазначених нижче чотирьох кроків:

1. Автоматична корегістрація (взаємне ототожнення), розрахунок інтерферограми, синтез фази рельєфу, віднімання фази рельєфу з інтерферограми, фільтрування диференціальної інтерферограми, розрахунок когерентності, розгортання фази.

2. Набір точок із відомими координатами і висотами для коригування орбітальних параметрів.

3. Розрахунок скоригованих фільтрованих диференціальних інтерферограм і розгорнутих фаз.

4. Інверсія отриманих перехресних у часі розгорнутих фаз за методом SBAS відновлює послідовність зсувів у часі. У підсумку також відновлюється хронологія зсувів від першого знімка ланцюжка до останнього.

Необхідно зазначити, що в рамках цього методу інтерферограми формуються тільки для тих пар зображень, для яких величини нормальних компонентів базисної лінії і тимчасових інтервалів між зніманнями основного та парного зображень інтерферометричної пари досить малі, тобто задовольняють задані порогові обмеження (звідси виникає назва методу). Завдяки такому критерію формування інтерферометричних пар у методі SBAS зменшується вплив просторової і тимчасової декореляції сигналів цих пари. Необхідно зазначити також, що в рамках методу SBAS (на відміну від методу PS) зберігається можливість формування просторово «щільних» вихідних продуктів.

На основі методів PS та SBAS, третя група гібридних методів розвинулася для отримання вимірювань як з точкового розсіювання, так і з розподілених механізмів розподілу.

Стандартний підхід SBAS, ґрунтується на багатооглядових інтерферограмах, який застосовують для пошуку широкомасштабних моделей деформації. Далі аналізують часовий ряд при просторовому розрізненні після адаптації інтерферометричних фаз широкомасштабних компонентів. Наприклад, Хупер [85] використовував кілька пікселів зображення в певному радіусі для оцінювання просторово-корельованих параметрів, таких як деформація та затримка атмосферного сигналу з подальшим оцінюванням залишкової фази для окремих пікселів, наприклад, через топографічну висоту. Ферретті [88] застосував кластеризацію пікселів з еквівалентними характеристиками розсіювання для зменшення рівня шуму порівняно з окремими пікселями. Крім того, для оптимізування оцінки в часовому ряді використовують матрицю когерентності, що описує кореляцію між радіолокаційними знімками.

Для подолання основних обмежень радіолокаційної інтерферометрії, тобто тимчасової та геометричної декореляції та затримки атмосферного сигналу, були введені радіолокаційні інтерферометричні методи часових рядів [66, 88].

У рамках цих методів замість одиничних інтерферограм кілька послідовних інтерферограм аналізують у послідовних рамках. Отже, відсутність надмірності в одній інтерферограмі дозволяє розділити різні фазові складові, наприклад, деформацію, поверхню рельєфу та затримки атмосферного сигналу.

Основна мета методу аналізування радіолокаційних інтерферометричних часових рядів – виявлення тих пікселів, для яких часовий ряд деформацій можна оцінити за достатньою надійністю. Надійність часового ряду безпосередньо пов'язана з правильним оцінюванням фазових неоднозначностей або розгортанням фази. Можливість оцінювати правильно фазову невизначеність залежить як від характеристик вимірювань, так і від сигналу:

1. Рівень шуму. Цей рівень визначається кількістю виділеної декореляції.

Отже, для пікселів, що демонструють сильну геометричну та / або часову декореляцію, можливість оцінювати деформацію фактичного часового ряду знижується.

2. Просторово-часова мінливість затримки атмосферою сигналу. У всіх методах неоднозначності вирішуються на основі просторових (і часових) фазових відмінностей. У разі сильного просторового градієнта атмосферного сигналу, виправити розбір неоднозначності стає складніше.

3. Просторово-часова стабільність фактичного сигналу деформації. Для усунення неоднозначностей слід зробити певні припущення щодо просторової та / або часової плавності сигналу деформації. Раптові зміни, як у просторі, так і в часі, ускладнюють просторову розрізненість неоднозначності.

На основі фізико-географічних властивостей об'єктів дослідження (територія шахного поля «Хотінь», будівля корпусу № 5 ІФНТУНГ) та аналізу методів опрацювання радіолокаційних даних створено загальну схему методики опрацювання даних, кінцевим результатом якої є поєднання двох методів – PS та SBAS (рис. 2.10).

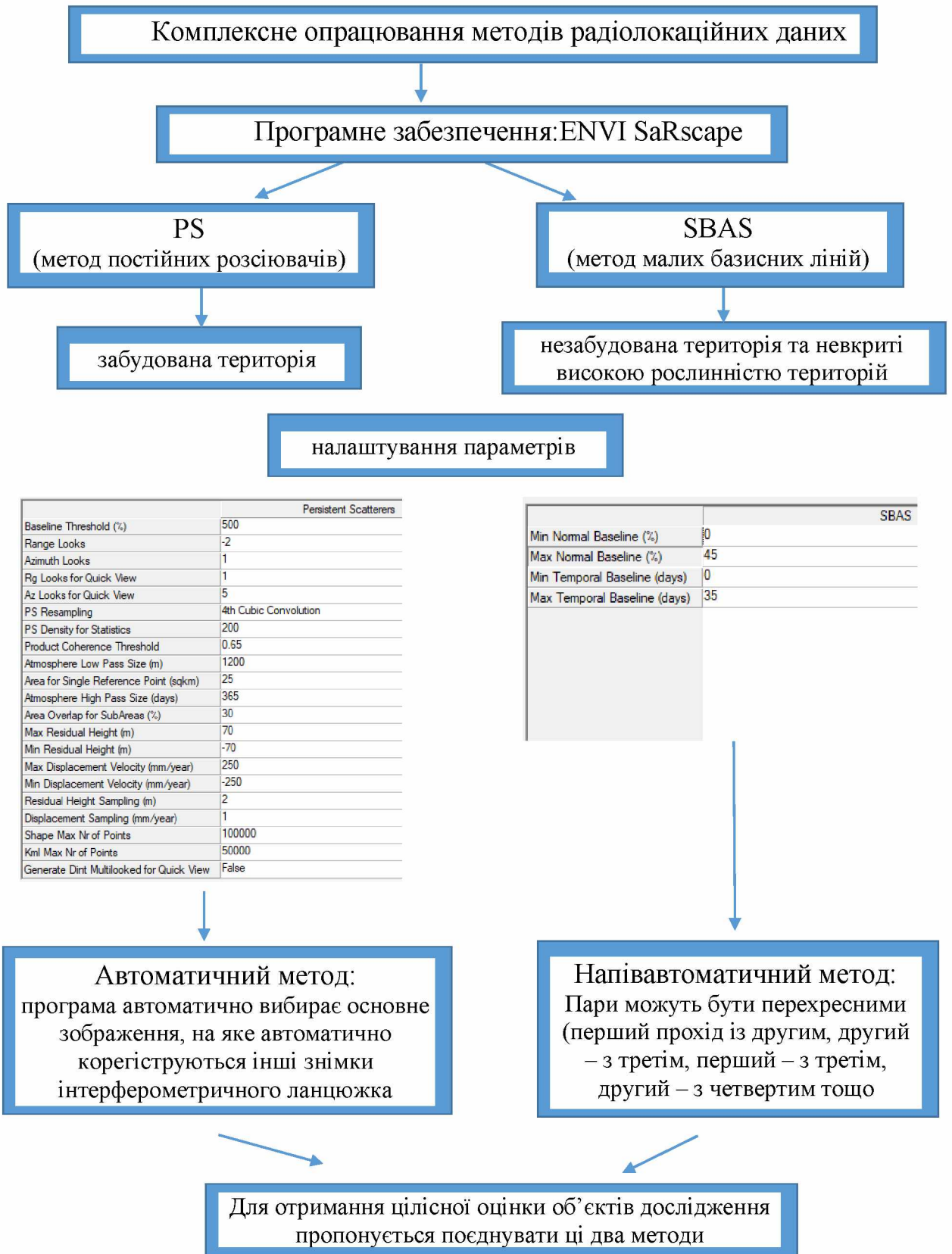


Рис. 2.10. Схема комплексної методики опрацювання радіолокаційних даних

З теорії відомо, що метод PS слід застосовувати для забудованих територій, а SBAS – для незабудованих та з непокритою високою рослинністю. Над територією шахтних полів простягнулося село Хотінь, очевидно застосування одного із методів (PS чи SBAS) є помилковим, оскільки цілісної оцінки території шахтного поля ми не отримаємо. За допомогою запропонованої комплексної методики опрацювання радіолокаційних знімків можна отримати суміщену схему моніторингу динаміки процесів осідання ділянки дослідження.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

За результатами досліджень, поданих у другому розділі, можна зробити такі висновки:

1. Проаналізовано основні спотворення зображень радіолокаційних систем. З одного боку на радіолокаційні зображення впливають зміни сигналу, характеристики місцевості, а з іншого такі дані можуть бути носіями нової інформації про місцевість, недоступної за використання знімків у світловому діапазоні.

2. Проаналізувавши методи радіолокаційних інтерферометричних часових рядів, можна стверджувати, що оптимальний підхід дослідження залежить від кількості радіолокаційних знімків, плавності сигналу, типу підстильної поверхні. Метод PS дає високі результати визначення деформацій на ділянках із розвиненою інфраструктурою, а метод SBAS є менш чутливим до кількості знімків і його використовують на незабудованих та покритих рослинністю територіях.

3. Вибір методу опрацювання радіолокаційних даних залежить від особливостей досліджуваної території і тематики картографування. Істотними параметрами вихідних даних, що можуть вплинути на підходи до їхнього опрацювання і на якість вирішення поставленого завдання, крім частотного діапазону радіолокатора, є режими знімання і рівні початкового опрацювання даних. Для найбільш мінливих протягом певного часу (вегетаційного періоду, року тощо) районів краще використовувати

різночасові амплітудні радіолокаційні знімки, в той час як для слабо мінливих територій ефективним може виявитися застосування матеріалів знімання в декількох поляризаціях.

4. Для отримання цілісної картини про об'єкт дослідження запропоновано використовувати комплексну методику опрацювання радіолокаційних даних, результатом якої є суміщена схема визначення вертикальних зміщень на ділянці дослідження для різних типів підстильної поверхні.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ТА ПРИПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

3.1. Моніторинг деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів методами радіолокаційної інтерферометрії

З розвитком технологій та їхнім поширенням в усі сфери життя, в геодезії все частіше стали застосовуватись методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Це пов'язано, насамперед, із підвищенням точності, яку вони забезпечують, а також зручністю та швидкістю роботи з ними. Одним із таких методів є технологія радіолокаційної інтерферометрії, найбільш використовувана на практиці в ряді Європейських країн для моніторингу деформаційних процесів Землі.

На жаль, багато деформаційних процесів, що відбуваються не є природними, тобто їх спричинили дія або бездіяльність людини. Сьогодні, як ніколи, є актуальним завдання спостереження за впливом людини на довкілля. Такі території як гірничі відводи втручаються в природну геологічну будову Землі. А це також спричиняє деформацію земної поверхні.

Тому метою виконаних досліджень було встановлення можливостей використання радіолокаційних інтерферометричних методів для геодезичного моніторингу. Для одержання надійних результатів було поставлено за мету поєднати метод PS та SBAS та перехресно перевірити результати.

3.2. Застосування комплексної методики на підставі методів PS та SBAS для оцінки стану території шахтного поля «Хотінь»

Для вивчення характеристик земної поверхні та приповерхневих об'єктів території шахтного поля «Хотінь» проведено спостереження за даними радіолокаційної інтерферометрії. Опрацювання радіолокаційних даних на територію дослідження виконувалося методами PS та SBAS, оскільки значна територія вкрита рослинністю та є забудованою. Виконано підбір серії знімків (34 знімки) на період з 03.04.2016 р. до 31.10.2017 із космічного апарату

Sentinel-1 (рис. 3.1).

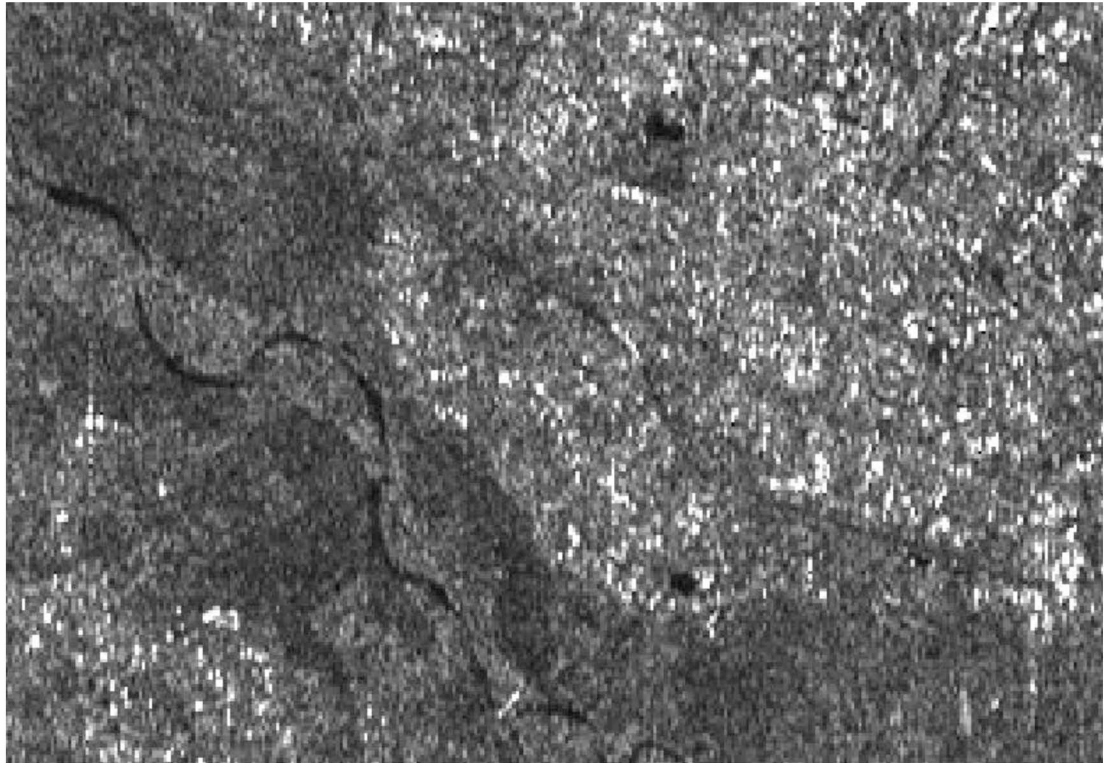


Рис. 3.1. Радіолокаційний знімок з КА Sentinel-1A за 2016.04.03

Опрацювання радіолокаційних даних виконували за допомогою програмного забезпечення ENVI SARscape. Перед тим, як приступити до опрацювання необхідно ввести певні налаштування (рис. 3.2-3.6) [120].

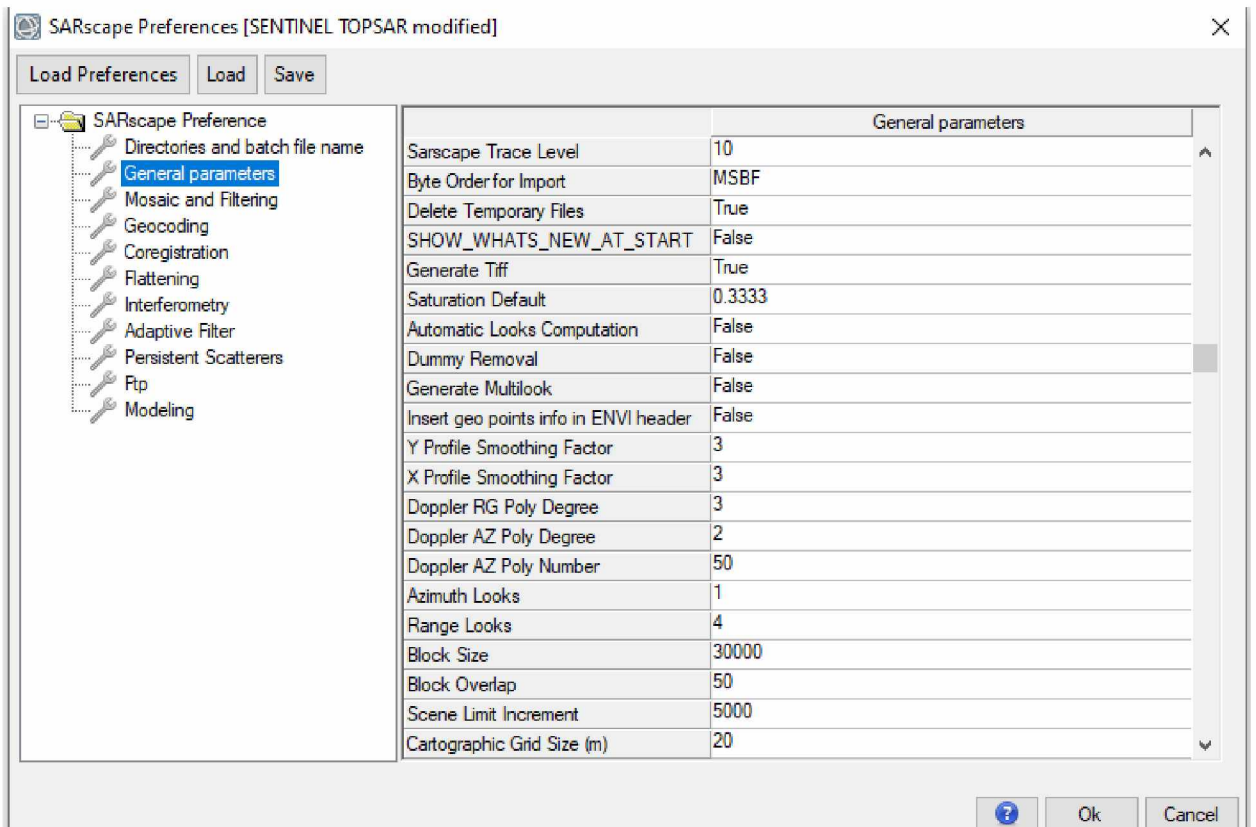


Рис. 3.2. Загальні налаштування параметрів програмного забезпечення ENVI SARscape

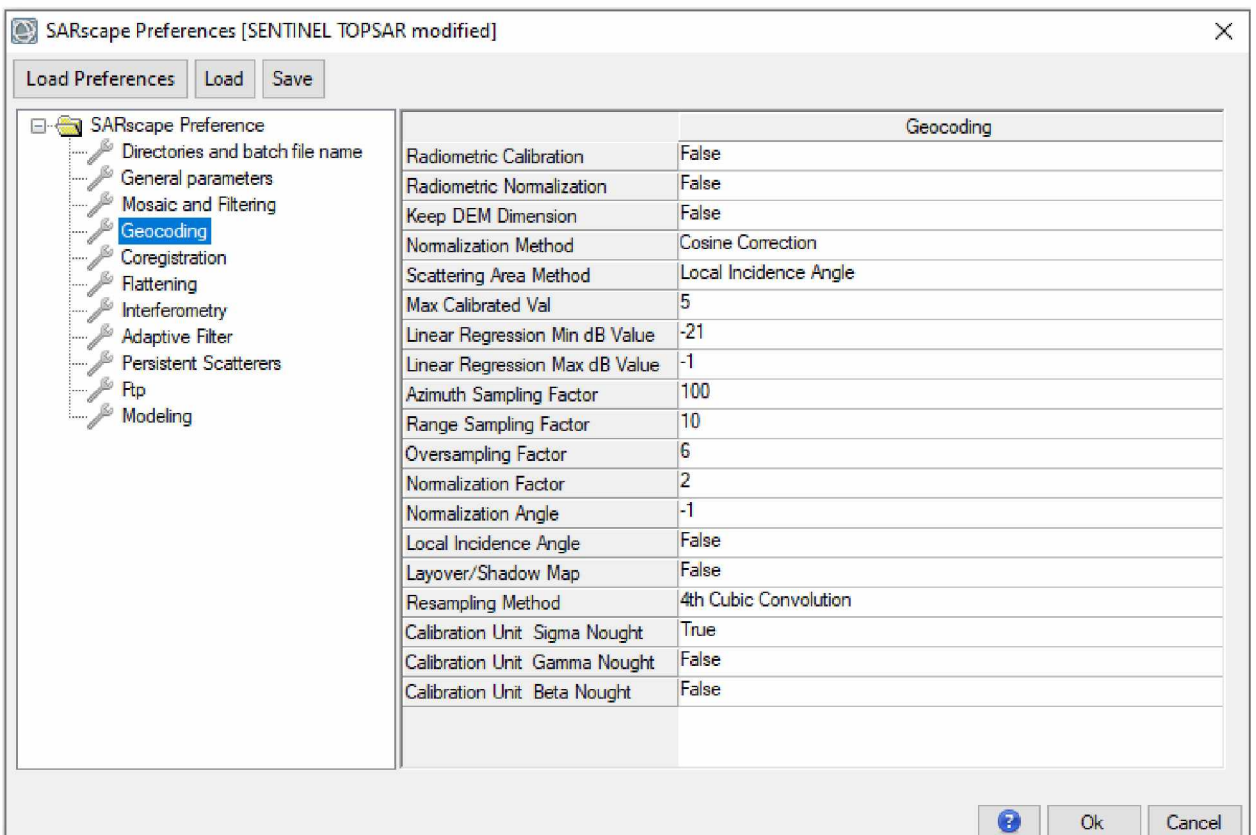


Рис. 3.3. Налаштування параметрів геокодування програмного забезпечення ENVI SARscape

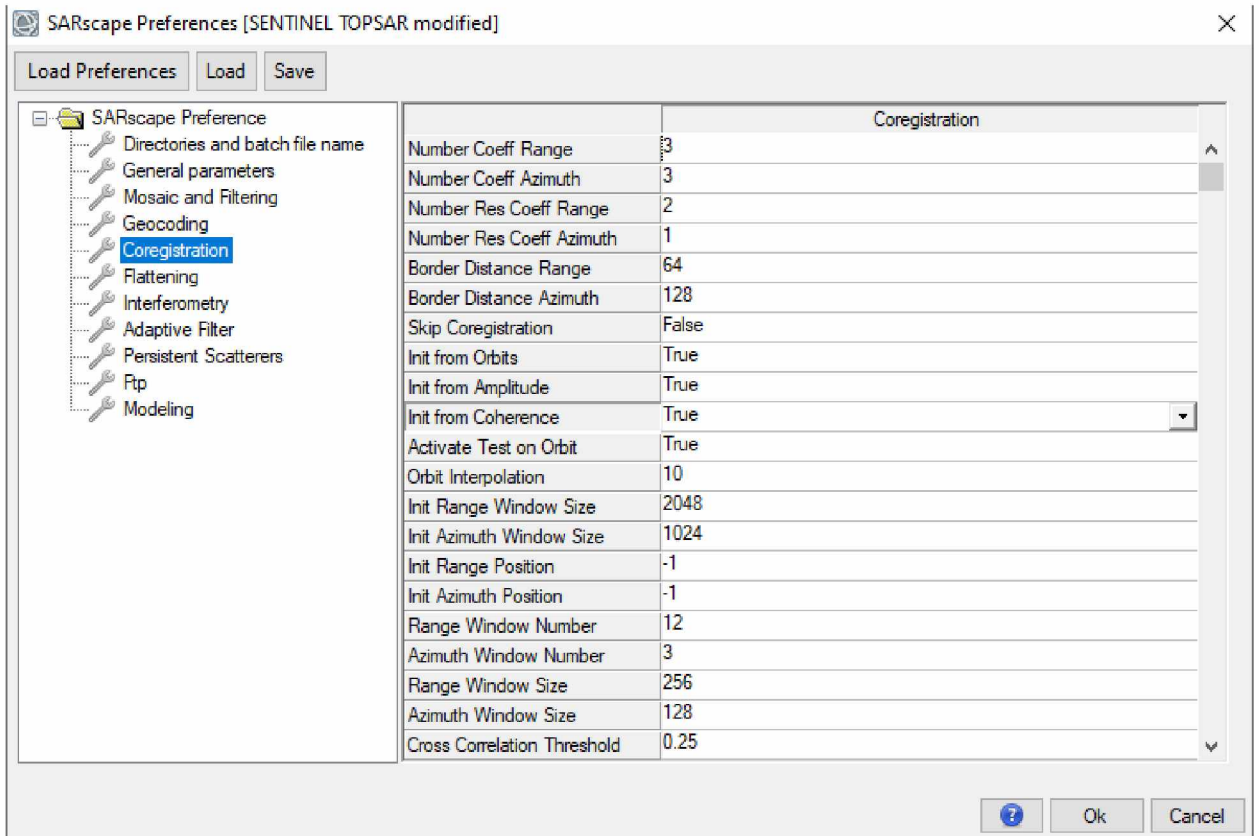


Рис. 3.4. Налаштування параметрів корегістрації програмного забезпечення ENVI SARscape

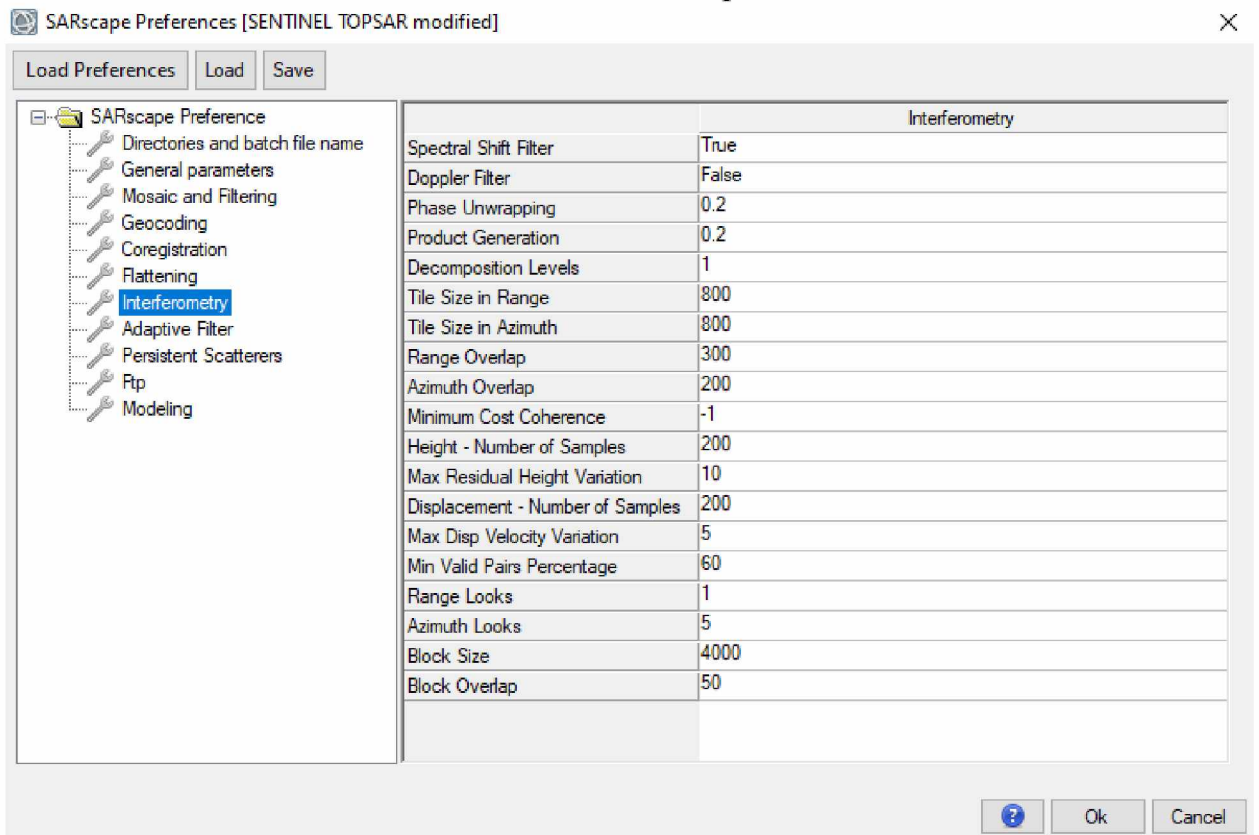


Рис. 3.5. Налаштування параметрів інтерферометрії програмного забезпечення ENVI SARscape

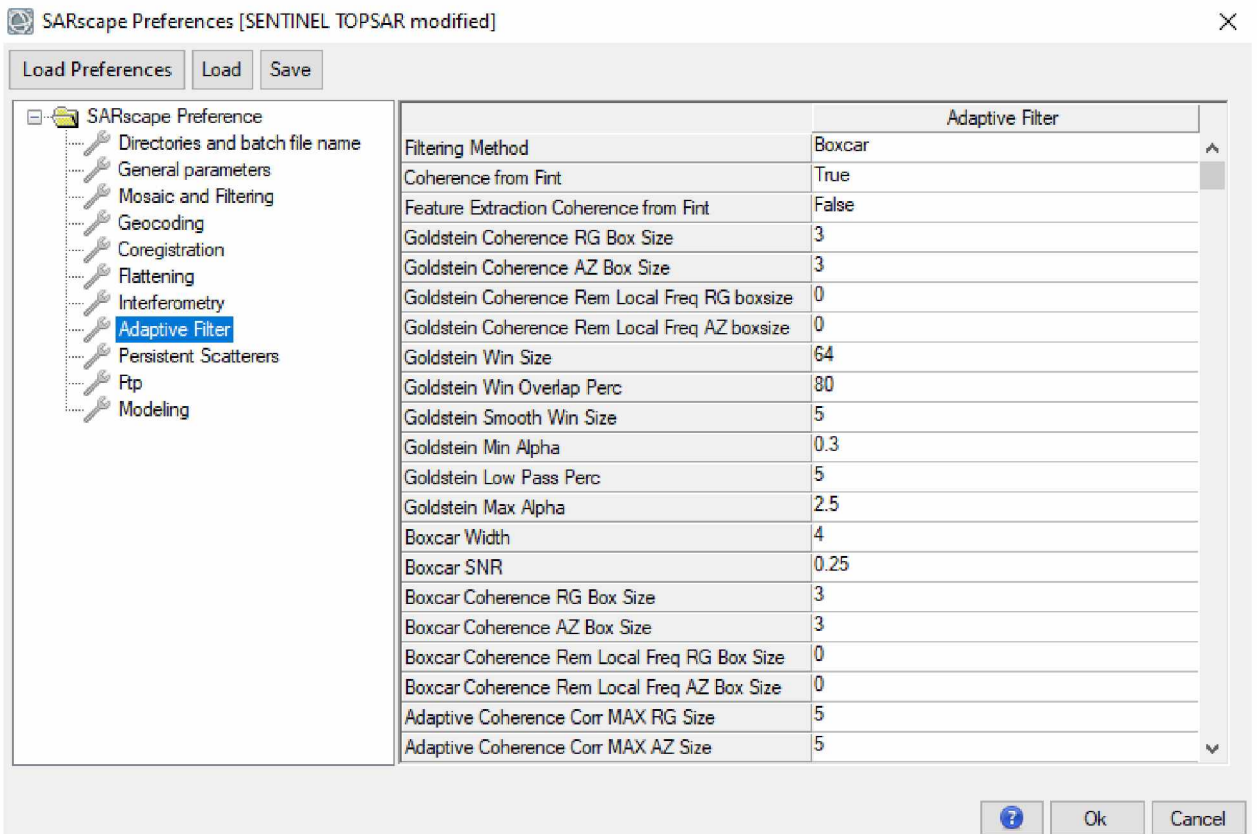


Рис. 3.6. Налаштування параметрів фільтру програмного забезпечення ENVI SARscape

Для методів PS та SBAS цикл інтерферометричного опрацювання у ENVI SARscape проводиться для кожної пари знімків інтерферометричної серії. Пари знімків вибираються програмою автоматично із завантаженої серії знімків (рис. 3.7, 3.8).

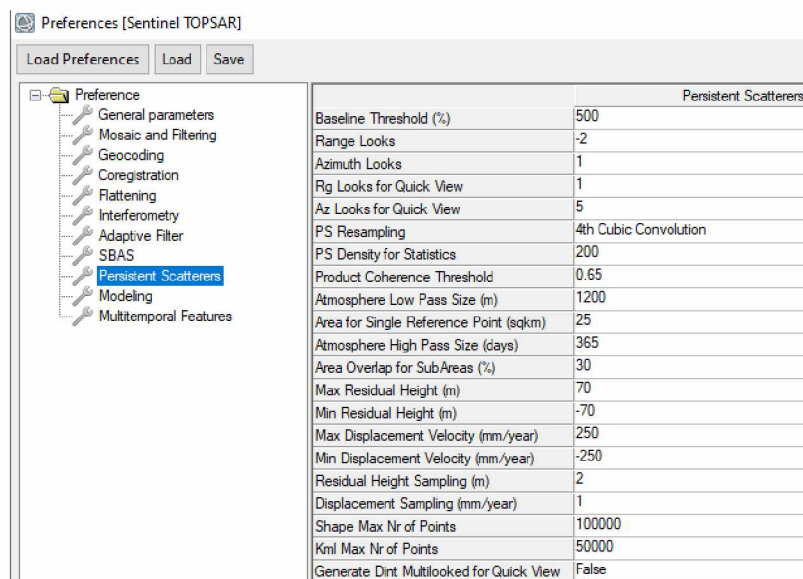


Рис. 3.7. Налаштування параметрів програмного забезпечення ENVI SARscape для методу PS

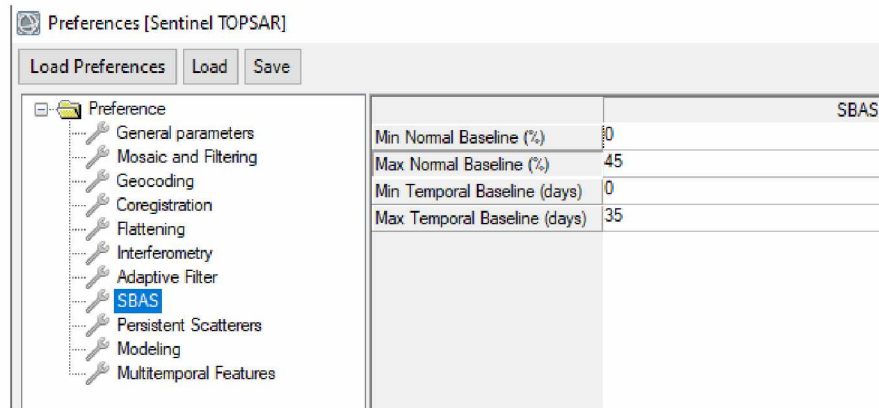


Рис. 3.8. Налаштування параметрів програмного забезпечення ENVI SARscape для методу SBAS

Задані параметри визначають, які пари знімків відповідають критеріям для кожного методу, оскільки кожен із них має певні обмеження щодо вибору інтерферометричних пар для подальшого проведення автоматизованого опрацювання. Для методу SBAS кількість пар склала 82, для методу PS – 33.

Відображення графіків для аналізування вибраних інтерферометричних даних на територію дослідження методами PS та SBAS (на осі X, абсцис– час у днях, на осі Y, ординат – перпендикулярна базисна лінія в метрах) представлено на рис. 3.9 та 3.10.

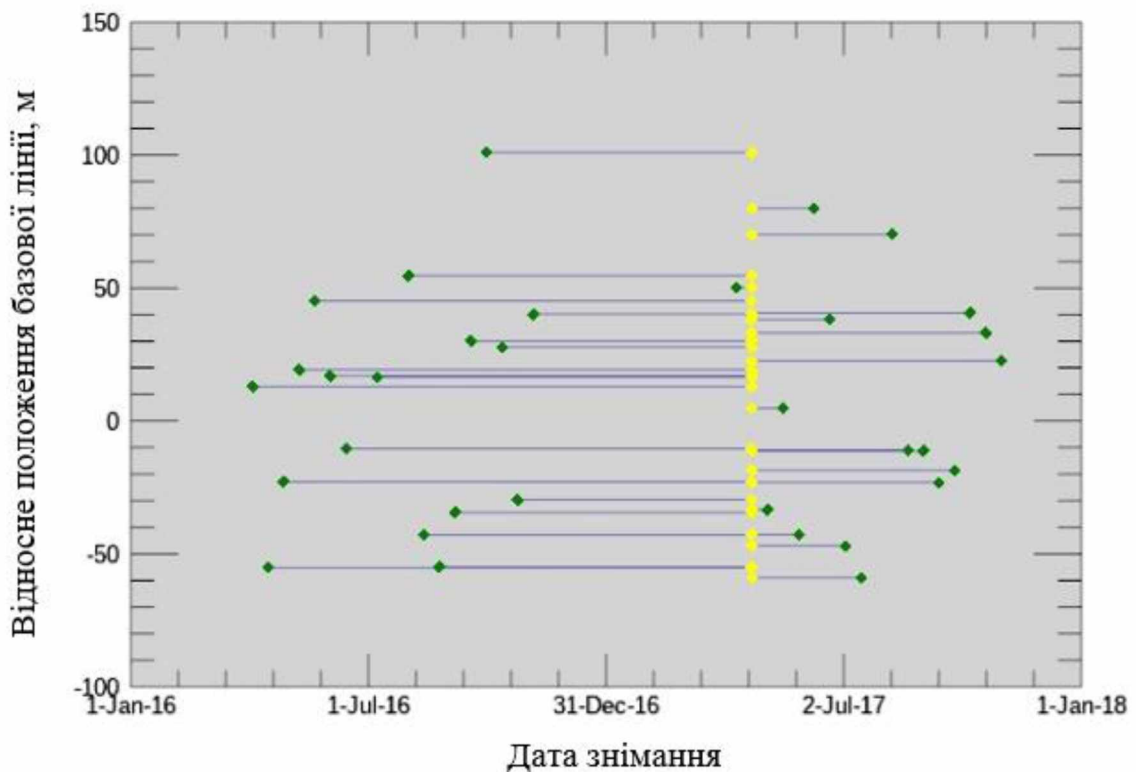


Рис. 3.9. Часово-базисний графік за методом постійних відбивачів (PS)

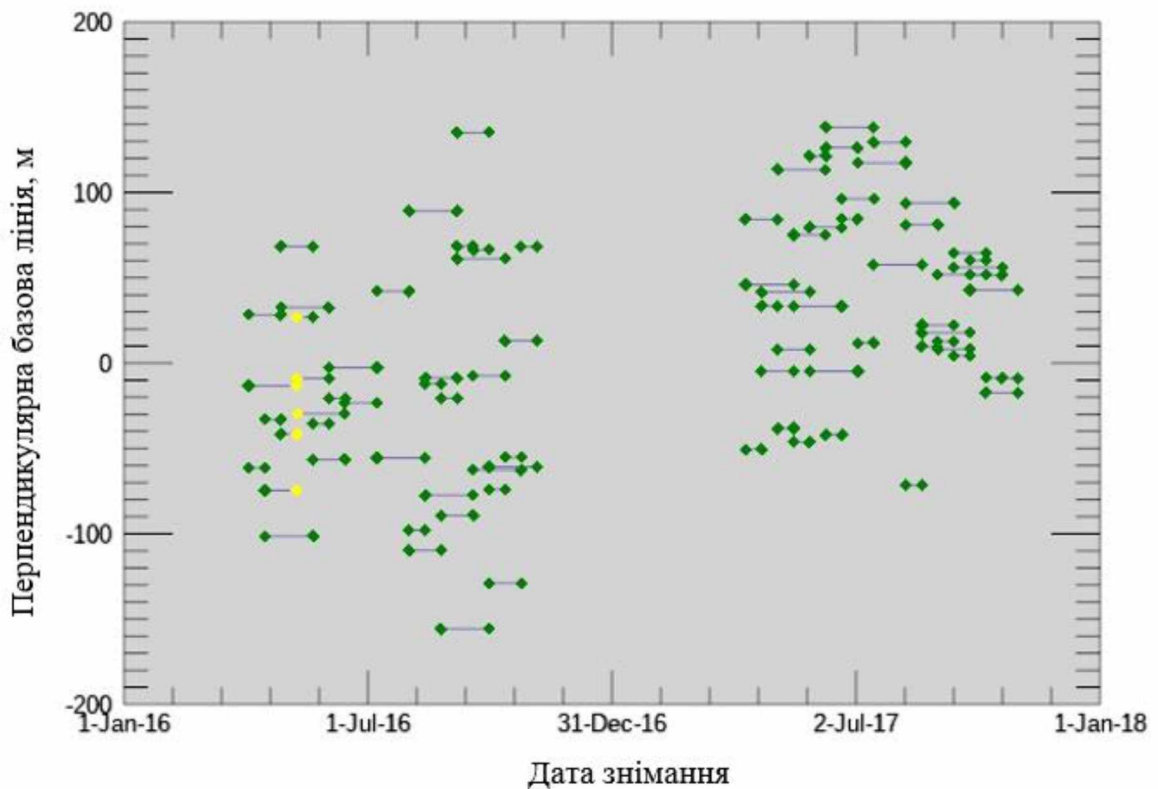


Рис. 3.10. Часово-базисний графік за методом малих базисних ліній (SBAS)

Першим кроком інтерферометричного опрацювання є точне просторове суміщення (корегістрація) основного і допоміжного радіолокаційних зображень інтерферометричної серії, що виконується в модулі SARscape в автоматичному режимі. На цьому етапі досягається точність корегістрації до одного або кількох пікселів, на другому – субпіксельна точність корегістрації, на третьому – точність до 1/100 пікселів.

Наступним етапом розраховано комплексні інтерферограми, що є результатом комплексного поелементного множення фаз радіолокаційних знімків інтерферометричної серії знімків. Комплексна інтерферограма загалом містить у собі кілька компонентів: топографічну фазу, деформаційну фазу, атмосферну фазу, електромагнітний шум. Необхідно виконати комплексне поелементне множення фаз для кожної пари знімків інтерферометричної серії. Основним вихідним файлом цієї процедури є диференціальна інтерферограма, що являє собою результат віднімання синтезованої фази рельєфу з комплексної інтерферограми.

Диференціальна інтерферограма містить у собі компоненту деформацій земної поверхні, що відбулися за період між зніманнями; компоненту фазового

шуму і компоненту впливу атмосферних умов під час знімання кожного зі знімків вибраної серії. Для зменшення рівня шуму використали адаптивне фільтрування диференціальної інтерферограми за допомогою фільтра Гольдштейна кожної пари знімків (рис. 3.12 – 3.15).

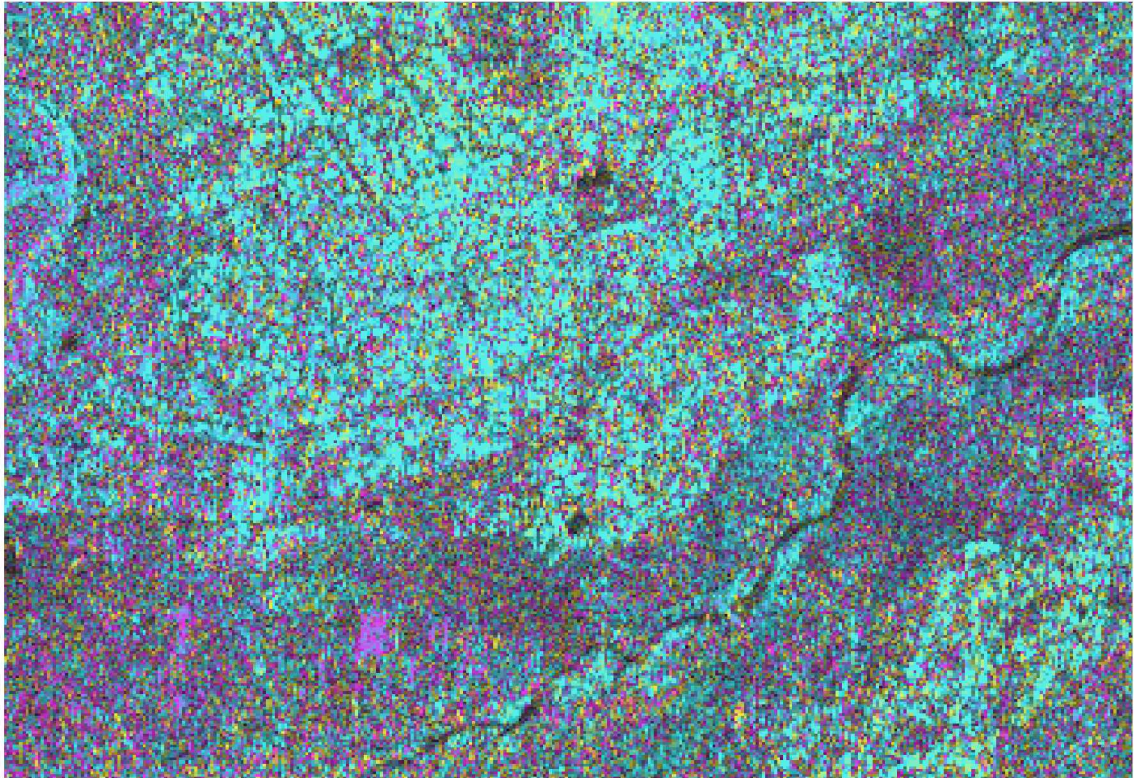


Рис. 3.11. Диференціальна інтерферограма за період 03.04.2016 – 15.04. 2016

Серед алгоритмів фільтрації фазового шуму (алгоритми простого усереднення з адаптивним підбором розміру вікна (Boxcar), адаптивний просторовий фільтр (Adaptive window), алгоритм Гольдштейна (Goldstein filter), з найкращими показниками за точністю та скороченням опрацювання, найбільшого поширення при інтерферометричному опрацюванні отримав алгоритм Гольдштейна. Після вичислення швидкого перетворення Фур'є комплексної інтерферограми в локальному вікні отриманий двосторонній спектр перетворюється наступним чином:

$$G(i, j) = |F(i, j)|^{1-\gamma} * F(i, j) \quad (3.1)$$

де γ – оцінка локального коефіцієнта когерентності. Для областей з низькою когерентністю коефіцієнт γ близький до нуля, і відповідні області піддаються найбільш інтенсивній фільтрації; для областей ж високою когерентністю $\gamma \approx 1$ фільтрація практично відсутня.

Після фільтрації фазового шуму (алгоритм Гольдштейна) можна спостерігати зменшення розмірів областей шумів та збільшення радіуса кореляції шуму.

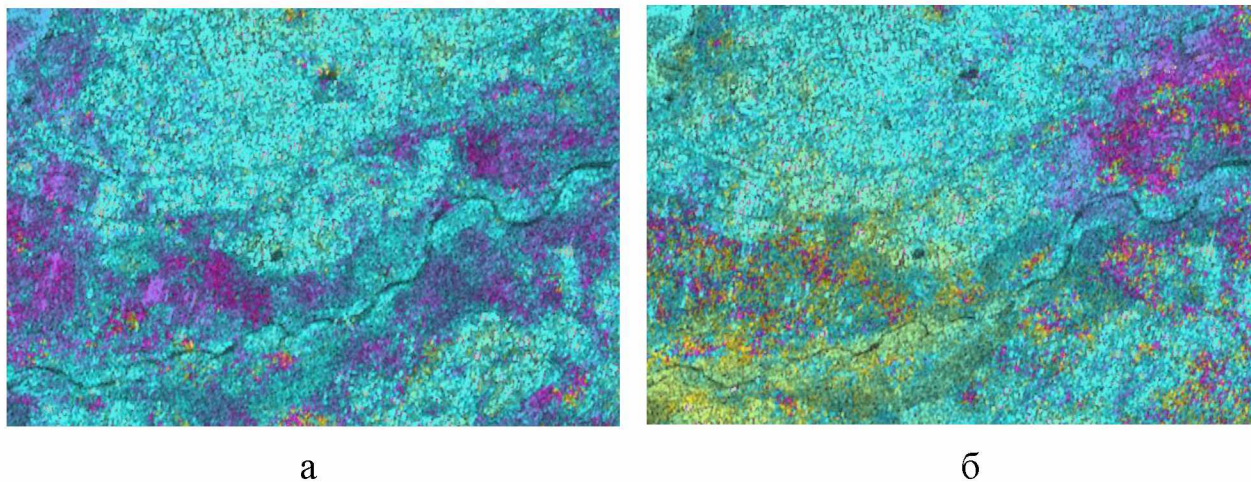


Рис. 3.12. Фільтрована диференціальна інтерферограма за допомогою фільтра Гольдштейна за період:

а) 03.04.2016 – 15.04. 2016;

б) 02.06.2016 – 14.06.2016

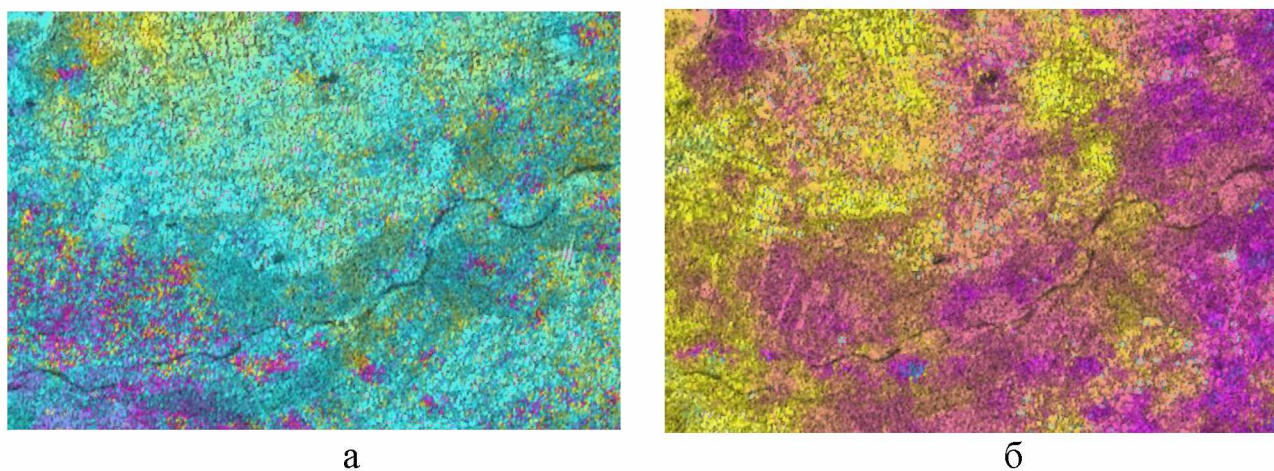


Рис. 3.13. Фільтрована диференціальна інтерферограма за допомогою фільтра Гольдштейна за період:

а) 01.08.2016 – 13.08.2016;

б) 24.10.2016 – 05.11.2016

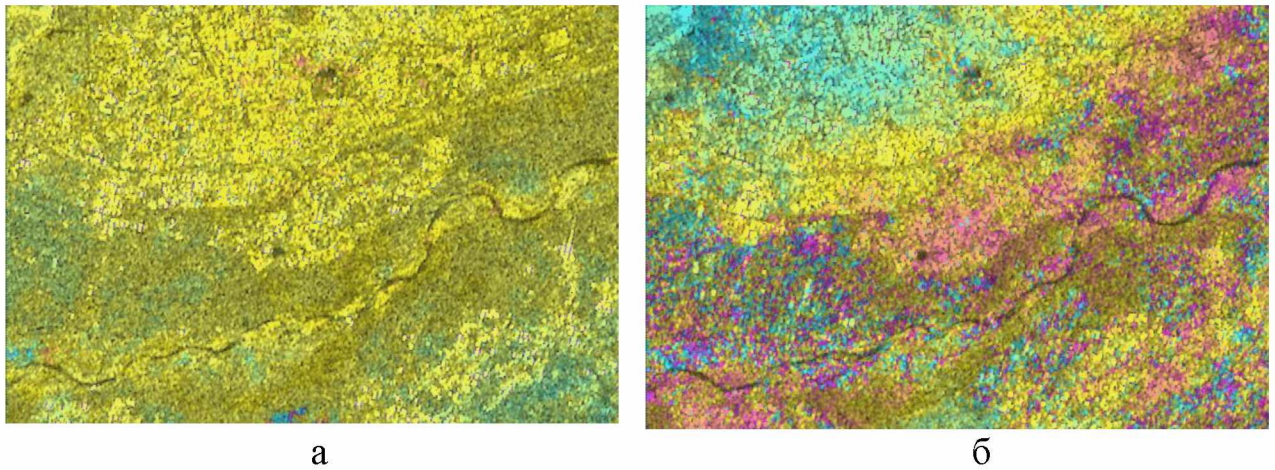


Рис. 3.14. Фільтрована диференціальна інтерферограма за допомогою фільтра

Гольдштейна за період:

а) 10.04.2017 – 22.04.2017;

б) 09.06.2017 – 21.06.2017

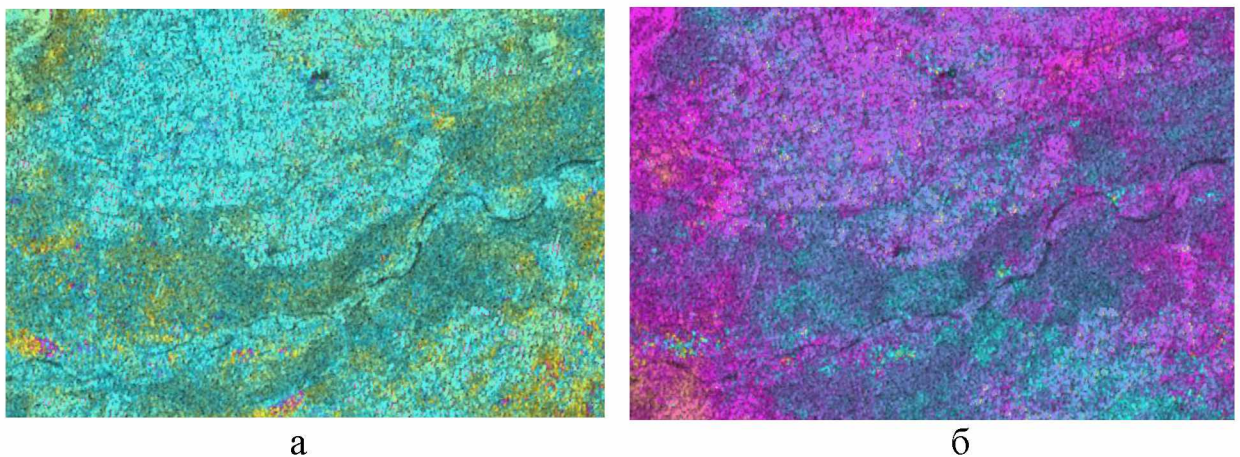


Рис. 3.15. Фільтрована диференціальна інтерферограма за допомогою фільтра

Гольдштейна за період:

а) 20.08.2017 – 01.09.2017;

б) 19.10.2017 – 31.10.2017

Фаза на диференціальній інтерферограмі має періодичну природу, вимірюється від $-\pi$ до $+\pi$, і тому, якщо величина зсувів земної поверхні перевищує половину довжини хвилі радіолокатора (величина різниці фаз перевищує 2π), то відбувається стрибок або розрив фази, рівний за величиною 2π , після чого різниця фаз продовжує зростати.

Щоб отримати безперервну фазу, тобто усунути стрибки фази на 2π , необхідно виконати процедуру її розгортання для кожної пари знімків [97]. Існує близько десятка алгоритмів здійснення операції розгортання фази, і кожен з них має свої переваги та недоліки. Розгортання фази виконано методом Minimum Cost Flow (мінімальної вартості потоку) з використанням триангуляції Делоне. У цьому методі відбувається відновлення градієнта розгорнутої фази шляхом зміни цілого числа періодів значення фази окремих пікселів.

Для відділення значущих значень фази від незначних використано такий допоміжний параметр як когерентність фаз (кореляція фаз). Вона вимірюється в безрозмірних величинах від 0 до 1 і розраховується за допомогою фільтрованої диференціальної інтерферограми (рис. 3.16).

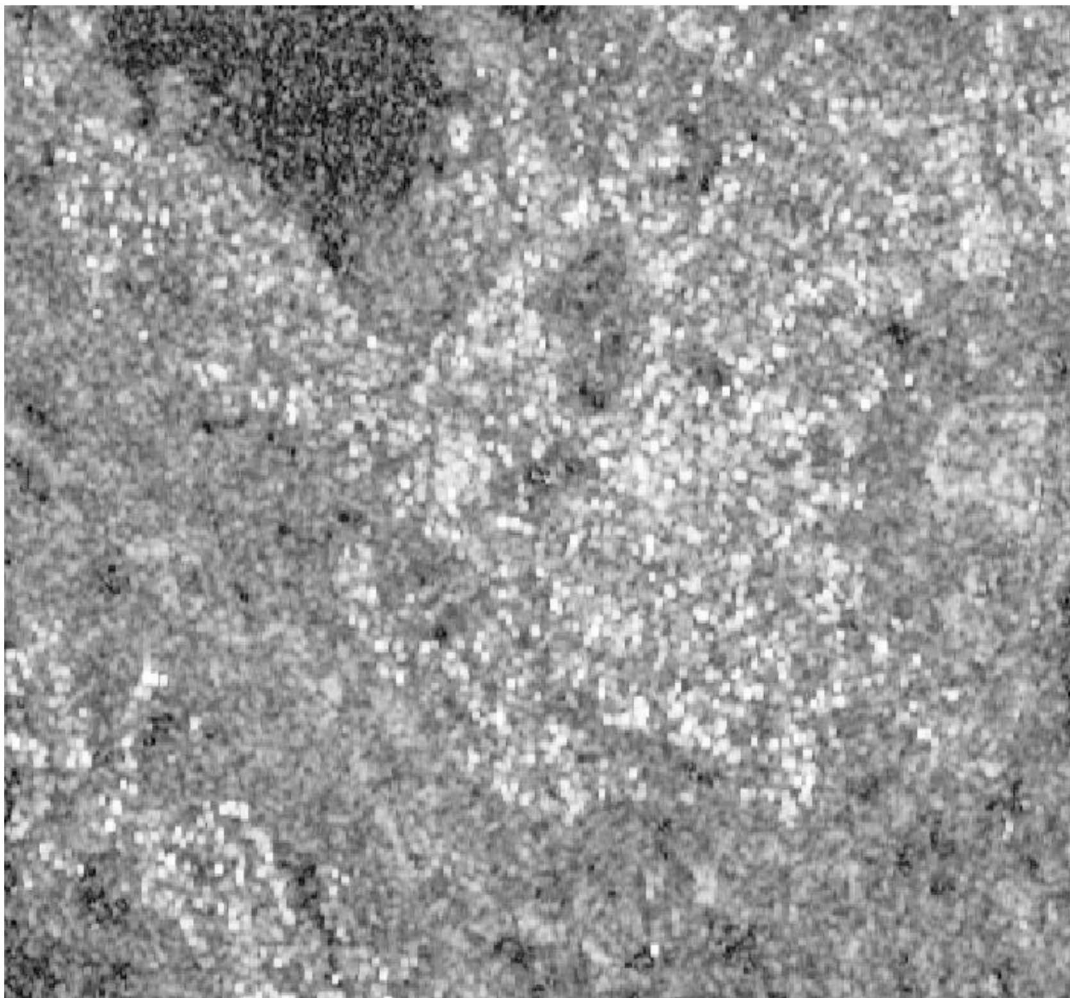


Рис. 3.16. Зображення когерентності за період 03.04.2016 – 15.04. 2016

На рисунку 3.16 добре видно, що активні осідання земної поверхні розташовані у центрі знімка і характеризуються низькими значеннями когерентності, тоді як решта площі знімка характеризується досить високими значеннями когерентності, що свідчить про незначні деформації або відсутність зрушень земної поверхні.

Далі виконано так звану інверсію, що відновлює послідовну в часі динаміку зсувів із перехресних у часі пар знімків. Після чого результати були геокодовані і переведені у векторний формат (див. п. 3.3).

3.3. Порівняльний аналіз результатів радіолокаційних та наземних спостережень для оцінки стану шахтного поля «Хотінь»

Калуш-Голинське родовище калійних солей розташоване у внутрішній зоні Передкарпатського передового прогину в Калуському районі Івано-Франківської області (див. розділ 1 рис. 1.1). Це, з багатьох точок зору, унікальний об'єкт, на якому поклади кам'яної солі експлуатувалися протягом багатьох століть.

Але, з іншого боку, унікальний об'єкт є потенційно небезпечний, оскільки може спричинити просідання земної поверхні, утворення провальних воронок, карстів, зсувів, забруднення водних об'єктів та земель. Особлива небезпека полягає в тому, що на цій території над відпрацьованими площами шахтних полів розташовано понад півтисячі житлових будинків, з яких 18 будинків уже знесено і люди переселені, 7 споруд промислового призначення на вентстволі «Хотінь» та магістральний газопровід «Угерсько-Івано-Франківськ» (рис. 3.21).

На сьогодні рудник ліквідований шляхом часткового заповнення відпрацьованих порожнин соляними розсолами понад 2502 тис. м³, що дозволило тільки частково стабілізувати процес просідання земної поверхні.

Внаслідок прийнятих свого часу неправильних рішень щодо розробки родовища, розташування й експлуатації хвостосховищ, відвалів, акумуляційних місткостей та способу ліквідування шахтних порожнин, що

утворилися в результаті господарської діяльності хімічних підприємств у Калуському районі, порушено екологічну рівновагу в товщі гірських порід Калуш-Голинського родовища калійних солей. Це спричинило численні провали земної поверхні над площею шахтних полів у Калуші, руйнування будинків і комунікацій (рис. 3.17) [52].



Рис. 3.17. Приклад руйнування будівель у Калуському районі [52]

Необхідність проведення спостережень на такому техногенно-небезпечному об'єкті очевидна. Тому перші серії вимірювань традиційною методикою високоточного геометричного нівелювання проведено на цьому об'єкті з 1965 р. до 2010 р. і далі були припинені через відсутність фінансування.

На особливу увагу заслуговує частина шахтного поля родовища, через яку проходить магістральний газопровід високого тиску діаметром 250 мм. Для оцінювання його експлуатаційної надійності в 2017 році вжито комплекс заходів, частина яких спрямована на встановлення границь мульди осідання в районі розміщення газопроводу. Для цього у 2017 році проведено серію спостережень за осіданням реперів частини профільних ліній в районі газопроводу та дослідження осідань цього району методами високоточного геометричного нівелювання [15].

Геодезичні вимірювання проведено за методикою спостережень, розробленою спеціально для цього об'єкта із повним дотриманням нормативних вимог [41, 49].

Складено відомості сумарних і поточних осідань контрольованих (деформаційних) реперів на основі електронних таблиць MS Excel для об'єктів

шахтного поля «Хотінь», що дозволило автоматично підраховувати всі параметри, які характеризують процеси осідання земної поверхні як за кожною профільною лінією, так і на площі шахтного поля.

Матеріали спостережень урівнювали параметричним методом і оцінювали точність вимірювань із використанням спеціально розробленого програмного комплексу, що базується на вирішенні оптимізаційного завдання нелінійного програмування. Виконано математично статистичне опрацювання для прогнозування динаміки процесів, контрольованих методами тренд-аналізу.

За результатами нівелювання та опрацювання відомостей висот ґрунтових реперів за період від початку їхніх спостережень з 1957 до 2017 років знайдено найстабільніші реperi профільних ліній, висоти яких прийняті незмінними. Надалі ці реperi послужили вихідними для підрахунку висот та осідань усіх інших реперів профільних ліній.

Створені графіки осідань земної поверхні як за результатами останніх чотирьох серій спостережень, так і за весь період спостережень (рис. 3.18, 3.19). На рисунках представлено графіки осідання профільних ліній III та IV спостережної станції «Хотинське поле», що наочно демонструють динаміку осідання земної поверхні, яка в епіцентрі досягає величин до 2500 мм.

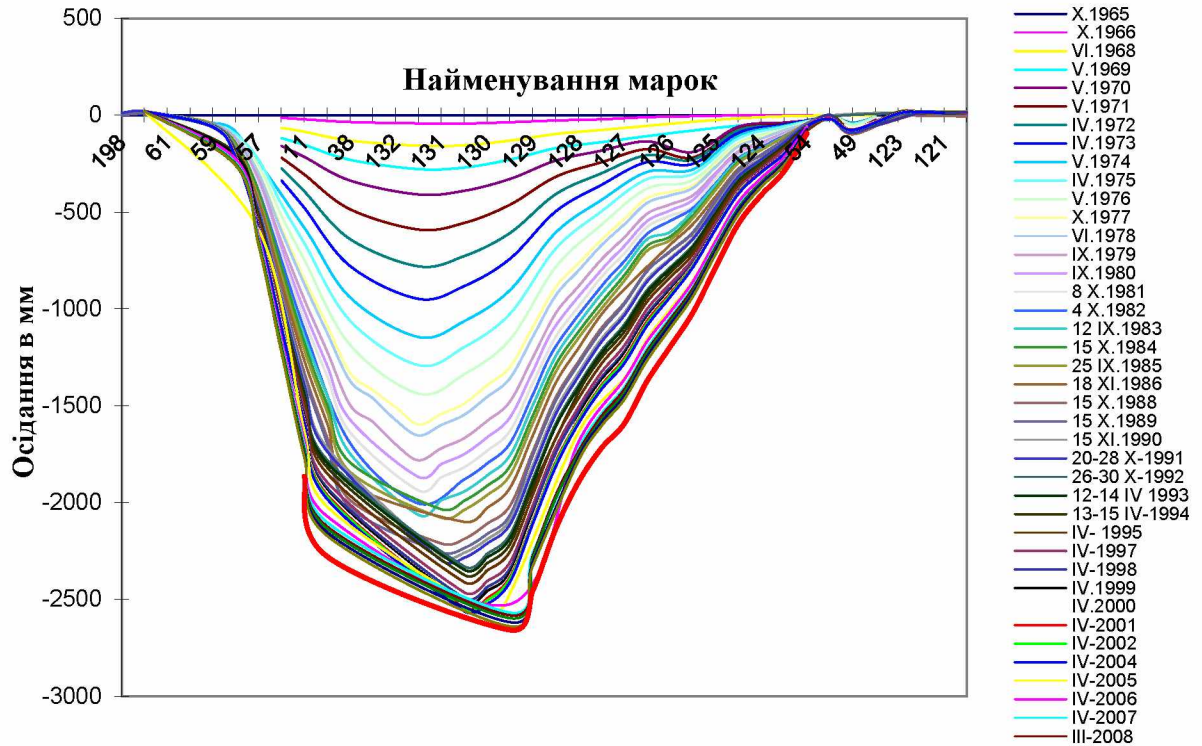


Рис. 3.18. Графік осідання профільної лінії III (Рп 198 – Рп 120) спостережної станції «Хотинське поле» за результатами вимірювань 1965- 2017 рр.

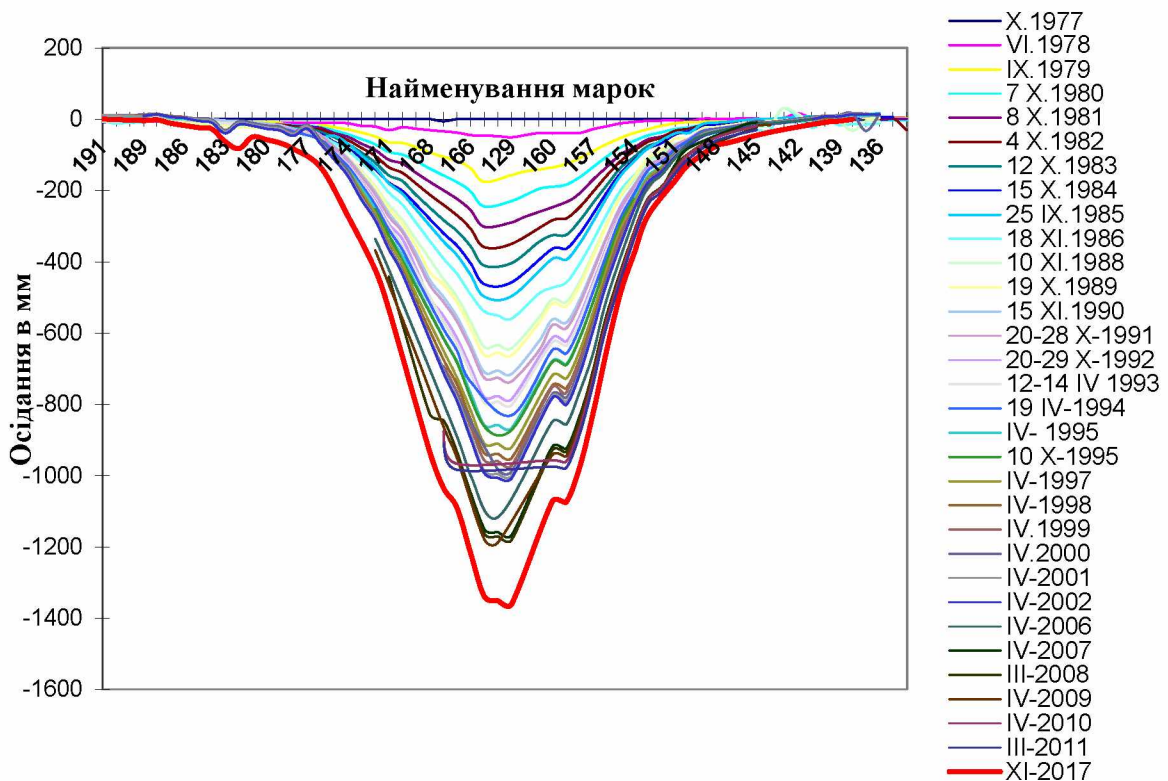


Рис. 3.19. Графік осідання профільної лінії IV (Рп 191 - Рп 134) спостережної станції «Хотинське поле» за результатами вимірювань 1977-2017 рр.

З аналізу геодезичних досліджень попередніх років та серії вимірювань XI.2017 р. виділено зони з аномальними величинами осідань і побудовано мульди осідання (рис. 3.20), з яких видно, що трубопровід перебуває на краю мульди.

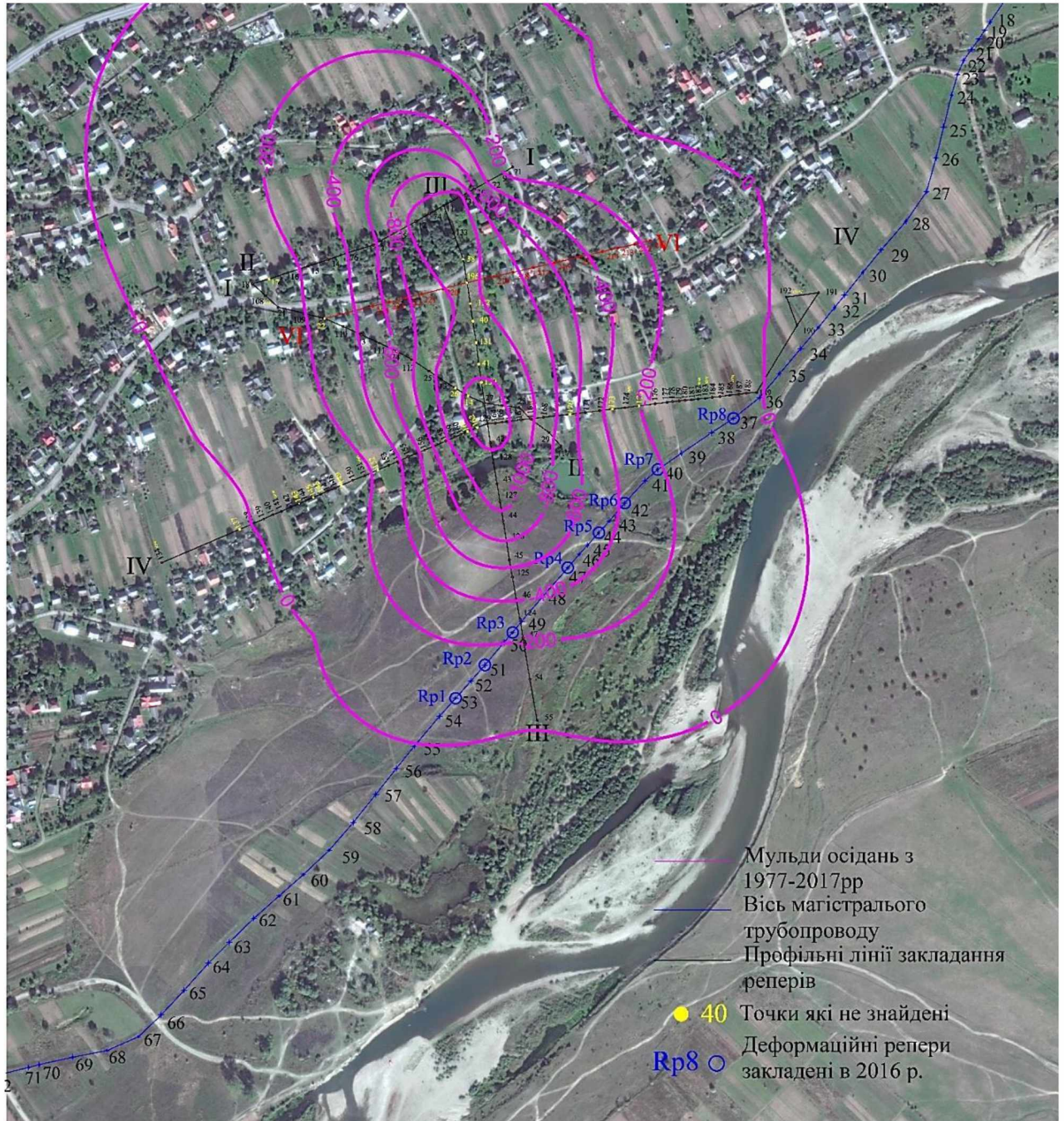


Рис. 3.20. Картосхема розміщення профільних ліній деформаційних реперів, осі магістрального газопроводу та мульд осідань на території шахтного поля «Хотінь»

Центр активної зони мульди осідань – у районі Rp25-28, осідання за весь період спостережень доходять до -2658 мм –Rp 27.

Найближче до газопроводу розташовується Rp 124, осідання якого за весь період спостережень досягли -413 мм. На особливу увагу заслуговує той факт, що за період 2011–2017 р.р. його осідання склало -42 мм, тобто швидкість осідань за останні 6 років в середньому складає приблизно 7 мм на рік.

Для вивчення характеристик земної поверхні та приповерхневих об'єктів території шахтного поля «Хотінь» виконано підбір серії знімків (34 знімка) на період з 03.04.2016 р. до 31.10.2017 із космічного апарату Sentinel- 1.

Дані, отримані з космічного апарату Sentinel-1, містять інформацію про відмінну фазову стабільність радіолокаторів і коректну орбіту супутників, що свідчить про готовність даних для практичних і наукових досліджень, насамперед, для радіолокаційної інтерферометрії.

Кожен піксель кадру радіолокаційного сигналу становить когерентну суму відображень зондувального сигналу від точкових цілей, розташованих на поверхні в межах елемента просторової роздільної здатності. Під час реєстрування сигналу радіолокатор зберігає фазу і амплітуду.

Основою інтерферометричного опрацювання є різниця фаз відбитих сигналів, результатом якої є отримання перевищення одного відбитого елемента поверхні щодо іншого. Методика визначення осідань (підняття) земної поверхні та споруд ґрунтується на загальному виявленні постійних об'єктів (відбивачів) на 34 серіях знімків Persistent Scatterers (PS) Interferometry (інтерферометрія постійних розсіювачів радіолокаційних сигналів) і Small Baselines Series (SBAS) Interferometry (інтерферометрія серій малих базисних ліній).

Враховуючи, що територія досліджуваного об'єкта є забудованою та вкрита рослинністю, опрацювання вище згаданих методів було проведено в ліцензованому програмному забезпеченні ENVI SARscape (SARMAP, Швейцарія) [120, 120].

Відповідно до цього поставленого завдання у період з 03.04.2016 р. до 31.10.2017 р. зазначеними вище методами та засобами отримано векторні файли з набором точок (відбивачів радіолокаційного сигналу). У цих точках алгоритм знайшов постійні стабільні відбивачі радіолокаційного сигналу (72 точки за методом SBAS – табл. 3.2 та 1557 точок за методом PS – табл. 3.1). У кожній точці були визначені вертикальні зміщення об'єкта за цей період (рис. 3.21).

У наслідок використання довгих часових серій зображень, отриманих радіолокаторами з синтезованою апертурою, пригнічуються похибки орбітальних даних, вплив атмосферних явищ. Метод PS ефективний на територіях, де є велика кількість стійких відбивачів, зазвичай техногенних (міська забудова, мости, естакади тощо.) [25, 93, 99].

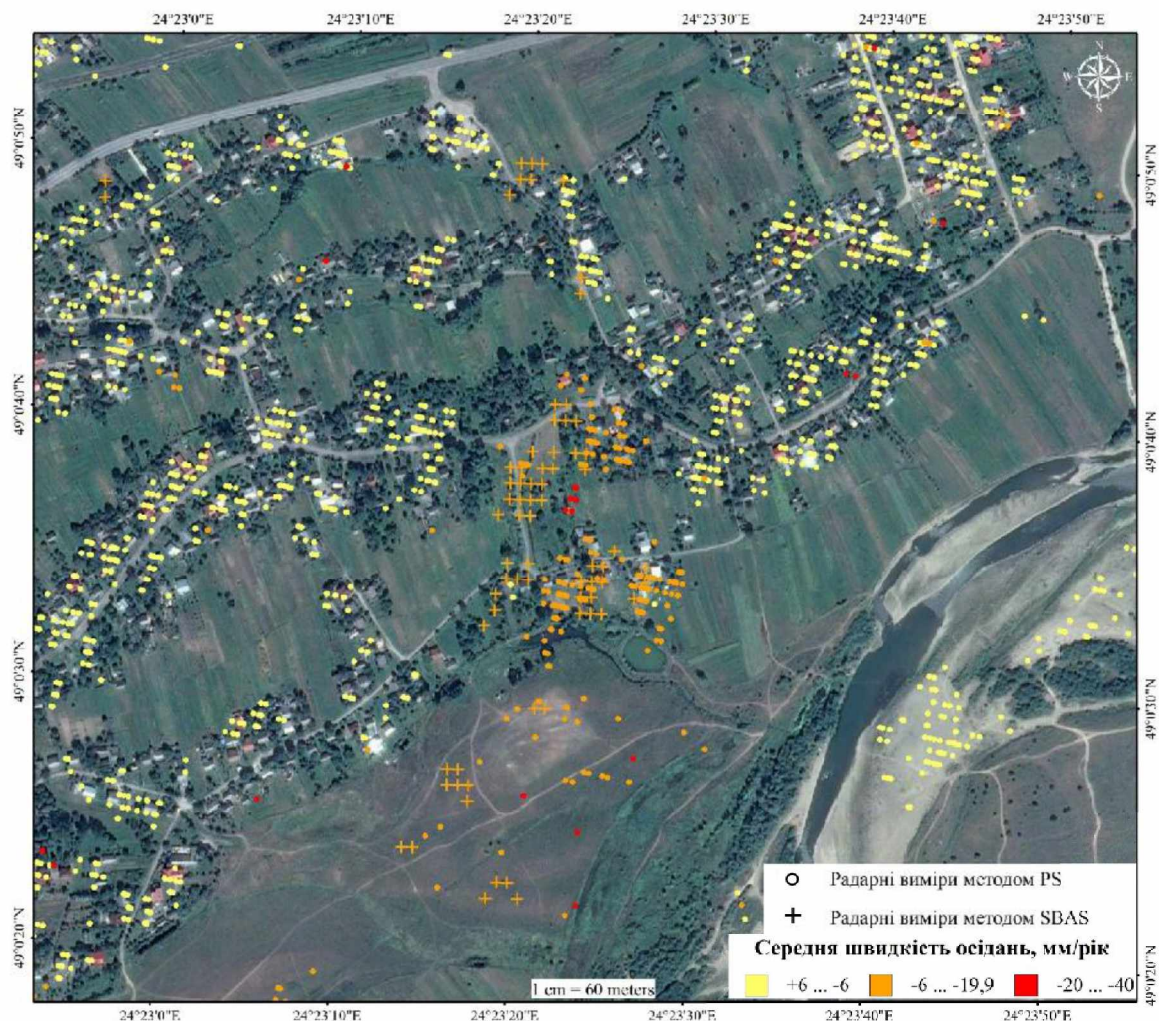


Рис. 3.21. Схема розміщення постійних стабільних відбивачів радіолокаційного сигналу

Таблиця 3.1

Результати опрацювання даних радіолокаційної інтерферометрії методом постійних відбивачів (PS) території шахтного поля «Хотінь»

OBJECTID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...	1557
Vel_mm_y_	7,2	9,6	-22,4	-14,9	22,5	-7,6	-9,3	9,0	9,2	6,8	6,0	-12,9		11,6
Coherence	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7		0,7
MuSigma	2,0	1,7	2,1	1,8	2,3	1,9	2,6	2,3	2,0	2,4	2,5	2,8		1,8
H_Precisio	7,2	7,7	5,4	7,2	7,8	7,9	6,1	7,4	8,5	7,3	8,9	7,7		10,1
Range	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0	3635,0		3635,0
Azimuth	752,0	752,0	752,0	752,0	752,0	752,0	752,0	752,0	752,0	752,0	752,0	752,0		752,0
V_Precisio	1,2	1,3	0,9	1,2	1,3	1,3	1,0	1,2	1,4	1,2	1,5	1,3		1,7
Lon	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4		24,4
Lat	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0		49,0
X	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4		24,4
Y	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0		49,0
Z	270,9	279,1	287,1	269,7	273,8	281,9	276,6	268,8	262,3	265,1	270,4	286,7		291,9
Z_Geoid	303,2	311,3	319,3	302,0	306,1	314,2	308,8	301,1	294,6	297,3	302,6	319,0		324,2
LOS_Az	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8		-82,7
LOS_In	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2		35,3
H_correcti	-1,9	6,1	12,0	-6,5	0,1	9,9	4,0	-3,7	-10,2	-7,8	-2,5	12,2		14,4
Tot_D_mm_	227,2	207,8	-753,9	-317,9	623,6	-249,9	-244,0	146,2	133,4	73,1	14,2	-396,1		288,6
D_20160403	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
D_20160415	-0,2	-4,1	-6,1	-10,9	-3,0	-11,9	-7,1	-6,3	-6,9	-6,0	-6,4	-5,9		-1,9
D_20160427	-5,9	11,1	-7,2	-2,4	4,0	-1,2	-3,2	-4,6	-4,3	-3,6	-3,4	-3,7		-1,7
D_20160509	-0,4	-3,7	-7,2	-0,5	2,2	-5,8	-3,9	1,4	-2,1	-1,7	-2,7	-2,1		1,1
D_20160521	-2,6	-6,2	-10,8	-2,4	-1,3	-2,5	-3,5	-3,8	-5,4	-3,1	-5,5	-2,7		-2,9
D_20160602	9,3	6,9	-14,2	4,7	3,5	-4,2	4,4	-3,8	-4,5	-1,7	-3,6	-4,5		3,5

Продовження табл. 3.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...	1557
D_20160614	5,4	-0,3	-9,4	1,3	2,2	-11,8	7,3	-3,9	-4,7	-4,4	-4,2	-4,3		5,1
D_20160708	3,8	-2,1	-14,8	-2,7	7,1	-7,0	6,1	-10,0	-8,0	-6,4	-6,0	-3,7		2,9
D_20160801	2,9	7,2	-12,5	0,5	2,5	0,0	0,4	3,8	2,5	2,8	0,1	-3,7		-1,3
D_20160813	2,1	1,2	-10,5	-2,7	11,2	-8,2	-9,4	1,9	1,2	-2,9	-9,5	-4,0		7,5
D_20160825	2,5	1,3	-3,4	1,3	4,4	-2,0	-2,4	1,4	-0,8	2,8	0,2	-2,7		2,4
D_20160906	5,7	1,6	-11,7	-5,7	13,4	1,0	-1,4	2,5	2,1	1,7	1,4	2,4		3,2
D_20160918	3,5	2,9	-12,6	-5,9	7,3	-4,2	-5,4	2,9	1,0	3,2	0,7	-0,2		4,8
D_20160930	7,7	5,0	-11,8	-7,7	11,8	-4,8	-5,9	0,2	-1,3	0,3	-1,3	-7,6		2,9
D_20161012	-3,9	7,5	-15,1	-3,2	17,4	-1,2	-2,7	-6,9	-4,8	-1,9	-2,5	-19,2		7,9
D_20161024	5,1	-0,7	-17,2	3,9	11,0	-6,7	-4,7	4,3	3,3	3,6	1,2	-12,5		4,9
D_20161105	-0,2	-1,1	-12,3	2,4	7,4	-2,4	-8,4	2,7	2,2	2,3	-0,4	-15,5		10,6
D_20170410	9,6	5,3	-34,7	-11,2	29,5	-9,8	-10,2	13,5	11,0	-0,5	-2,5	-19,9		15,8
D_20170422	0,8	9,5	-34,8	-19,7	28,4	-4,5	-7,1	15,1	8,8	-2,3	-3,0	-19,1		2,5
D_20170504	11,8	12,0	-33,5	-12,1	20,4	-7,8	-6,4	7,6	7,4	3,2	0,8	-16,9		10,0
D_20170516	10,1	8,7	-33,0	-12,8	34,1	-8,5	-11,3	4,8	4,4	3,4	1,8	-17,9		10,2
D_20170528	13,1	13,1	-32,2	-18,5	32,0	-2,8	-9,4	4,6	22,6	5,3	2,0	-16,2		8,9
D_20170609	9,8	3,2	-32,4	-13,8	32,2	-20,3	-19,6	1,1	3,0	2,7	0,5	-18,7		16,4
D_20170621	8,8	9,9	-29,4	-16,5	28,1	0,9	-7,1	10,3	9,6	9,4	6,4	-15,1		9,9
D_20170703	3,6	9,0	-32,0	-15,5	32,6	-9,1	-7,1	3,3	6,7	2,7	2,9	-17,0		19,0
D_20170715	12,0	11,0	-28,5	-17,4	29,6	-10,9	-16,5	13,5	7,4	3,8	1,8	-14,4		18,7
D_20170808	21,4	11,8	-35,4	-17,0	28,7	-11,3	-11,8	10,0	8,5	11,5	7,1	-16,4		29,3
D_20170820	10,0	8,3	-35,4	-13,5	27,6	-10,9	-12,4	10,5	9,8	3,2	1,5	-21,6		4,5
D_20170901	11,4	8,1	-32,1	-15,8	32,1	-18,1	-8,9	11,8	10,5	13,8	10,7	-24,6		17,0
D_20170913	16,8	10,1	-37,6	-21,5	29,9	-11,7	-14,1	10,2	9,8	10,6	9,0	-19,5		16,7
D_20170925	11,6	16,2	-36,0	-22,9	30,0	-19,9	-23,9	11,2	10,3	11,8	10,4	-15,8		20,5
D_20171007	9,0	11,0	-35,3	-15,5	30,5	-10,7	-13,4	7,0	6,9	5,2	5,5	-18,3		18,2
D_20171019	18,8	16,8	-39,9	-20,2	38,7	-6,9	-11,0	9,8	7,9	5,6	4,6	-16,4		9,1
D_20171031	13,6	17,4	-34,7	-24,1	38,4	-14,6	-13,9	20,1	19,2	-0,9	-3,3	-18,4		13,1

Таблиця 3.2

Результати опрацювання даних радіолокаційної інтерферометрії методом малих базисних ліній (SBAS) території шахтного поля «Хотінь»

OBJECTID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...	72
Vel_mm_y_	-14,0	-13,4	-11,0	-12,1	-11,1	-15,5	-10,8	-12,3	-10,2	-11,6	-12,8	-11,0		-14,7
Coherence	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8		0,7
MuSigma	5,9	4,9	5,6	4,2	3,3	6,8	5,6	5,2	5,2	5,8	6,3	4,9		4,8
H_Precisio	13,5	11,6	13,5	9,4	7,6	15,9	12,6	11,7	11,5	13,1	14,2	10,8		11,9
Range	476,8	290,9	305,7	581,3	181,6	549,0	234,2	465,1	229,4	220,4	256,8	290,6		674,4
Azimuth	8,5	7,1	4,5	7,3	5,8	9,1	1,7	8,0	1,8	11,4	9,2	2,3		13,5
V_Precisio	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4		24,4
Lon	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0		49,0
Lat	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4		24,4
X	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0		49,0
Y	281,3	281,4	281,4	281,6	281,6	281,5	287,5	282,6	287,7	283,4	283,5	281,0		292,3
Z	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,8	-82,7	-82,8	-82,7	-82,8	-82,8	-82,8		-82,8
Z_Geoid	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3		35,3
LOS_Az	-5,7	-5,9	-5,9	-6,0	-6,2	-6,3	-11,3	-7,1	-11,2	-9,2	-9,4	-5,2		-17,8
LOS_In	-0,5	0,0	0,8	-0,9	-0,1	-2,0	1,3	-2,1	1,0	2,1	2,3	-0,6		0,5
H_correcti	-11,5	-11,0	-9,0	-9,8	-9,0	-12,7	-8,8	-10,0	-8,3	-9,5	-10,4	-8,9		-12,0
Tot_D_mm_	8,5	7,1	4,5	7,3	5,8	9,1	1,7	8,0	1,8	11,4	9,2	2,3		13,5
D_20160403	-381,0	-344,3	-251,9	-348,0	-287,9	-480,7	-225,4	-403,0	-223,4	-214,5	-235,0	-305,7		-359,7
D_20160415	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
D_20160427	0,1	0,0	0,6	0,0	-0,1	-2,4	2,0	-0,9	1,5	-0,2	0,1	0,1		-0,7
D_20160509	-0,6	-0,6	-0,3	-0,5	-0,5	-1,3	-0,2	-0,7	-0,3	0,0	0,3	-0,4		-1,9
D_20160521	-0,5	-0,3	0,0	-0,4	-0,3	-3,6	0,7	-1,2	0,3	-1,3	-0,9	-1,6		-3,6
D_20160602	-1,5	-1,5	-1,5	-1,7	-1,5	-3,8	-0,6	-1,8	-0,9	-1,1	-0,3	-1,8		-5,7

Продовження табл. 3.2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...	72
D_20160614	-4,7	-3,0	-0,9	-4,9	-2,8	-5,0	0,1	-7,4	-0,1	-3,7	-2,4	-2,6		-1,8
D_20160708	-5,1	-3,5	-1,4	-5,3	-3,2	-5,2	-0,4	-7,6	-0,6	-3,9	-2,5	-3,3		-2,5
D_20160801	-6,8	-4,9	-1,8	-6,7	-4,2	-7,4	-0,5	-8,5	-1,0	-1,9	-1,4	-2,0		-3,6
D_20160813	-7,5	-6,1	-3,2	-7,4	-5,2	-9,5	0,2	-9,6	-0,3	-1,5	-2,2	-4,4		-4,7
D_20160825	-9,8	-8,7	-6,1	-9,7	-7,8	-13,7	-1,5	-11,8	-1,7	-1,2	-1,8	-6,4		-4,2
D_20160906	-8,8	-7,7	-4,8	-8,5	-6,4	-13,7	-2,8	-11,1	-2,9	-1,1	-2,0	-5,2		-3,8
D_20160918	-8,6	-7,6	-4,6	-8,3	-6,2	-12,7	-4,1	-10,7	-4,1	-0,8	-2,2	-6,2		-5,6
D_20160930	-7,9	-7,0	-4,5	-7,7	-5,7	-11,6	-2,2	-10,7	-2,5	-0,1	-1,1	-6,3		-5,1
D_20161012	-10,3	-9,1	-6,1	-9,4	-7,5	-13,0	-5,9	-11,1	-6,0	-1,2	-2,4	-8,5		-8,3
D_20161024	-8,8	-8,0	-5,6	-8,5	-6,8	-13,1	-7,9	-10,9	-7,9	-2,4	-3,5	-9,4		-9,6
D_20161105	-6,7	-6,0	-3,9	-6,5	-4,9	-10,2	-4,6	-9,0	-4,5	-1,5	-2,8	-8,0		-7,0
D_20170410	-9,3	-8,6	-6,5	-8,6	-7,0	-11,6	-8,4	-10,2	-8,2	-1,9	-3,0	-12,5		-12,0
D_20170422	-10,8	-9,8	-7,2	-9,8	-8,1	-12,8	-8,0	-11,1	-7,4	-3,7	-5,4	-14,0		-11,0
D_20170504	-9,9	-9,0	-6,5	-9,0	-7,3	-11,4	-9,7	-10,6	-9,3	-2,3	-3,8	-12,9		-10,6
D_20170516	-11,7	-10,7	-7,6	-10,9	-8,8	-12,4	-10,3	-13,1	-9,6	-6,0	-7,7	-14,4		-11,1
D_20170528	-12,3	-11,4	-8,5	-11,2	-9,3	-16,9	-9,6	-12,5	-8,5	-3,5	-4,6	-13,2		-11,9
D_20170609	-12,6	-11,9	-8,7	-11,4	-9,6	-17,6	-10,2	-12,7	-9,8	-6,8	-8,3	-14,8		-15,3
D_20170621	-15,9	-15,3	-12,2	-14,5	-12,8	-23,3	-9,8	-15,6	-9,6	-10,9	-11,6	-13,6		-19,0
D_20170703	-20,8	-19,5	-15,5	-18,5	-16,1	-25,2	-12,5	-20,2	-12,4	-13,7	-13,8	-13,4		-15,1
D_20170715	-22,1	-20,7	-16,9	-19,9	-17,4	-26,0	-12,6	-21,8	-12,7	-15,3	-16,0	-15,4		-18,6
D_20170808	-16,7	-16,0	-12,8	-15,2	-13,2	-25,9	-12,0	-17,6	-12,0	-15,0	-15,6	-12,3		-15,4
D_20170820	-18,2	-16,9	-13,1	-16,5	-13,8	-23,5	-11,9	-18,6	-12,0	-15,5	-16,7	-11,6		-15,9
D_20170901	-25,5	-23,4	-18,4	-22,3	-19,6	-28,0	-16,2	-23,6	-15,9	-18,0	-19,2	-16,9		-25,8
D_20170913	-27,3	-25,1	-19,7	-23,8	-21,2	-29,2	-15,2	-25,3	-14,5	-21,6	-23,0	-19,5		-28,3
D_20170925	-27,7	-25,2	-19,4	-24,2	-21,4	-30,3	-17,4	-25,6	-17,1	-21,9	-23,0	-19,8		-27,9
D_20171007	-23,3	-21,3	-16,2	-20,1	-17,4	-25,5	-13,8	-21,6	-13,2	-15,9	-17,2	-14,4		-22,4
D_20171019	-24,6	-22,7	-17,5	-21,5	-19,0	-27,8	-17,8	-23,6	-17,3	-20,6	-22,3	-18,5		-28,6
D_20171031	-4,7	-3,0	-0,9	-4,9	-2,8	-5,0	0,1	-7,4	-0,1	-3,7	-2,4	-2,6		-1,8

Опис атрибутивної інформації точкових векторних шарів, які містять інформацію про місця радіолокаційних вимірів та вертикальні зміщення об'єктів методом PS наведені у таб. 3.3.

Таблиця 3.3

Роз'яснення атрибутивної інформації, що міститься у векторному файлі

FID	Номер точки (відносно виділених точок)
OBJECTID_1	Номер точки (відносно усіх знайдених програмою точок)
Vel_mm_y	Швидкість зміщення (мм/рік)
Coherence	Значення когерентності у даній точці
MuSigma	Значення індексу дисперсії амплітуди у точці
H_Precisio	Похибка висоти поверхні над рівнем моря (м)
Range	-
Azimuth	-
V_Precisio	Похибка швидкості зміщення (мм/рік)
Lon	Широта
Lat	Довгота
X	Широта
Y	Довгота
Z	Висота знайденої точки над рівнем моря
Z_Geoid	Висота геоїда над поверхнею еліпсоїда
LOS_Az	Азимут напрямку руху супутника
LOS_In	Кут місця напрямку руху супутника
H_correcti	Висота від поверхні землі до знайденої точки
Tot_D_mm	Сума зміщення за період спостереження (мм)
D_20160403	Зміщення станом на 03.04.2016 відносно супутником (мм)
D_20160906	Зміщення станом на 05.09.2016 супутником (мм)
.....	
D_20171031	Зміщення станом на 30.10.2017 супутником (мм)

Серед усіх технологій інтерферометричного опрацювання радіолокаційних знімків точний розрахунок вертикальних зміщень досягається за даними інтерферометрії постійних розсіювачів радіолокаційного сигналу методом PS, середня швидкість вертикальних зміщень розраховується з точністю 2 – 4 мм [27].

У рамках методу SBAS реалізована можливість формування просторово «щільних» постійних відбивачів радіолокаційного сигналу. Однак на урбанізованих територіях його можливості різко обмежені. Він є менш

автоматизований і використовуваний для визначення вертикальних зміщень на незабудованих та не вкритих рослинністю територіях.

Опрацювання масиву вимірювань за обома методами дозволило нанести на цифрову карту дані, що відображають середні швидкості осідання протягом року у місцях радіолокаційних вимірювань.

Порівняльний аналіз даних для реперів профільних ліній шахтного поля «Хотінь» та інтерферометричних вимірювань наведено на рисунку 3.22.

Особливу увагу необхідно звернути на визначення осідання земної поверхні над магістральним газопроводом, що проходить у безпосередній близькості від раніше встановленої межі нульових осідань.

З використанням методів PS, SBAS на досліджуваній території зафіксовано три зони: стабільну зону (радіолокаційні вимірювання позначені жовтим кольором; за методом PS визначено 1331 точку), активну зону осідань із швидкістю – 6 мм/рік ÷ 20 мм/рік (радіолокаційні вимірювання позначені оранжевим кольором; за методом PS визначено 206 точок, за методом SBAS – 72), та окремі пункти, з осіданнями до 40 мм/рік (радіолокаційні вимірювання позначені червоним кольором), визначених методом PS, усього 20 радіолокаційних вимірів. Границі активних зон чітко збігаються з мульдою зсуву, зумовленою підземними виробітками, побудованою за результатами інструментальних спостережень.

Отримані результати вимірювань із використанням даних інтерферометрії та високоточного геометричного нівелювання зони, в яких спостерігають осідання збігаються. Отже, Рп 219, Рп 27, Рп 115, Рп 28, Рп 116, Рп 128, Рп 129, Рп 164, Рп 165, Рп 166 розміщені в зоні осідань із швидкостями від -8 мм/рік до -20 мм/рік, що підтверджується результатами геометричного нівелювання (обчислена швидкість осідання становить на них від -8,9 мм/рік до -13,8 мм/рік). Водночас на пунктах Рп 73, Рп 11, Рп 159, Рп 160, розташованих у стабільній зоні (рис. 3.20), обчислена за результатами геометричного нівелювання швидкість осідання становить від -8,9 мм/рік до -11,8 мм/рік.

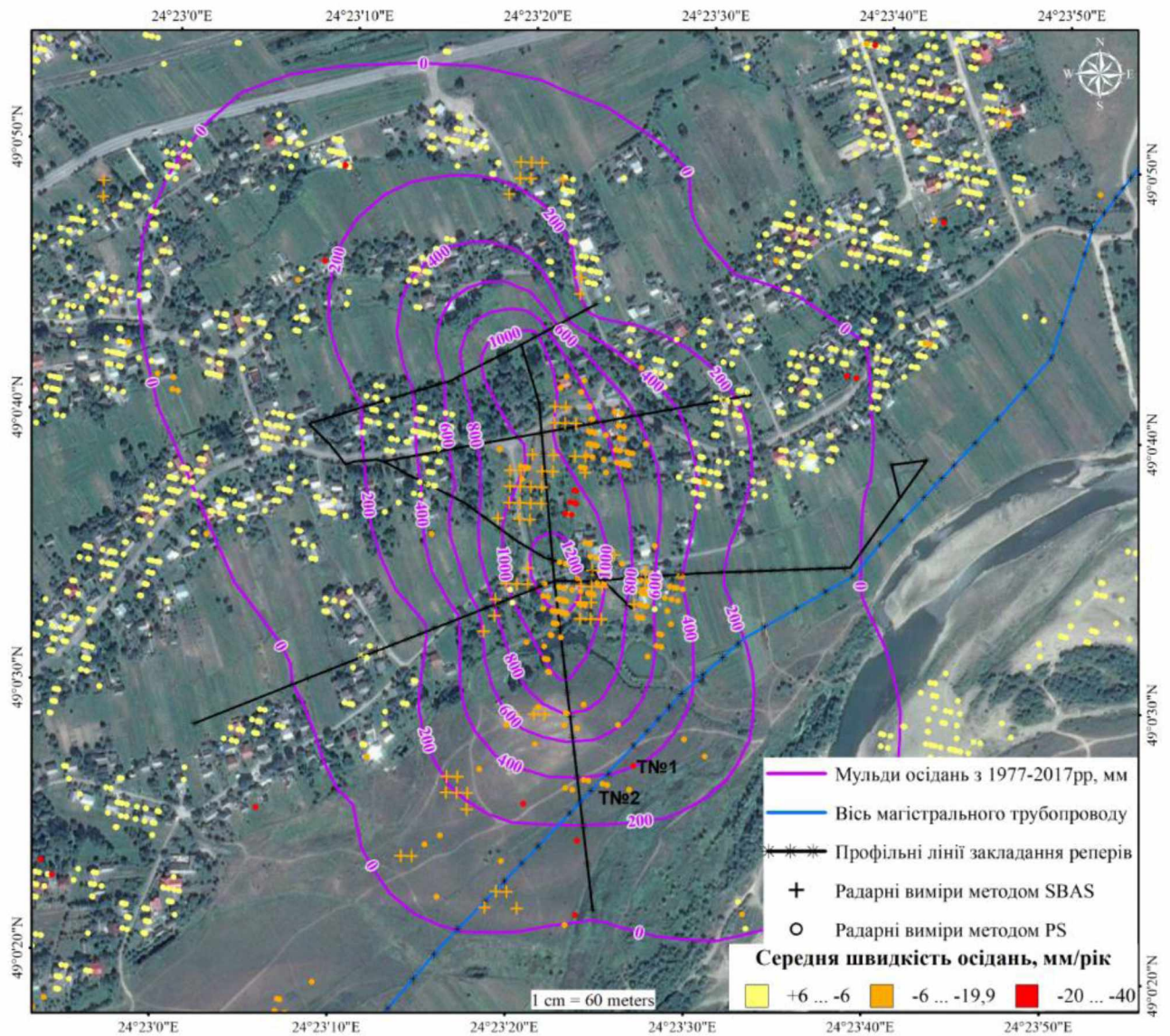


Рис. 3.22. Суміщена схема отриманих результатів моніторингу динаміки процесів осідання ділянки дослідження

Проте швидкості цих осідань дещо відрізняються. Для прямого порівняння вимірювань обома методами потрібно використати кутові відбивачі або активні транспондери у місцях розташування реперів.

Вимірювання є корельованими і свідчать про додаткові можливості у вирішенні завдань щодо оцінювання вертикальних зміщень земної поверхні та об'єктів методом PS.

Геодинамічний моніторинг зони досліджень дозволив визначити ділянки з концентрованими деформаціями земної поверхні та оцінити стан об'єктів у них. Визначено, що будинки, розташовані всередині мульди осідань, розташовані на ділянці з середніми швидкостями від -12 до -24 мм/рік. За

допомогою радіолокаційних даних отримано скупчення постійних відбивачів сигналів знайденого шляхом автоматизованого опрацювання космічних знімків, що охоплюють межі мульд осідань та трасу газопроводу.

На рисунках 3.23, 3.24 представлено динаміку вертикальних зміщень в окремих точках Т№1 і Т№2, максимальна середня швидкість осідань яких складає відповідно -27 мм/рік і -10 мм/рік.

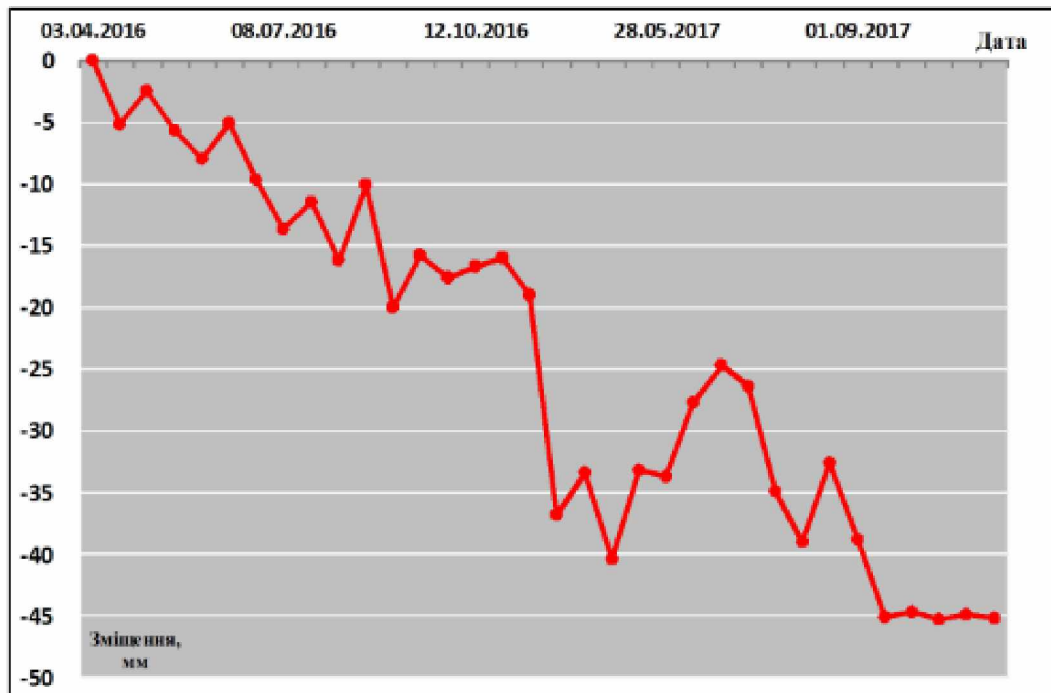


Рис. 3.23. Динаміка вертикального зміщення у точці № 1

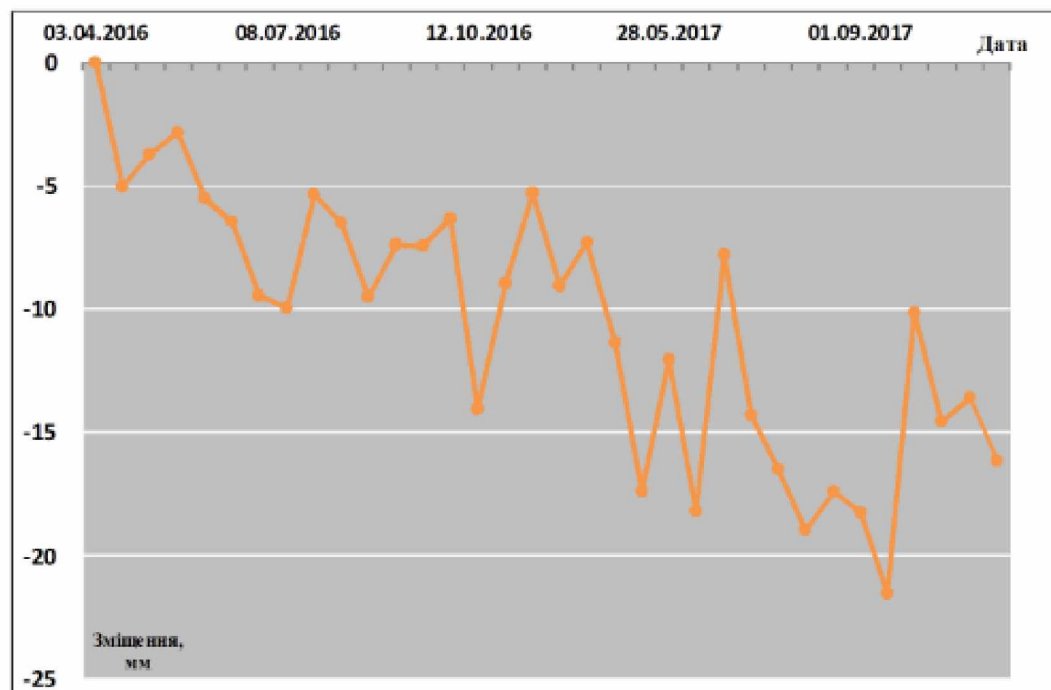


Рис. 3.24. Динаміка вертикального зміщення у точці № 2

Отримані дані свідчать про процеси повільних рухів території, на якій розташований газопровід, і наявні деформації земної поверхні з інтенсивністю просідань від -6 до -20 мм/рік. Окремі поодинокі радіолокаційні вимірювання, які визначають осідання і перебувають за межами мульд осідань та поблизу радіолокаційних вимірювань, не є стабільними. Вони ще потребують окремих досліджень і, як правило, або свідчать про просідання окремого об'єкта, що не пов'язано з загальною геодинамічною ситуацією, наприклад, осідання окремого будинку через слабкий фундамент або підмивання його водою тощо.

На основі отриманих результатів геодезичних та супутникових спостережень території зацікавлення можна стверджувати, що осідання земної поверхні, спричинене техногенним впливом виробок рудника «Хотінь», яке спостерігалось з 1977 року, існує й існуватиме надалі, хоча з меншими швидкостями. Тому є необхідність організування на постійній основі комплексної моніторингової системи спостережень для попередження техногенної катастрофи.

Використання технології радіолокаційної інтерферометрії для моніторингу території дозволяє визначити небезпечні ділянки, в яких спостерігаються нетипові деформації земної поверхні. Це дозволяє окреслити зони для подальших детальних спостережень. Використання супутникового методу моніторингу надає можливість оперативно та з високою валідністю визначати відхилення параметрів об'єктів, водночас мінімізувати затрати часу і коштів, а також забезпечує можливість швидкого збирання картографічної інформації.

3.4. Застосування методу PS для оцінки вертикальних деформацій будівлі

Проведено визначення вертикальних зміщень будівель території Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ) (рис.3.25) за даними супутникового радіолокаційного знімання.

Для проведення досліджень використано метод інтерферометричного опрацювання Persistent Scatterers Interferometry (інтерферометрія постійних відбивачів радіолокаційного сигналу). Вхідними даними для опрацювання обрано 72 радіолокаційні знімки з космічного апарату Sentinel-1 на територію міста Івано-Франківськ за період з 01.04.2019 р. до 22.10.2020 р..



Рис. 3.25. Зона досліджень – територія ІФНТУНГ

Для методу PS цикл інтерферометричного опрацювання у ENVI SARscape проводиться для кожної пари знімків інтерферометричної серії. Пари знімків вибираються програмою автоматично з поданої серії знімків на основі заданих параметрів перед початком розрахунків (рис. 3.26).

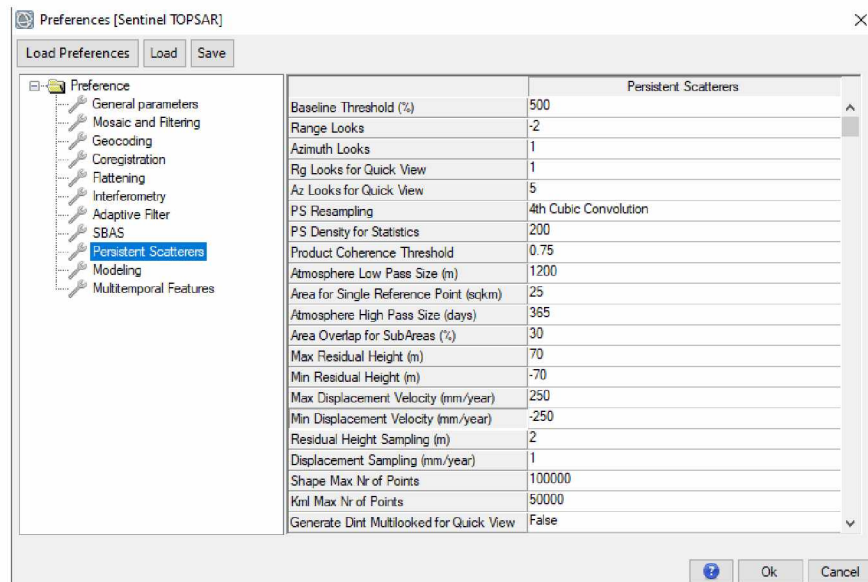


Рис. 3.26. Налаштування параметрів програмного забезпечення ENVI SARscape для методу PS

Задані параметри визначають які пари знімків відповідають критеріям залежно від обмежень з підбору інтерферометричних пар для подальшого проведення автоматичного опрацювання. Для методу PS кількість інтерферометричних пар склала 71.

На рисунку 3.27 б показано графік, який відображає позицію від основного знімка (знімок, до якого будуть корегістровані всі інші знімки у одну і ту ж геометрію знімання радіолокатора) (вісь ординат) та дати отримання вхідних даних (вісь абсцис).

На рисунку 3.27 а графік відображає значення базової лінії (вісь ординат) від основного знімка та дати отримання вхідних даних (вісь абсцис).

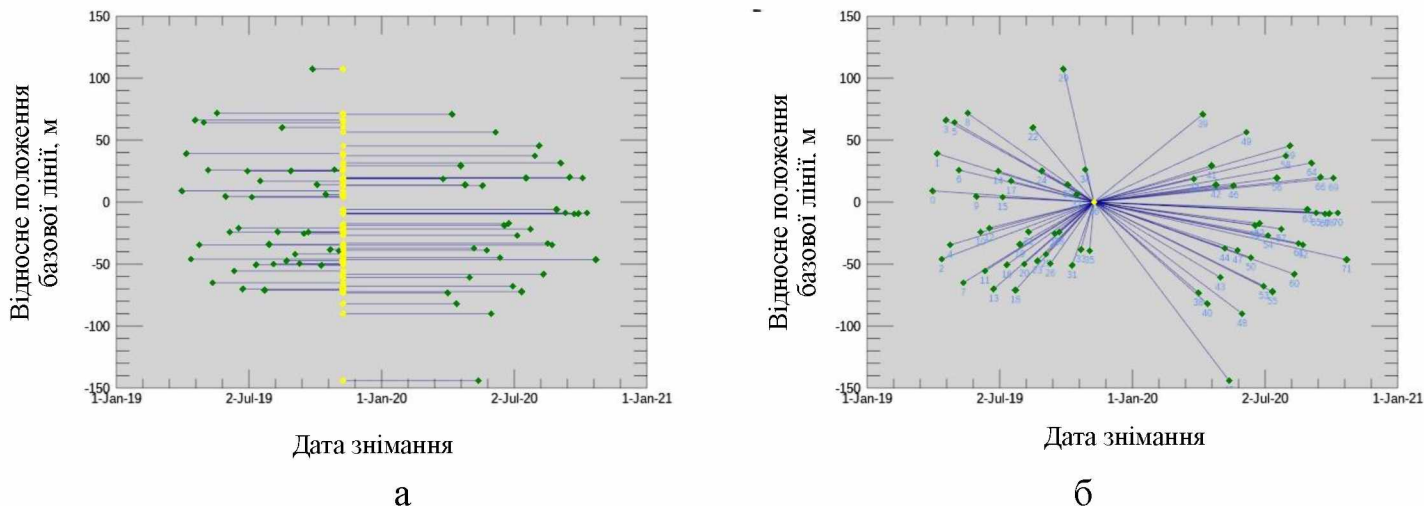


Рис. 3.27. Часово-базисний графік за методом постійних відбивачів (PS)

Диференціальні інтерферограми за окремо вибрані дати подані нижче на рис. 3.28-3.34.

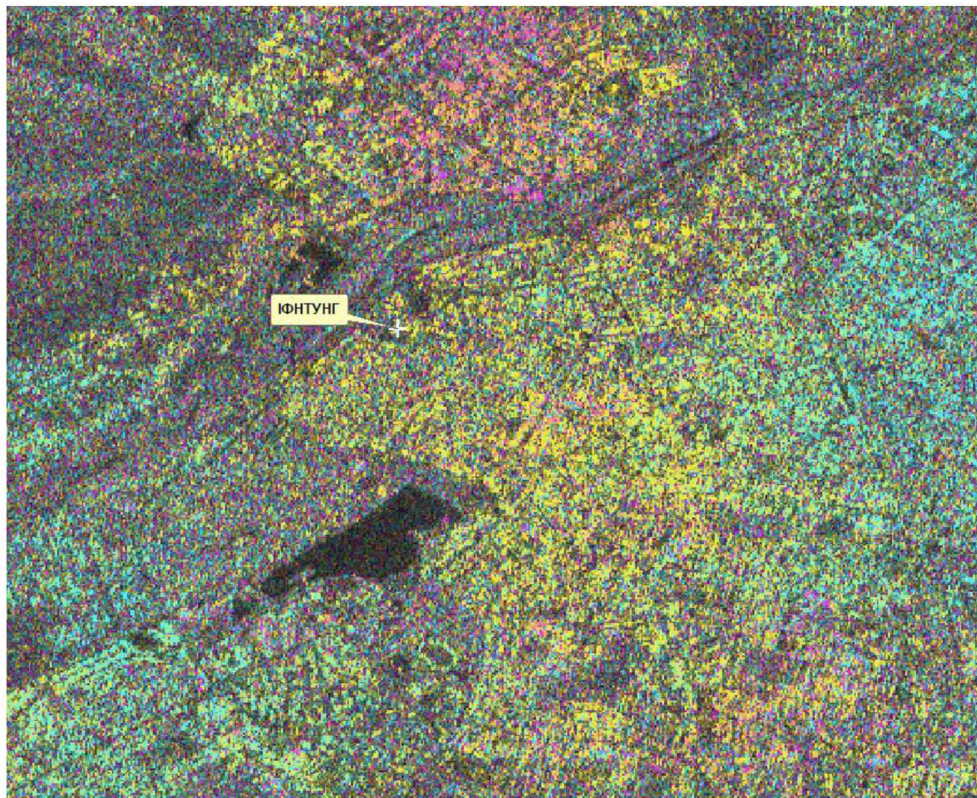


Рис. 3.28. Диференціальна інтерферограма за період 01.04.2019 – 09.11.2019

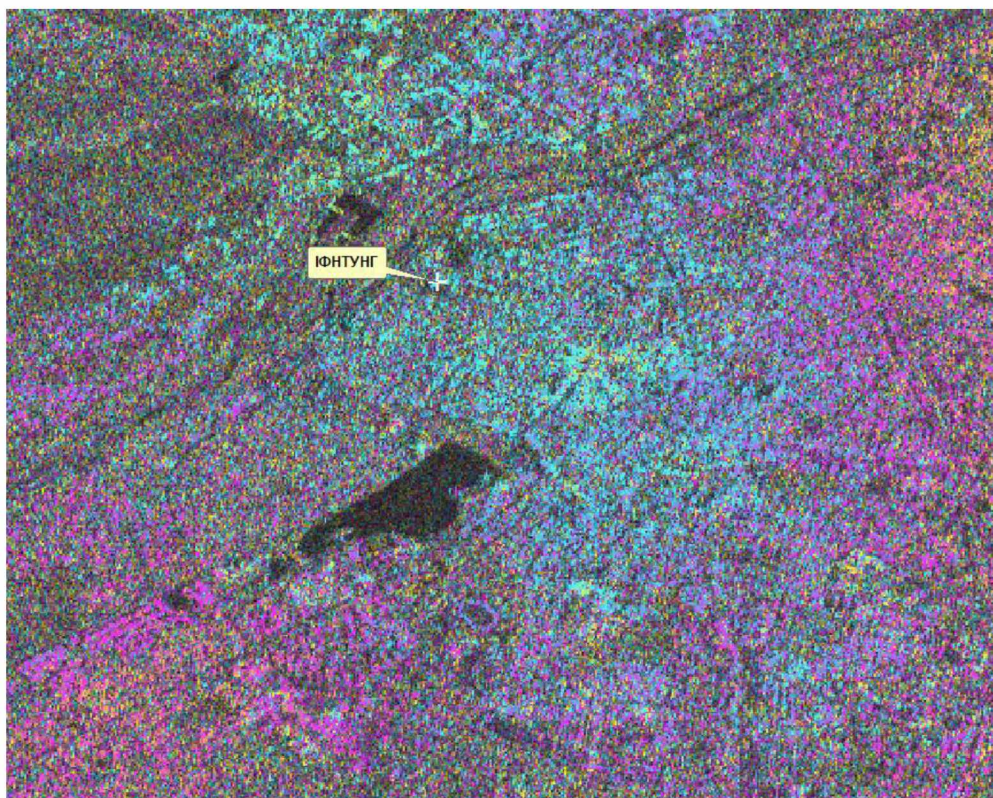


Рис. 3.29. Диференціальна інтерферограма за період 06.07.2019 – 09.11.2019

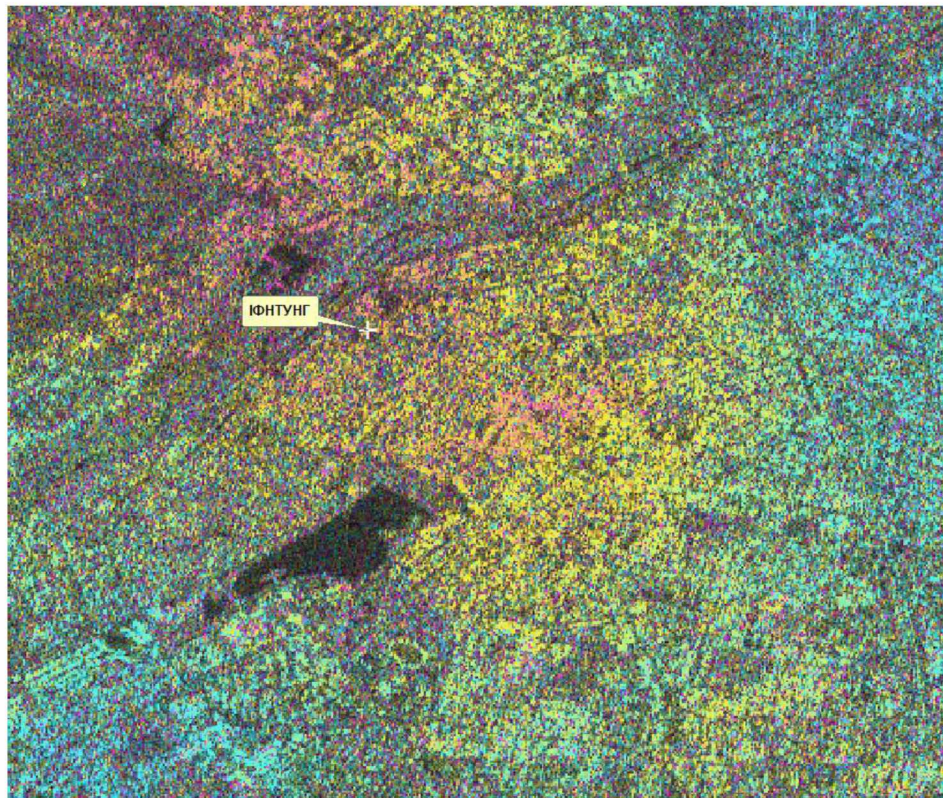


Рис. 3.30. Диференціальна інтерферограма за період 04.10.2019 – 09.11.2019

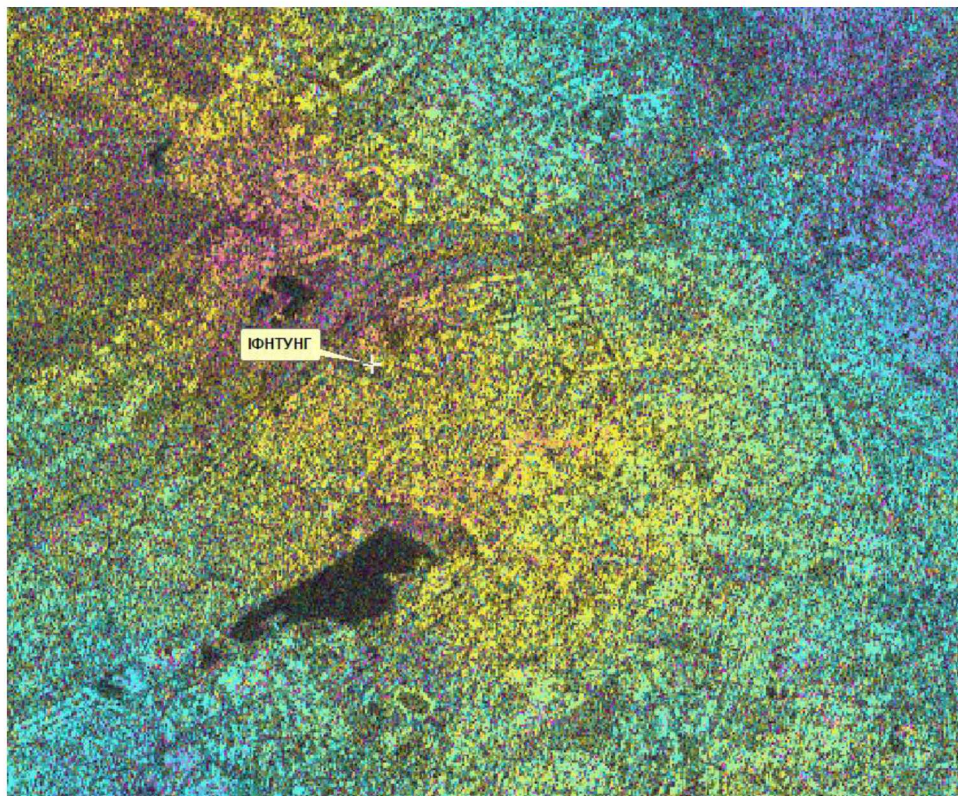


Рис. 3.31. Диференціальна інтерферограма за період 03.11.2019 – 09.11.2019

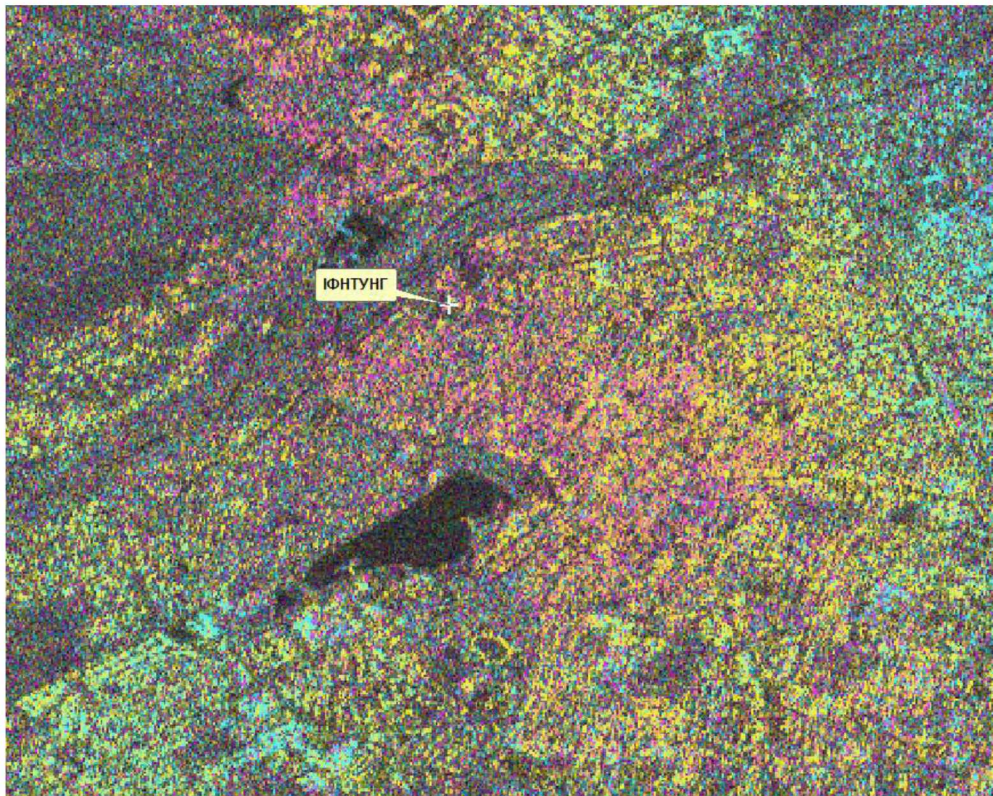


Рис. 3.32. Диференціальна інтерферограма за період 01.04.2020 – 09.11.2019

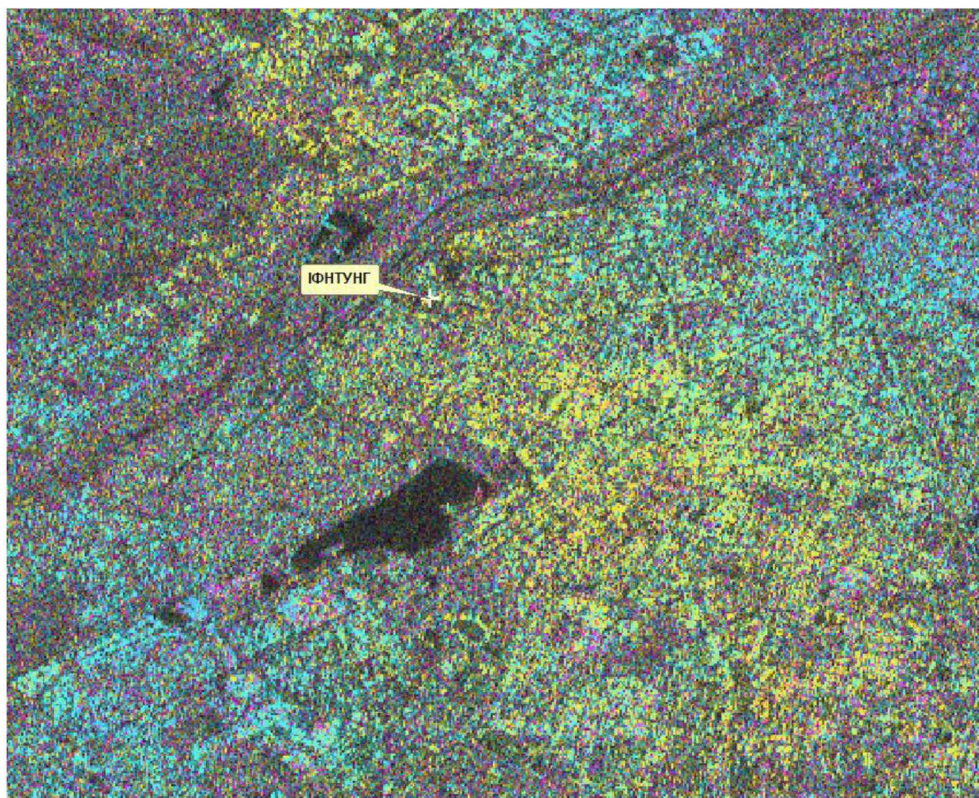


Рис. 3.33. Диференціальна інтерферограма за період 06.07.2020 – 09.11.2019

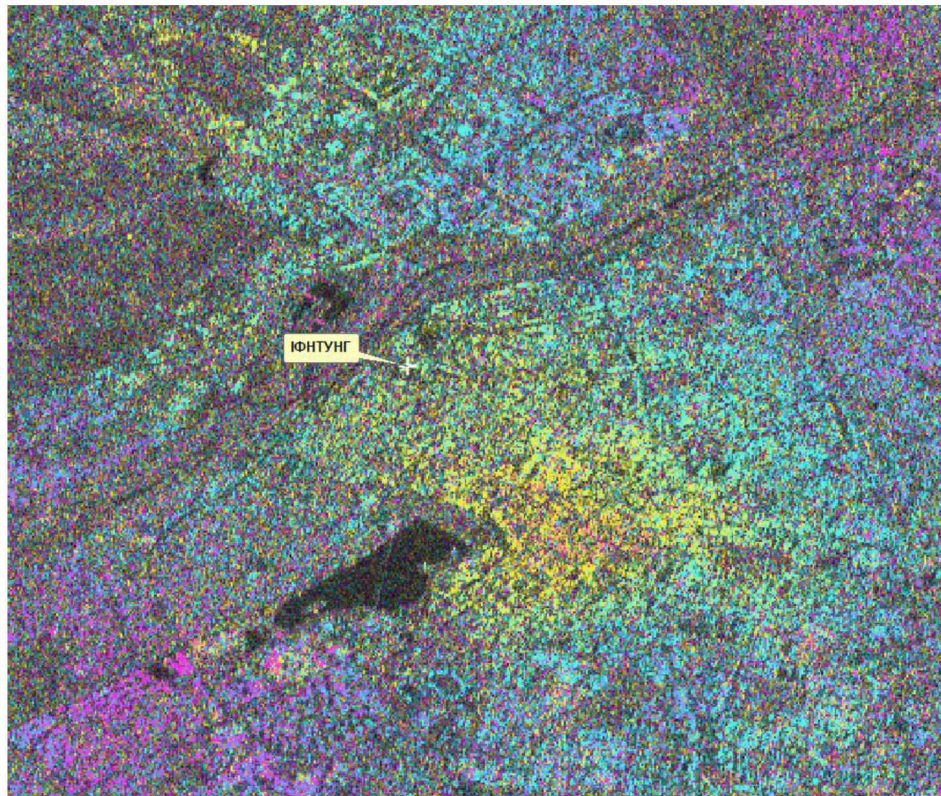


Рис. 3.34. Диференціальна інтерферограма за період 04.10.2020 – 09.11.2019

Потім оцінюється величина когерентності (міра якості і достовірності результатів інтерферометричного опрацювання), значення якої знаходиться в діапазоні від 0 до 1 (чим ближче до 1, тим значення достовірніші).

Для відділення значущих значень фази від незначних використано такий допоміжний параметр як когерентність фаз (кореляція фаз). Вона вимірюється в безрозмірних величинах від 0 до 1 і розраховується за допомогою фільтрованої диференціальної інтерферограми. На рисунку 3.35 добре видно, що об'єкти інфраструктури характеризуються низькими значеннями когерентності, тоді як решта площі знімка, включаючи область з рослинним покривом та водними об'єктами характеризується досить високими значеннями когерентності.

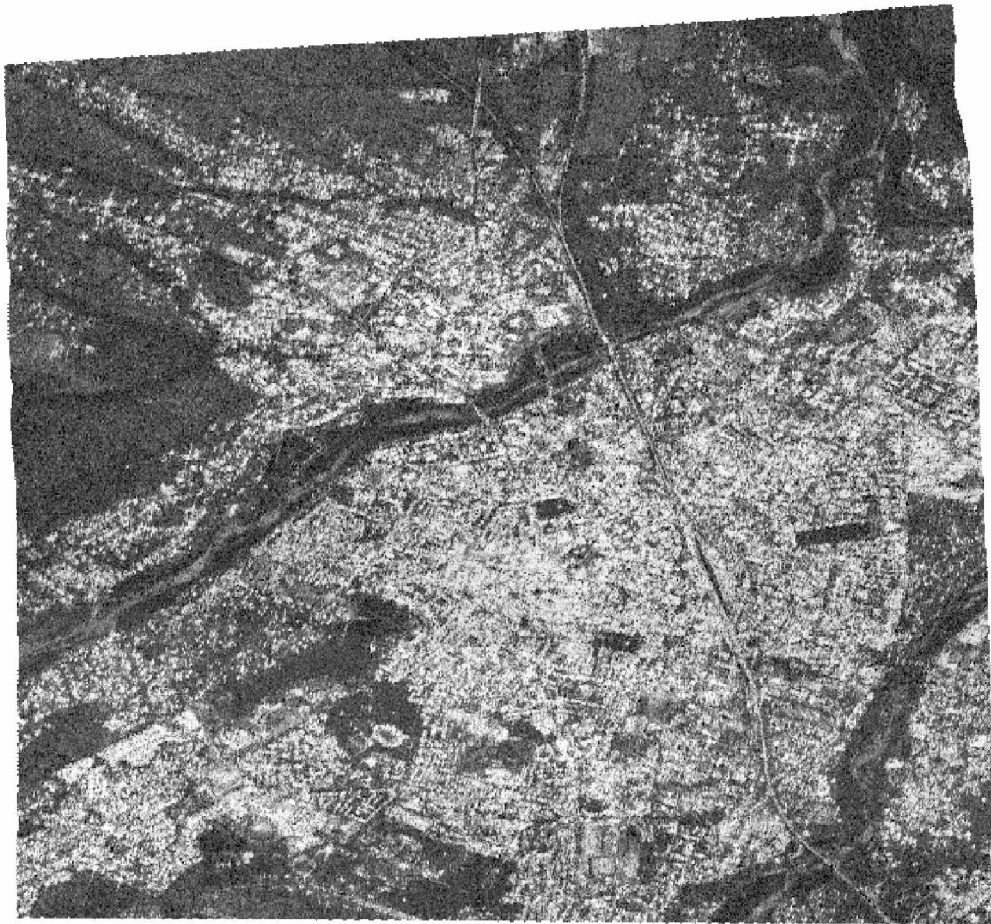


Рис. 3.35. Розрахований файл когерентності

Далі виконано так звану інверсію, що відновлює послідовну в часі динаміку зсувів із перехресних у часі пар знімків. Після чого результати були геокодовані і переведені у векторний формат (див. п. 3.5).

3.5. Аналіз оцінювання надійності будівель за даними радіолокаційної інтерферометрії

Для оцінювання точності визначення деформацій будівлі обрано корпус № 5 Івано-Франківського національного університету нафти і газу (ІФНТУНГ), якому понад 50 років. З практики відомо, що найбільші осідання споруд відбуваються в період перших п'яти років від здачі в експлуатацію. З огляду на те, що корпус № 5 ІФНТУНГ зведено на стійких та надійних ґрунтах, а саме на гравійній подушці, можна стверджувати, що обрана для досліджень будівля є стійкою та надійною [13].

Зміщення розраховували з використанням інтерферометричного опрацювання масиву даних із 30 радіолокаційних знімків з КА Sentinel-1 у період з 15.05.2015 до 14.10.2016 року. Вертикальні зміни в часі висоти постійного відбивача розраховані на кожен дату знімання відносно першого знімка (14.05.2015).

Інтерферометричне опрацювання реалізовували програмним комплексом SARscape (Exelis VIS, США), яке здійснювали методом постійних відбивачів (PS) [66, 119, 120].

Похибка розрахованих даних радіолокаційної інтерферометрії для супутника Sentinel-1 (просторове розрізнення якого 5x20м) складає до 6 мм. Для її зменшення потрібно використовувати дані з комерційних супутників, таких як COSMO-SkyMed, TerraSAR-X.

Результатом опрацювання даних є векторний файл, що містив точки, які характеризують динаміку деформацій споруди (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Результат опрацювання даних методом постійних відбивачів (PS) – векторний файл (vector shape), що містить інформацію про динаміку деформацій споруди

OBJECTID	94648	95111	95114	95115	95605	95606	95607	95608	96096	96098	96101	96564	96565	96569
Vel_mm_y_	-1,8	-3,2	-1,8	-1,5	-1,0	-0,8	-1,1	-1,5	-0,9	1,0	-1,8	-1,5	-0,9	-1,3
Coherence	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9
MuSigma	3,1	2,7	3,2	4,3	3,9	3,0	4,9	4,1	3,1	2,4	2,4	2,9	2,7	2,8
H_Precisio	5,2	5,8	2,7	5,6	2,5	4,6	2,5	5,8	3,9	5,2	5,1	4,4	7,7	4,5
Range	4259,0	4250,0	4264,0	4266,0	4260,0	4262,0	4264,0	4266,0	4255,0	4259,0	4268,0	4255,0	4256,0	4268,0
Azimuth	575,0	576,0	576,0	576,0	577,0	577,0	577,0	577,0	578,0	578,0	578,0	579,0	579,0	579,0
V_Precisio	1,1	1,2	0,6	1,2	0,5	1,0	0,5	1,2	0,8	1,1	1,1	0,9	1,6	1,0
Lon	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7
Lat	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9
X	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7
Y	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9
Z	256,5	259,2	247,3	243,0	248,7	245,0	246,6	242,7	266,2	254,8	246,7	268,2	264,5	242,6
Z_Geoid	288,8	291,5	279,5	275,3	281,0	277,3	278,9	274,9	298,5	287,1	279,0	300,4	296,8	274,9
LOS_Az	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0	-83,0
LOS_In	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7
H_correcti	6,0	8,3	-3,4	-7,6	-2,1	-5,8	-4,3	-8,2	15,6	4,3	-4,1	18,1	14,5	-7,9
Tot_D_mm_	-51,5	79,3	-8,6	28,9	5,6	-62,9	-46,5	-95,0	-49,1	129,3	-67,4	-117,9	-110,8	-97,9
D_20150515	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D_20150527	1,4	7,5	4,5	4,8	5,0	0,6	2,7	2,1	1,1	3,9	0,3	-4,1	-6,7	1,3
D_20150608	2,8	5,2	1,0	1,0	2,4	-2,7	-0,9	-5,3	-0,8	-5,5	1,3	-3,1	-2,4	-0,6
D_20150620	0,9	6,7	2,6	4,4	2,6	0,1	0,9	-0,5	1,2	4,8	-1,8	1,5	0,0	-1,2
D_20150702	0,2	5,2	2,8	3,3	0,1	-2,1	0,5	-1,8	-0,8	5,3	1,2	-2,5	-2,0	0,3
D_20150714	-1,8	2,6	0,2	-0,2	-1,0	-3,0	-2,4	-4,4	-2,4	3,9	-2,0	-3,8	-5,3	-2,7

Продовження табл. 3.4

	94648	95111	95114	95115	95605	95606	95607	95608	96096	96098	96101	96564	96565	96569
D_20150726	1,4	5,3	0,2	3,5	2,7	1,1	-0,9	-1,3	1,6	11,1	0,2	-2,4	-2,7	-6,1
D_20150807	3,1	9,9	3,5	5,4	3,6	1,2	1,8	-0,1	-1,5	-13,3	2,2	-0,2	0,9	2,7
D_20150819	4,8	3,8	1,5	1,6	0,9	-3,1	-0,8	-3,0	-0,4	9,8	-1,0	-1,1	2,7	-0,8
D_20150831	4,8	6,3	3,7	4,3	1,5	1,3	0,8	-0,3	1,3	6,3	3,5	2,3	4,0	-1,9
D_20150912	-3,7	7,1	1,3	3,9	3,0	1,8	-0,4	0,0	0,3	5,7	-1,3	-2,3	-2,6	-0,2
D_20150924	3,7	9,6	2,3	3,6	1,3	0,3	0,3	-0,2	-0,3	4,8	-0,3	-3,0	-2,3	-0,8
D_20151006	-3,9	3,1	0,8	2,5	2,2	-1,5	-0,3	-1,7	-1,0	7,0	3,2	-5,7	-6,2	0,3
D_20151111	-5,1	5,8	1,4	3,0	1,7	-1,7	0,6	0,0	1,5	8,4	-2,4	-3,4	-2,1	-2,4
D_20160403	-6,6	2,7	-1,3	-2,4	-0,3	-5,5	-2,8	-6,3	0,5	7,2	-1,5	-1,6	-2,4	-7,8
D_20160415	-2,2	1,3	0,2	1,1	-0,2	-3,9	-1,5	-4,4	-0,4	3,7	-2,4	-5,0	-5,4	-1,9
D_20160427	0,3	-0,7	-2,2	-0,3	-1,3	-3,0	-3,3	-4,7	-0,6	2,8	-3,7	0,9	-3,7	-5,7
D_20160509	-5,6	-0,9	-0,1	1,1	0,6	-6,1	-1,7	-3,6	-6,5	6,9	-12,7	-9,6	-7,8	-12,6
D_20160521	-4,2	-1,1	-0,6	0,3	-0,4	-3,4	-2,1	-4,4	-5,7	6,2	-6,2	-7,6	-5,4	-6,5
D_20160602	-5,2	1,0	-2,0	1,3	0,6	-1,7	-2,6	-3,7	-1,4	8,2	2,7	-4,6	-3,7	-3,5
D_20160614	-7,1	6,9	-1,4	-0,3	-0,5	-4,4	-3,5	-5,5	-3,1	6,9	-1,7	-7,8	-6,0	-7,5
D_20160708	-2,1	-0,3	-3,3	-2,0	-1,6	-3,2	-3,5	-5,8	-3,6	6,0	-1,8	-4,3	-4,1	-5,2
D_20160801	-0,8	0,6	-1,7	-0,4	-0,6	-1,6	-2,2	-4,3	1,4	5,5	-2,0	-5,4	-5,3	-2,1
D_20160813	-3,3	-2,6	-3,5	-1,4	-3,0	-4,1	-3,8	-4,9	-1,5	4,0	-2,0	-5,4	-5,0	-4,2
D_20160825	-5,9	-2,2	-4,9	-2,5	-4,0	-4,0	-4,8	-7,0	-4,5	3,7	-4,9	-7,6	-6,5	-6,7
D_20160906	-2,0	1,2	-2,1	0,1	-1,0	3,4	-2,2	-4,0	-3,3	5,3	-4,3	-4,4	-3,9	-3,1
D_20160918	-4,0	2,7	-3,2	-2,0	-1,9	-3,0	-3,9	-5,6	-4,9	2,3	-10,3	-7,7	-4,1	-5,3
D_20160930	-3,9	0,6	-4,6	-3,0	-3,3	-6,2	-4,2	-5,4	-3,7	3,1	-5,5	-6,1	-5,2	-4,3
D_20161012	-3,4	-5,4	-3,4	-1,4	-1,8	-2,8	-4,3	-5,4	-5,5	3,8	-8,5	-6,1	-8,6	-5,0
D_20161024	-4,1	-2,6	-0,2	-0,4	-1,9	-6,0	-2,1	-3,3	-5,9	1,3	-5,8	-7,9	-8,9	-4,6
vell	-1,4	-3,2	-2,7	-5,4	-2,0	-3,8	-3,4	-6,3	-1,0	-1,1	0,9	1,8	-0,2	-5,4

Пояснення до відображеної атрибутивної інформації у векторному файлі наведено у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Роз'яснення атрибутивної інформації, що міститься у векторному файлі

FID	Номер точки (відносно виділених точок)
OBJECTID_1	Номер точки (відносно усіх знайдених програмою точок)
Vel_mm_y	Швидкість зміщення (мм/рік)
Coherence	Значення когерентності у даній точці
MuSigma	Значення індексу дисперсії амплітуди у точці
H_Precisio	Похибка висоти поверхні над рівнем моря (м)
Range	-
Azimuth	-
V_Precisio	Похибка швидкості зміщення (мм/рік)
Lon	Широта
Lat	Довгота
X	Широта
Y	Довгота
Z	Висота знайденої точки над рівнем моря
Z_Geoid	Висота геоїда над поверхнею еліпсоїда
LOS_Az	Азимут напрямку руху супутника
LOS_In	Кут місця напрямку руху супутника
H_correcti	Висота від поверхні землі до знайденої точки
Tot_D_mm	Сума зміщення за період спостереження (мм)
D_20150515	Зміщення першої дати знімання супутником (мм) (є точка відліку – завжди 0)
D_20150527	Зміщення станом на 26.05.2015 відносно першої дати знімання (14.05.2015) супутником (мм)
.....	
D_20161024	Зміщення станом на 23.10.2016 відносно першої дати знімання (14.05.2015) супутником (мм)

На рис. 3.36 представлено розміщення постійних стабільних відбивачів радіолокаційного сигналу на корпусі ІФНТУНГ. У цих точках алгоритм знаходив постійні стабільні відбивачі радіолокаційного сигналу, які є основними елементами у методі опрацювання радіолокаційних даних.

Розраховані вертикальні зміщення одного із корпусів ІФНТУНГ у проміжок часу з 15.05.2015 до 14.10.2016 року за даними радіолокаційної інтерферометрії подано у табл. 3.6.



Рис. 3.36. Розміщення постійних стабільних відбивачів радіолокаційного сигналу на будівлі (м. Івано-Франківськ, корпус № 5 ІФНТУНГ)

Таблиця 3.6

Середня швидкість вертикальних зміщень будівлі (м. Івано-Франківськ, корпус № 5 ІФНТУНГ) за період з 15.05.2015 до 14.10.2016 року

Точка спостереження	Вертикальне зміщення, мм
94648	-1.5
94649	1.9
95111	-3.2
95114	-2.7
95115	-5.4
95605	-1.9
95606	-3.8
95607	-3.4
95608	-6.3
96096	-0.9
96098	-1.1
96099	1.9
96101	0.9
96564	1.8
96565	-0.2
96569	-5.4

З аналізу результатів опрацювання даних радіолокаційної інтерферометрії, середньорічна швидкість вертикальних зміщень ближчих до антени перманентної станції FRKV точок (95111, 95114, 95115) становить -3,2 мм, -1,8 мм, -1,5 мм, що не перевищують допустимої точності визначення осідань та деформацій споруд різних типів геодезичними та космічними методами спостережень.

Для встановлення точності способу отримання вертикальних рухів, проведено порівняльний аналіз результатів досліджень отриманих даними з радіолокаційної інтерферометрії та перманентної станції FRKV (табл. 3.7), яка входить до мережі перманентних станцій System Solution. Виміри перманентної станції FRKV отримано у період з 10.11.2015 до 22.03.2016 р..

Таблиця 3.7

Дані перманентної станції FRKV

Дата	Система координат	Назва станції	Клас станції	B, °	L, °	H, м	Планово-висотна точність, м	Планова точність, м	Висотна точність, м
03.11.2015	WGS-84	FRKV	Adjusted	48°55' 47,03004" N	24°41' 40,33301" E	305,7504	0,0129	0,0069	0,0109
10.11.2015				48°55' 47,03009" N	24°41' 40,33292" E	305,7699	0,0089	0,0048	0,0075
17.11.2015				48°55' 47,03006" N	24°41' 40,33310" E	305,7672	0,0073	0,0039	0,0062
24.11.2015				48°55' 47,03005" N	24°41' 40,33312" E	305,7534	0,0132	0,0070	0,0111
01.12.2015				48°55' 47,03013" N	24°41' 40,33293" E	305,7494	0,0085	0,0045	0,0072
8.12.2015				48°55' 47,03007" N	24°41' 40,33307" E	305,767	0,0095	0,0050	0,0081
15.12.2015				48°55' 47,03006" N	24°41' 40,33307" E	305,7601	0,0123	0,0066	0,0104
22.12.2015				48°55' 47,02998" N	24°41' 40,33306" E	305,7599	0,0055	0,0029	0,0047
29.12.2015				48°55' 47,03001" N	24°41' 40,33307" E	305,7584	0,0108	0,0058	0,0092
05.01.2016				48°55' 47,02998" N	24°41' 40,33310" E	305,7601	0,0080	0,0043	0,0068
12.01.2016				48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33299" E	305,7585	0,0075	0,0040	0,0064
19.01.2016				48°55' 47,02993" N	24°41' 40,33303" E	305,756	0,0097	0,0052	0,0082
26.01.2016				48°55' 47,03002" N	24°41' 40,33301" E	305,76	0,0100	0,0053	0,0084
02.02.2016				48°55' 47,02996" N	24°41' 40,33295" E	305,7604	0,0102	0,0054	0,0086
09.02.2016				48°55' 47,03002" N	24°41' 40,33315" E	305,7536	0,0120	0,0064	0,0101
16.02.2016				48°55' 47,03002" N	24°41' 40,33307" E	305,762	0,0096	0,0051	0,0081
23.02.2016				48°55' 47,03000" N	24°41' 40,33304" E	305,7662	0,0074	0,0040	0,0063
01.03.2016				48°55' 47,03017" N	24°41' 40,33321" E	305,7663	0,0097	0,0052	0,0081
08.03.2016				48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33306" E	305,7653	0,0098	0,0052	0,0083
15.03.2016				48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33310" E	305,7594	0,0120	0,0064	0,0101
22.03.2016				48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33302" E	305,7602	0,0078	0,0042	0,0066

Проаналізувавши отримані дані, встановили кореляційні зв'язки між температурним розширенням штанги та зміною висоти станції FRKV. Коефіцієнт кореляції Спірмена [40, 54, 91], який характеризує непараметричні, криволінійні залежності, становить $-0,517$, що свідчить про середню залежність між змінами висоти станції і змінами температури (рис. 3.37).

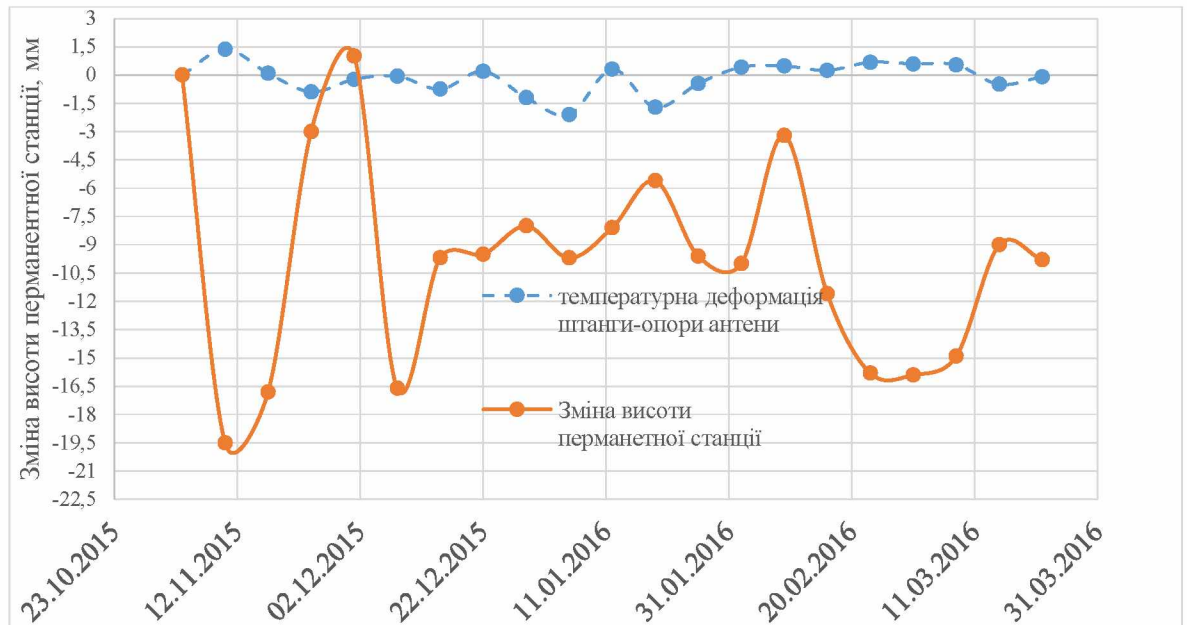


Рис. 3.37. Графік зміни висоти перманентної станції FRKV та температурного розширення штанги-опори антени перманентної станції

Зміна висоти перманентної станції за даними системи GNSS складає $-9,7$ мм (без урахування похибки) між 10 листопада 2015 (305,7699 м, висотна точність 7,5 мм) та 22 березня 2016 року (305,7602 м, висотна точність 6,6 мм).

За даними радіолокаційної інтерферометрії осідання ближчих до антени точок (95111, 95114, 95115) становило відповідно $-3,2$ мм, $-1,8$ мм та $-1,5$ мм. Тобто результати цих двох методів не перевищують 15 мм, що свідчить про можливість застосовувати технологію радіолокаційної інтерферометрії для моніторингу деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів, проте для техногенно-складних та унікальних об'єктів промисловості і господарської діяльності залишається необхідним паралельно виконувати моніторинг деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів традиційними геодезичними методами.

У зв'язку з тим, що частина опрацьованих радіолокаційних даних було втрачено, ми вирішили повторити дослідження. Для проведення повторних досліджень використано метод інтерферометричного опрацювання метод PS. Вхідними даними послужили 72 радіолокаційні знімки з космічного апарату Sentinel-1 на територію ІФНТУНГ за період з 01.04.2019 р. до 22.10.2020.

Результатом опрацювання даних є векторний файл, що містить точки, які характеризують динаміку деформацій споруди (табл.3.8).

Таблиця 3.8

Результат опрацювання даних методом постійних відбивачів (PS) – векторний файл (vector shape), що містить інформацію про динаміку деформацій споруди

OBJECTID_1	67	72	99	100	101	102	105	135	137	138	139	168	170	172	200	201	***	222	225
OBJECTID	96204	96209	96664	96665	96666	96667	96674	97143	97145	97146	97147	97624	97626	97628	98110	98111	***	98560	98563
Velocity	0,2	0,1	-0,8	0,7	0,6	0,3	4,2	-0,1	0,5	0,7	2,8	0,6	-0,6	0,5	1,9	1,3	***	4,6	-0,2
Coherence	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	1,0	0,9	0,9	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	***	0,8	0,8
MuSigma	2,3	4,5	2,4	3,3	2,6	2,4	2,6	5,8	4,0	3,8	1,7	2,6	3,5	2,7	3,7	3,9	***	2,4	2,5
H_Prec	5,0	3,3	4,6	3,2	3,9	5,1	5,2	2,1	2,5	2,5	6,0	4,6	2,6	3,9	3,2	3,1	***	4,9	4,5
V_Prec	0,7	0,5	0,7	0,5	0,6	0,7	0,7	0,3	0,4	0,3	0,9	0,6	0,4	0,6	0,5	0,4	***	0,7	0,6
Range	2824,0	2834,0	2821,0	2823,0	2824,0	2826,0	2840,0	2827,0	2831,0	2832,0	2834,0	2821,0	2825,0	2829,0	2829,0	2830,0	***	2827,0	2836,0
Azimuth	405	405	406	406	406	406	406	407	407	407	407	408	408	408	409	409	***	410	410
SubArea_ID	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	***	2-3	2-3
Lon	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	***	24,7	24,7
Lat	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	***	48,9	48,9
X	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	***	24,7	24,7
Y	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	***	48,9	48,9
Z	250,4	225,1	258,8	258,4	248,5	245,5	219,1	244,3	243,0	244,4	233,2	261,0	247,7	252,4	251,1	249,4	***	253,8	249,8
Z_Geoid	218,1	192,8	226,5	226,1	216,2	213,2	186,8	212,0	210,8	212,1	201,0	228,7	215,4	220,1	218,8	217,1	***	221,6	217,5
LOS_Az	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	-78,9	***	-78,9	-78,9
LOS_In	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	***	42,7	42,7
H_correcti	0,3	-24,8	8,2	7,9	-2,0	-4,9	-31,2	-6,5	-7,7	-6,3	-17,5	10,2	-3,2	1,5	0,4	-1,3	***	3,6	-0,6
Tot_D_mm_	-104,1	-286,8	-192,8	-77,6	-34,6	-78,4	-256,7	-196,2	-326,6	-272,2	-60,8	-120,8	-244,5	-353,9	-164,7	-151,2	***	99,1	-300,8
D_20190401	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	***	0,0	0,0
D_20190407	4,2	-1,3	0,6	3,6	3,0	1,7	1,5	1,4	0,0	-0,7	-4,9	7,4	1,9	2,5	2,9	4,6	***	1,8	1,9
D_20190413	1,1	-0,5	6,9	4,3	4,4	2,9	0,8	-0,3	0,0	-0,4	-3,1	-2,7	-1,1	-2,9	-3,3	-1,5	***	-5,6	-0,1
D_20190419	-5,0	2,3	5,2	3,6	-2,2	0,4	-1,8	-0,3	-0,8	-0,4	4,9	-1,6	-0,4	-1,9	0,3	1,4	***	0,1	0,0

Продовження табл.3.8

D_20190425	0,3	0,7	1,7	2,4	1,5	1,8	2,2	2,0	-1,0	-0,9	-3,4	-1,1	1,1	-6,0	-2,1	-1,2	***	-0,4	-4,0
D_20190501	8,6	-1,5	-7,0	2,8	5,0	7,1	-6,0	0,9	-1,1	-1,1	0,0	-2,5	2,0	-1,0	-4,1	-0,7	***	-4,5	-4,3
D_20190507	3,6	-0,8	6,5	1,3	1,3	6,1	-6,6	2,2	0,0	-0,2	0,2	-14,1	0,9	4,3	-1,1	-0,2	***	-4,4	-6,4
D_20190513	2,1	-2,5	0,8	2,4	3,1	4,3	-3,8	-0,3	-3,4	-3,2	-3,5	1,6	-2,6	-5,5	0,2	0,5	***	3,4	-5,1
D_20190519	3,5	0,6	-7,0	0,0	1,8	4,5	-0,3	1,7	-2,1	-1,1	2,5	-1,6	-4,0	-4,5	0,6	0,9	***	3,1	2,4
D_20190531	4,8	0,6	-0,8	2,3	3,0	1,0	3,5	0,3	-2,1	-1,8	-18,0	-1,9	-1,0	-4,3	-1,8	-1,1	***	-1,6	3,0
D_20190606	3,8	0,0	4,0	2,8	2,9	-1,9	-3,6	-1,4	-2,0	-1,9	-1,1	2,0	-1,5	-3,8	0,3	1,7	***	5,5	-3,0
D_20190612	2,9	1,0	2,5	2,4	1,8	-0,1	5,4	-0,5	-3,0	-2,6	-1,6	2,5	-1,1	-0,6	2,3	3,0	***	0,1	-2,9
D_20190618	2,4	1,2	3,1	2,6	1,4	0,8	-3,5	0,5	-2,4	-2,5	-1,7	3,2	1,3	-3,4	1,7	1,5	***	6,9	-2,9
D_20190624	-17,7	0,6	-4,3	2,0	3,8	9,5	3,2	3,3	-1,4	-1,0	0,3	1,2	0,9	-2,4	0,6	0,8	***	-0,6	2,0
D_20190630	2,7	-1,5	0,8	1,5	1,6	2,4	-3,0	0,2	-3,6	-3,1	-1,6	3,8	0,8	1,6	0,8	1,1	***	4,3	-5,3
D_20190706	4,8	-4,1	-0,8	1,8	4,6	-12,0	-2,2	-0,6	-1,9	-1,0	6,1	-3,0	-0,2	-1,8	-0,1	-0,2	***	-0,2	-4,6
D_20190712	1,9	-4,1	-0,2	1,0	1,3	1,2	-7,7	-1,3	-5,4	-4,1	3,5	0,5	-0,7	-5,9	-1,0	-1,0	***	6,8	-5,7
D_20190718	0,7	-4,1	0,7	0,6	-0,5	-0,4	-8,0	-1,8	-6,1	-4,1	-4,6	-0,2	-2,2	-4,3	-0,7	-1,3	***	7,2	-3,5
D_20190724	5,0	-1,7	1,3	2,5	3,0	2,4	-5,8	0,7	-3,5	-2,2	6,0	4,1	-0,1	-3,1	2,1	1,1	***	5,5	-3,0
D_20190730	0,1	-3,0	1,1	1,7	0,9	0,3	-6,4	-1,3	-4,4	-3,2	2,2	5,1	-1,8	-3,3	-0,1	-0,9	***	5,1	-1,2
D_20190805	3,1	-0,2	0,0	1,0	1,9	-2,0	-5,1	-1,1	-5,1	-3,6	9,1	4,4	-2,7	-8,3	-3,2	-3,4	***	5,8	-5,1
D_20190811	0,3	-1,7	-2,5	0,2	2,1	3,9	-10,9	0,1	-23,8	0,8	2,7	6,6	0,1	-1,8	-0,5	-0,1	***	0,3	-0,2
D_20190817	-2,3	-0,5	-0,5	0,7	2,4	-0,3	-7,6	-0,3	-4,4	-2,0	8,7	4,8	-0,5	-8,4	-4,0	-4,3	***	5,8	-1,6
D_20190823	0,6	-2,7	0,9	1,3	2,0	1,4	-13,2	-0,7	-5,8	-4,7	-1,7	4,5	-3,2	-6,6	-1,6	-3,0	***	1,1	-3,3
D_20190829	0,9	-21,5	1,2	1,2	1,2	2,8	-4,7	-0,5	-5,5	-5,1	-6,0	1,9	-1,1	-3,3	0,9	-0,7	***	7,7	-2,0
D_20190904	2,9	-4,0	-0,2	1,5	2,7	7,8	-2,7	1,2	-2,8	-1,7	2,6	3,6	-1,1	-4,3	-0,8	0,1	***	1,3	-0,1
D_20190910	3,8	-2,5	5,9	3,6	3,4	3,0	-12,7	-0,1	-1,6	-0,7	3,9	4,3	0,9	-0,1	2,8	4,5	***	2,5	-2,5
D_20190916	-1,9	-5,4	-1,9	-0,7	-1,2	-2,0	-6,4	-2,9	-3,5	-2,2	0,4	-0,3	-2,9	-2,3	3,1	3,8	***	4,8	-4,4
D_20190922	-0,7	-8,2	0,3	0,1	0,8	-6,9	-7,1	-4,8	-3,7	-3,0	1,0	0,1	-3,6	-2,7	-1,3	0,4	***	2,1	-7,5
D_20190928	-5,9	-4,7	-0,1	0,3	1,7	3,4	-5,8	-1,2	-2,2	-1,1	9,1	-0,4	-3,7	-4,6	-0,3	1,3	***	2,2	6,9
D_20191004	2,7	-3,7	-4,7	2,0	3,0	6,6	-4,8	-0,3	-3,1	-2,6	0,9	-0,3	-0,9	-5,7	-1,8	-0,7	***	2,7	-7,3
D_20191010	3,8	-1,2	0,9	1,8	3,6	4,2	-5,4	0,7	-2,7	-1,8	1,6	3,5	-0,4	-4,9	-0,3	0,0	***	5,3	-6,9

Продовження табл.3.8

D_20191016	-5,1	-5,6	-0,6	0,6	1,5	0,0	-6,3	-2,6	-4,7	-4,2	-4,6	-0,6	-1,7	-8,3	-5,2	-4,6	***	-1,9	-7,9
D_20191022	-1,3	-2,6	2,1	2,3	1,6	2,5	-5,4	-0,7	-4,8	-3,2	13,8	-2,7	-2,1	-9,8	-4,1	-2,4	***	-0,2	-4,4
D_20191028	-1,6	-5,0	0,1	2,7	3,6	-2,6	-4,3	-5,2	-7,9	-7,3	-9,0	-0,4	-4,5	-13,9	-6,7	-8,2	***	-1,5	-5,6
D_20191103	-3,0	-2,9	-0,3	-3,2	-2,9	2,7	-5,3	-2,4	-3,2	-3,0	-1,7	-12,2	-2,2	-6,0	-6,4	-5,9	***	-6,3	0,9
D_20191109	-1,5	-5,2	-3,0	-1,5	-0,7	-1,3	-5,8	-3,6	-6,0	-5,2	-1,9	-2,4	-4,5	-6,8	-3,4	-3,1	***	0,5	-5,7
D_20200326	-7,8	-6,1	-2,3	2,5	4,9	-5,9	-2,8	-5,4	-7,6	-7,2	-5,0	-4,0	-6,7	-8,6	-2,8	-2,2	***	0,1	-0,7
D_20200401	-6,9	-8,6	-7,0	-5,6	-6,1	-11,3	-3,1	-7,8	-9,3	-9,7	11,5	-4,6	-5,7	-9,6	-6,1	-4,9	***	-2,4	-14,2
D_20200407	10,8	-7,6	-0,5	0,6	3,3	-2,1	-1,1	-4,8	-5,4	-4,6	14,7	-3,4	-7,4	-6,4	-0,9	0,5	***	3,7	-3,2
D_20200413	-4,6	-8,4	-1,8	-1,8	-2,7	-6,7	2,3	-7,3	-8,4	-8,6	-9,8	-6,0	-6,8	-7,7	-4,1	-4,0	***	2,1	-4,5
D_20200419	-6,4	-7,2	-3,2	-2,8	-2,7	0,7	-2,6	-4,4	-6,7	-6,0	-2,5	-7,3	-5,9	-6,4	-4,4	-4,6	***	-0,9	-2,6
D_20200425	-2,9	-9,4	-4,7	-4,0	-3,3	-1,4	13,7	-5,6	-8,1	-7,7	-7,2	-4,6	-7,5	-11,1	-5,2	-4,7	***	-0,7	-6,9
D_20200501	-5,6	-10,2	-5,9	-3,0	-3,1	-2,7	-17,0	-6,2	-8,6	-8,0	-0,9	-5,5	-8,3	-10,2	-5,9	-5,8	***	-0,2	-6,4
D_20200507	-2,7	-8,7	-13,5	-3,5	-0,7	7,5	-4,2	-3,6	-7,5	-7,7	-5,9	-6,4	-11,7	-8,0	-5,8	-5,0	***	21,4	-1,5
D_20200513	-4,2	-7,4	-4,6	-4,8	-5,1	-5,3	-8,9	-5,8	-8,4	-7,0	-1,2	-5,2	-6,5	-10,3	-3,7	-3,4	***	-1,2	-11,5
D_20200519	-4,8	-7,1	-5,4	-5,2	-4,8	-1,6	-5,8	-6,0	-7,7	-7,5	-5,3	-2,1	-7,1	-9,8	-7,2	-6,7	***	1,4	-14,2
D_20200525	-2,6	-10,1	-8,4	-4,7	-3,1	-2,5	-8,8	-8,0	-7,9	-7,0	-1,9	-8,1	-10,2	-6,8	-5,5	-5,1	***	-0,8	-9,4
D_20200531	-5,0	-10,0	-15,0	-8,8	-7,1	-2,1	-5,2	-7,3	-7,6	-6,8	-0,7	-8,0	-8,4	-8,0	-7,3	-6,9	***	21,3	-8,5
D_20200606	-9,3	-7,6	-11,0	-11,0	-10,5	-4,9	-11,4	-6,0	-8,2	-6,9	-3,4	-14,2	-7,8	-11,2	-6,0	-6,0	***	0,9	-13,7
D_20200612	-7,4	-7,5	-10,5	-8,1	-8,0	-6,1	-0,8	-7,3	-8,0	-7,2	-0,4	-2,0	-9,7	-9,1	-5,4	-5,5	***	3,1	-9,2
D_20200618	-6,9	-6,8	-9,3	-8,5	-9,0	-7,3	-5,0	-7,5	-9,8	-8,9	-3,6	-4,5	-8,8	-9,4	-4,6	-6,1	***	0,7	-7,8
D_20200624	-7,8	-6,6	-15,7	-9,1	-7,2	0,1	-1,9	-3,5	-9,6	-8,6	-5,2	-9,4	-6,1	-12,4	-5,6	-5,8	***	5,5	-8,2
D_20200630	-3,5	-6,1	-19,4	-5,1	-4,6	-2,4	-5,1	-6,3	-8,1	-6,6	-2,7	-3,8	-9,2	-12,7	-8,8	-7,8	***	1,8	-6,2
D_20200706	-4,5	-5,5	-3,6	-3,9	-4,8	-5,3	-1,9	-7,6	-9,0	-8,7	-0,4	-2,5	-7,8	-5,7	-0,9	-2,4	***	4,2	-9,2
D_20200712	1,0	-3,9	-6,0	-1,7	-1,9	-1,6	-4,7	-4,5	-6,1	-5,1	1,5	-6,8	-7,3	-6,3	-2,8	-3,1	***	4,4	-6,8
D_20200718	0,8	-7,6	-1,1	-1,4	-1,5	-5,8	-4,9	-6,7	-8,6	-7,7	-1,8	0,4	-6,8	-7,8	-3,5	-4,7	***	2,1	-9,9
D_20200724	0,7	-11,5	-5,8	-3,0	-1,2	-11,6	-8,4	-9,9	-13,1	-12,3	-8,9	-8,5	-10,6	-15,0	-9,0	-9,3	***	-3,1	-13,0
D_20200730	1,2	-7,9	-7,6	-2,1	-0,3	-4,1	-5,3	-7,6	-10,9	-9,3	-2,3	-1,8	-7,7	-13,4	-5,9	-6,0	***	-0,9	-17,1
D_20200805	-13,5	-8,1	-6,7	-7,4	-10,3	-6,9	-3,5	-7,5	-7,7	-6,9	-1,0	0,7	-7,2	-6,9	-2,0	-4,3	***	2,3	-11,4

Продовження табл.3.8

D_20200811	-1,6	-8,5	-3,2	-1,4	-1,1	-6,7	-2,7	-7,3	-8,1	-7,1	-3,9	-2,8	-9,2	-9,3	-3,7	-3,6	***	2,0	-10,2
D_20200817	-18,5	-8,6	-4,9	-3,3	18,0	-10,6	-8,9	-7,8	-9,2	-8,2	1,9	-5,1	-9,7	-8,9	-2,9	-4,7	***	0,0	-11,4
D_20200823	-6,4	-9,0	-6,7	-5,5	-5,1	-8,0	-7,3	-7,1	-9,7	-9,0	-6,5	-4,2	-7,3	-10,1	-4,1	-4,7	***	1,6	-10,4
D_20200829	-2,5	-8,5	-8,8	-5,0	-4,0	-6,6	-5,8	-8,5	-8,7	-7,9	-0,2	-5,8	-10,0	-8,1	-6,4	-5,5	***	-1,4	-15,3
D_20200904	-2,0	-10,5	-7,4	-3,0	0,3	-10,6	-5,7	-9,1	-10,5	-9,9	-7,6	-5,9	-8,7	-12,9	-7,1	-6,1	***	-1,3	-15,7
D_20200910	-6,1	-11,0	-5,8	-5,1	-4,7	-6,9	-8,2	-9,9	-10,9	-10,0	-6,3	-4,6	-10,7	-11,6	-7,6	-8,1	***	-3,0	-15,0
D_20200916	-5,9	-10,2	-7,7	-5,3	-4,8	-6,8	-9,0	-8,2	-10,5	-9,8	-6,8	-5,6	-9,1	-11,5	-6,5	-6,1	***	-0,3	12,3
D_20200922	-5,3	-7,1	-8,7	-3,1	-2,7	-5,4	-8,1	-8,3	-9,5	-8,3	0,1	-5,8	-8,0	-8,3	-4,9	-6,2	***	-0,1	-8,6
D_20200928	-5,9	-13,6	-14,3	-6,6	-4,8	-3,2	-10,1	-9,1	-10,8	-10,1	-6,6	-7,1	-9,9	-9,7	-6,0	-6,7	***	-2,9	-10,8
D_20201004	-5,5	-8,6	-9,8	-8,0	-5,7	0,7	-5,9	-7,2	-8,2	-8,1	-5,3	-3,5	-8,5	-9,2	-5,9	-5,4	***	-4,0	-7,1
D_20201010	-10,8	-9,9	-10,6	-6,2	-6,0	-8,0	-9,0	-9,2	-11,1	-10,9	-8,7	-7,0	-8,1	-13,8	-9,9	-10,0	***	-1,7	-12,2
D_20201022	-3,4	-9,3	-18,2	-6,2	-5,0	-0,2	-16,8	-9,7	-9,5	-9,0	-1,4	-6,4	-10,2	-11,0	-10,1	-7,8	***	16,4	-9,3

Опис атрибутивної інформації точкових векторних шарів, які містять інформацію про місця радіолокаційних вимірів та вертикальні зміщення об'єктів методом PS наведені у табл. 3.9.

Таблиця 3.9

Роз'яснення атрибутивної інформації, що міститься у векторному файлі

Назва стовпця	Опис
FID / OBJECTID	Нумерація
Velocity	Середня швидкість вертикального зміщення (мм/рік)
Coherence	Значення когерентності (міри кореляції фаз радіолокаційних знімків) у точці виміру
Term0	Значення нульового ступеня інверсійного многочлена (у мм/рік)
Term1	Значення першого ступеня інверсійного многочлена (у мм/рік)
RMSEmm	Міра ступеню якості геокодування (мм). Чим вище це значення, тим гірша якість геокодування та інверсії
Hcorrectio	Значення поправки щодо вхідної цифрової моделі висоти (м)
Hprecision	Значення стандартного відхилення висоти поверхні над рівнем моря (м)
Vprecision	Значення стандартного відхилення швидкості вертикального зміщення (мм/рік)
Tot D_mm	Сума зміщення за період спостереження (мм)
SubArea_ID	Мінімальна площа для визначення контрольної точки однієї (км ²)
DEM	Значення, що відповідає виправленій цифровій моделі висот.
imageperc	Дійсний набутий відсоток (охоплений принаймні однією чинною мірою)
interfperc	Дійсний відсоток інтерферограми
normL1	Сума абсолютної величини зміщень за кожну дату знімання (мм).
ALOS / LOS_Az	Азимут напрямку руху супутника (градуси з десятковими долями)
ILOS / LOS_In	Кут місця напрямку руху супутника (градуси з десятковими долями)
xpos	Широта (градуси з десятковими долями)
ypos	Довгота (градуси з десятковими долями)
zpos	Значення висоти над поверхнею еліпсоїда (м)
D_20190401	Значення вертикального зміщення першої дати знімання супутником (мм) (є точка відліку – завжди 0)
D_20201022	Значення вертикального зміщення (в мм) станом на 26.06.2020 відносно першої дати знімання (22.10.2020) супутником (мм)

На рис. 3.38 представлено розміщення постійних стабільних відбивачів радіолокаційного сигналу на корпусі ІФНТУНГ. У цих точках алгоритм знаходив постійні стабільні відбивачі радіолокаційного сигналу, які є основними елементами у методі опрацювання радіолокаційних даних.

Середня швидкість вертикальних зміщень за період досліджень (01.04.2019-22.10.2020) території ІФНТУНГ за даними супутникового радіолокаційного знімання знаходиться у межах від -4 до +4 мм/рік (табл. 3.10).

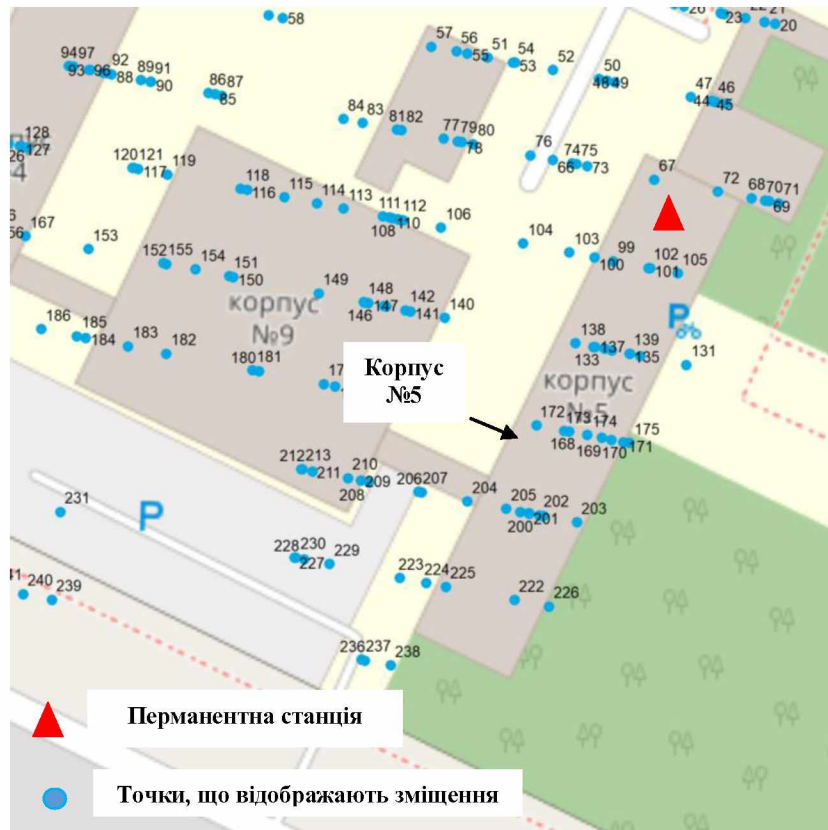


Рис. 3.39. Розміщення постійних стабільних відбивачів радіолокаційного сигналу на будівлі (м. Івано-Франківськ, корпус № 5 ІФНТУНГ)

Таблиця 3.10

Середня швидкість вертикальних зміщень будівлі (м. Івано-Франківськ, корпус № 5 ІФНТУНГ) за період з 01.04.2019 р. до 22.10.2020 року

Точка спостереження	Вертикальне зміщення, мм
67	-2,0
72	-5,4
99	-3,6
100	-1,5
101	-0,7
102	-1,5
105	-4,9
135	-3,7
137	-6,2
138	-5,1
139	-1,1
168	-2,3
170	-4,6
172	-6,7
200	-3,1
201	-2,9
202	-3,6
203	-8,6
205	-3,2
222	1,9
225	-5,7

Для встановлення коректності отриманих результатів, проведено порівняльний аналіз результатів досліджень, отриманих методом радіолокаційної інтерферометрії, та результатів опрацювання даних перманентної станції FRKV (табл. 3.11), яка входить до мережі перманентних станцій System Solution. Виміри перманентної станції FRKV отримано у період з 26.03.2020 до 10.10.2020 у системі координат WGS-84. За даними табл. 3.11 графічно представлено на рис. 3.39 зміну висоти перманентної станції відповідно до дати спостереження.

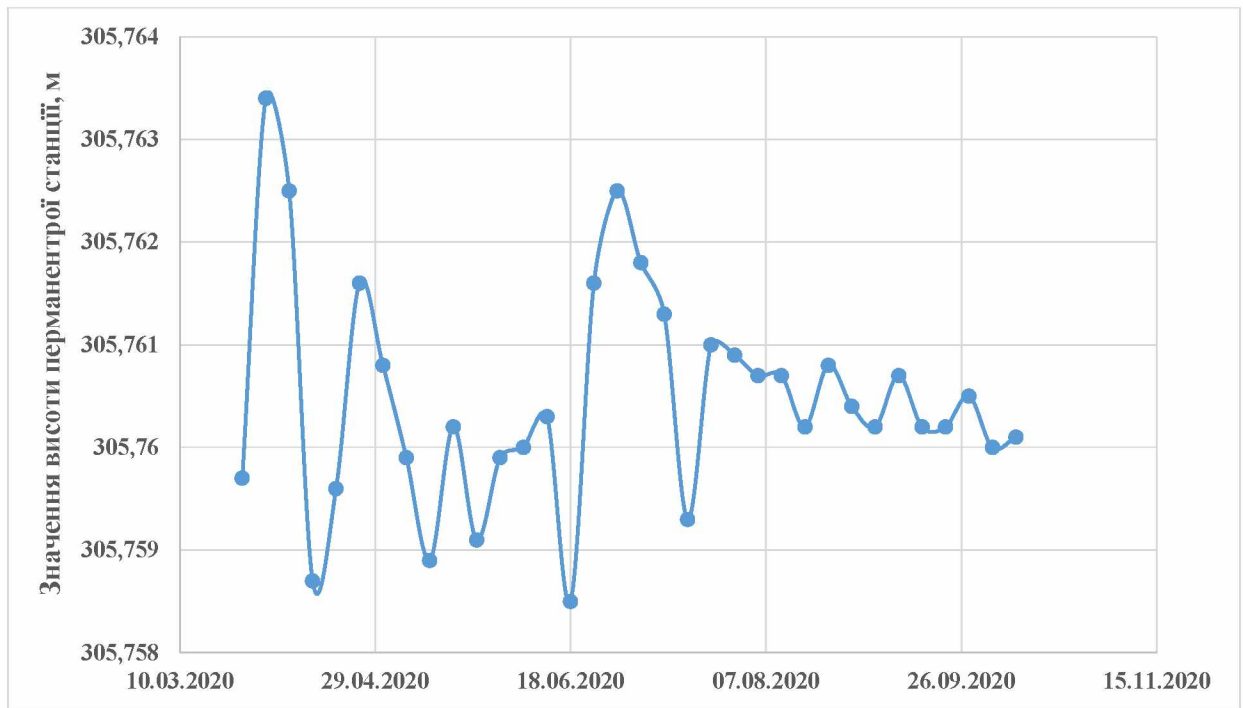


Рис. 3.39. Графік зміни висоти перманентної станції FRKV

На основі проведених досліджень встановлено, що зміна висоти максимального і мінімального значень перманентної станції в період з 26.03.2020 р. до 10.10.2020 р. за даними GNSS становила 4,9 мм (рис. 3.40).

Таблиця 3.11

Дані перманентної станції FRKV

Дата / Рік 2020	B, °	L, °	H, м
26.03	48°55' 47,03005" N	24°41' 40,33301" E	305,7597
01.04.	48°55' 47,03008" N	24°41' 40,33292" E	305,7634
07.04	48°55' 47,03004" N	24°41' 40,33310" E	305,7625
13.04	48°55' 47,03005" N	24°41' 40,33312" E	305,7587
19.04	48°55' 47,03013" N	24°41' 40,33293" E	305,7596
25.04	48°55' 47,03008" N	24°41' 40,33307" E	305,7616
01.05	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33307" E	305,7608
07.05	48°55' 47,02999" N	24°41' 40,33305" E	305,7599
13.05	48°55' 47,03000" N	24°41' 40,33308" E	305,7589
19.05	48°55' 47,02997" N	24°41' 40,33309" E	305,7602
25.05	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33300" E	305,7591
31.05	48°55' 47,02993" N	24°41' 40,33301" E	305,7599
06.06	48- 55' 47,03002" N	24°41' 40,33300" E	305,76
12.06	48- 55' 47,02998" N	24°41' 40,33297" E	305,7603
18.06	48°55' 47,03003" N	24° 41' 40,33316" E	305,7585
24.06	48°55' 47,03002" N	24°41' 40,33307" E	305,7616
30.06	48°55' 47,03001" N	24°41' 40,33306" E	305,7625
06.07	48°55' 47,03017" N	24°41' 40,33310" E	305,7618
12.07	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33306" E	305,7613
18.07	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33307" E	305,7593
24.07	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33303" E	305,761
30.07	48°55' 47,03004" N	24°41' 40,33302" E	305,7609
05.08	48°55' 47,03003" N	24° 41' 40,33301" E	305,7607
11.08	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33302" E	305,7607
17.08	48°55' 47,03002" N	24°41' 40,33301" E	305,7602
23.08	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33302" E	305,7608
29.08	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33303" E	305,7604
04.09	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33304" E	305,7602
10.09	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33301" E	305,7607
16.09	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33302" E	305,7602
22.09	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33304" E	305,7602
28.09	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33302" E	305,7605
04.10	48°55' 47,03003" N	24°41' 40,33302" E	305,76
10.10	48°55' 47,03001" N	24°41' 40,33303" E	305,7601

За даними радіолокаційної інтерферометрії середня швидкість вертикальних зміщень ближчих до антени точок, становить від -0,8 мм/рік до +4,2 мм/рік.

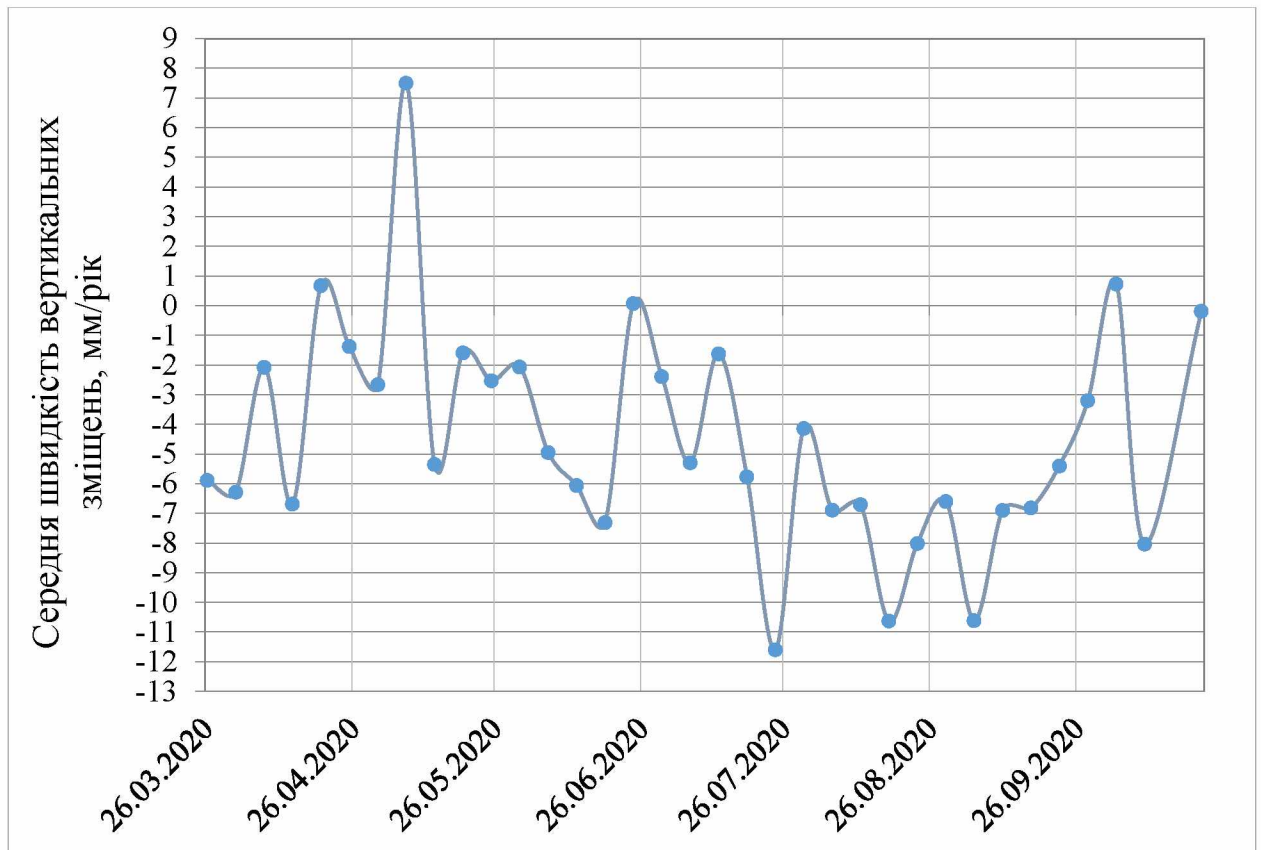


Рис. 3.40. Динаміка вертикальних зміщень у точці №102 за період 26.03.2020 – 22.10.2020

Аналізуючи інтерферометричний часовий ряд у радіолокаційні вимірі № 102 (найближчий радіолокаційний вимір до перманентної станції), а саме 35 значень вертикальних зміщень у період з 23.03.2020 по 22.10.2020 року, видно, що більшість їх (30 значень) знаходиться у діапазоні $-8...+1$ мм (рис.3.41). Враховуючи, що точність визначення вертикального зміщення у радіолокаційні вимірі методом PS знаходиться у діапазоні 4-6 міліметра, робимо висновок, що радіолокаційний вимір є стабільним. За визначений період (з 26.03.2020 по 22.10.2020 року) досліджено, що динаміка вертикального зміщення у радіолокаційні вимірі № 102 є незначною і співвідноситься з похибкою розрахунку вертикальних зміщень інтерферометричним методом PS.

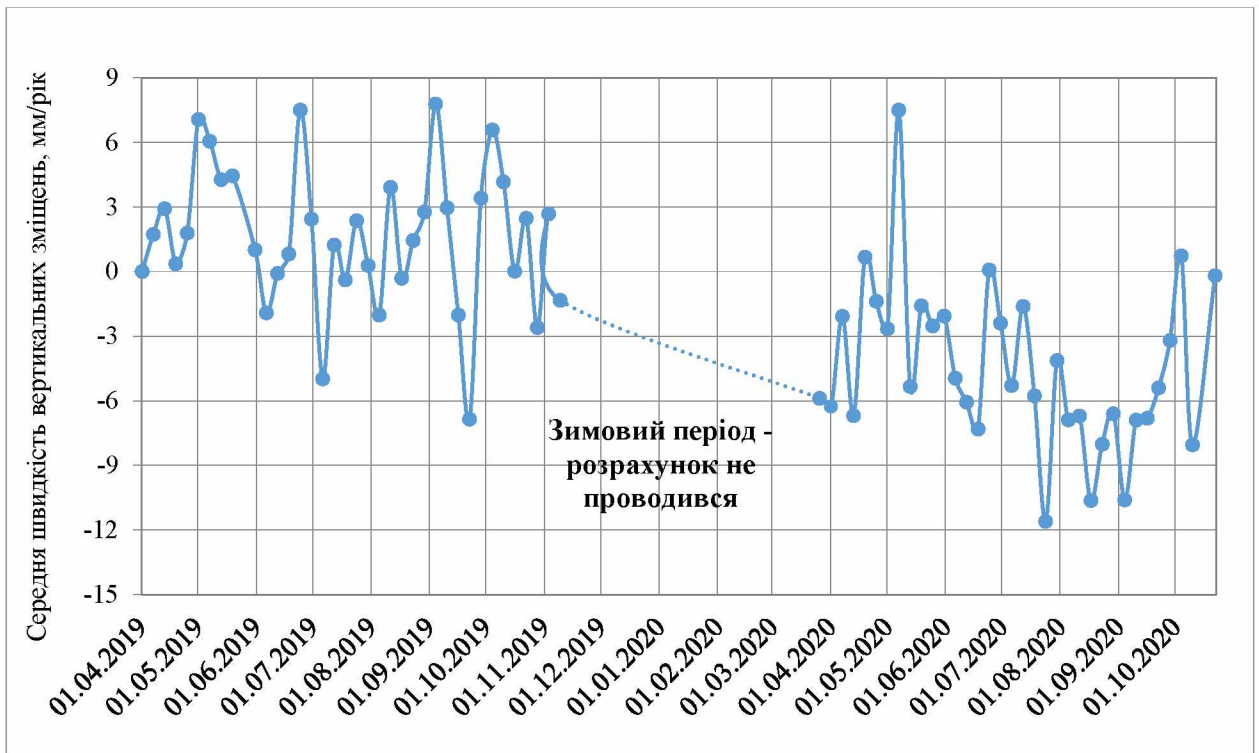


Рис. 3.41. Динаміка вертикальних зміщень в точці №102
за період 01.04.2019 – 22.10.2020

Також, це підтверджується динамікою вертикальних зміщень за більш тривалий період часу, а саме у період з 01.04.2019 по 22.10.2020 року де середня швидкість вертикального зміщення складає 0,6 мм/рік (рис.3.41).

Середня швидкість вертикальних зміщень за період досліджень (01.04.2019-22.10.2020) території ІФНТУНГ за даними супутникового радіолокаційного знімання знаходиться у межах від -4 до +4 мм/рік, що не виходить за межі похибки розрахунку визначення осідань та деформацій будівель і споруд.

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

1. За допомогою засобів високоточного геометричного нівелювання коротким променем та радіолокаційної інтерферометрії у період з 03.04.2016 до 31.10.2017 років оцінено геодинамічний стан природно-техногенної системи території рудника «Хотінь» Калуш-Голинського родовища та прилеглої території. Виділено ділянки місцевості зі значними осіданнями та встановлені швидкості цих осідань. За результатами радіолокаційної

інтерферометрії в зоні осідань з швидкостями від -8 мм/рік до -20 мм/рік розміщено декілька реперів, швидкість осідань яких за результатами високоточного геометричного нівелювання становить від - 8,9 мм/рік до - 13,8 мм/рік.

2. Оцінювання надійності будівель показало, що осідання споруди за даними системи GNSS становить -9 мм, а за даними радіолокаційної інтерферометрії осідання ближчих до антени точок становить загалом - 3,7 мм, що не виходять за межі похибки розрахунку деформацій будівель і споруд.

3. Проведені повторні дослідження надійності будівлі підтвердили відсутність будь яких деформаційних зрушень самої будівлі, оскільки даний об'єкт споруджено на надійних ґрунтах. Також було підтвержено можливість застосовувати дані радіолокаційного знімання для визначення вертикальних зміщень не тільки земної поверхні, а й будівель (споруд). За період досліджень з 01.04.2019 по 22.10.2020 середня швидкість вертикальних зміщень території ІФНТУНГ за даними супутникового радіолокаційного знімання знаходиться у межах від -4 до +4 мм/рік, що не виходить за межі похибки розрахунку деформацій будівель і споруд.

4. Варто зазначити, що чим більше знімків використовується для інтерферометричного опрацювання, тим краща якість продукції. Тому використання архівних даних космічного знімання дозволяє аналізувати теперішній, так і попередній геодинамічні стани об'єктів та територій, завдяки чому з'являється можливість визначення динаміки цих процесів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано комплекс досліджень та випробувань в промислових умовах, у результаті яких науково обґрунтовано використання даних радіолокаційної інтерферометрії для вдосконалення геодезичного контролю за вертикальними зміщеннями на техногенно-небезпечних об'єктах та об'єктах інфраструктури. Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Запропоновано використовувати комплексну методику опрацювання радіолокаційних даних на основі методу постійних розсіювачів (PS) та методу малих базисних ліній (SBAS) для складних об'єктів. За допомогою цієї методики опрацювання радіолокаційних знімків було ідентифіковано активні зони вертикальних зміщень земної поверхні, середньорічна швидкість яких становить від +6 мм/рік до -40 мм/рік.

2. Встановлено залежність радіолокаційних вимірювань від типу підстильної поверхні. Точність вимірювання вертикальних зміщень сягає порядку 4-6 мм для забудованих територій, а при наявності рослинного покриття на території дослідження точність вимірювань осідань становить 6- 20 мм.

3. Для отримання поправок фазової складової та скорочення інтерферометричного опрацювання запропоновано використовувати алгоритм Гольдштейна (Goldstein filter). Після фільтрації фазового шуму алгоритмом Гольдштейна зменшуються розміри ділянок шумів та збільшуються радіуси кореляції шуму.

4. Виконано порівняльний аналіз результатів радіолокаційної інтерферометрії з використанням методів PS та SBAS з даними високоточного геометричного нівелювання для оцінки зрушень і деформацій земної поверхні на прикладі шахтного поля «Хотінь». Серії спостережень високоточного геометричного нівелюванням та радіолокаційної інтерферометрії корелюють і підтверджують наявність зони активних осідань на території гірничої виробки.

5. Проведено порівняльний аналіз оцінювання деформацій будівель за результатами радіолокаційної інтерферометрії (середня швидкість вертикальних зміщень знаходиться у межах від -4 до +4 мм/рік) та даними перманентної станції GNSS зміна висоти максимального і мінімального значень перманентної станції становила 4,9 мм. Це свідчить про те, що отримані результати знаходяться в межах точності вимірів.

6. Результати проведених експериментальних досліджень із використанням запропонованої комплексної методики і порівняльного аналізу даних радіолокаційної інтерферометрії з даними наземних геодезичних методів вказують на те, що дані радіолокаційної інтерферометрії дозволяють виділяти активні ділянки з нетиповими деформаціями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алябьев А. А., Коберниченко В. Г. Использование материалов радиолокационной космической съемки для информационного обеспечения мониторинга пространственных данных. *Геодезия и картография*. № 5. Май 2007. С. 37–45.
2. Артамонов Б. Б., Корчев В. Б. Тематичні завдання оцінки стану навколишнього середовища, які можуть бути вирішені з використанням матеріалів дистанційного зондування Землі. Освітньо-наукове забезпечення діяльності правоохоронних органів і військових формувань України. Серія: Військово-технічні науки: зб. матеріалів доп. учасн. V Всеукраїнської наук.-практ. конференції. Видавництво Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, 2012. С. 5–7.
3. Архіпов О. І., Станкевич С. А., Титаренко О. В. Картування границь нафтогазоносних ділянок за даними наземного спектрометрування. Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. 2009. № 6. С. 123–131.
4. Асташкин А. А. Космические системы аппараты и приборы для решения задач природоиспользования и экономического контроля. Москва : ВИНТИ, 1991. 142 с.
5. Баран П. І Інженерна Геодезія: монографія. Київ : ПАТ «ВПОЛ», 2012. 618 с.
6. Баран П. І. та ін. Про використання космічних знімків для кадастру земель та великомасштабного картографування. Вісник геодезії і картографії. 2006. № 6. С.31–37.
7. Баранов Ю. Б., Кантемиров Ю. И., Киселевский Е. В., Болсуновский М. А. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов. *Геоматика*. 2008. № 1. С. 51–55.
8. Байрак Г. Методи геоморфологічних досліджень: навч. посібник. Львів ЛНУ імені Івана Франка. 2018. 292 с.

9. Безродна І. М, Безродний Д.А. Методичні вказівки з лабораторних занять з курсу «Геофізичні методи досліджень» для студентів геологічних спеціальностей. 2012. С. 65.
10. Бурштинська Х. В., Станкевич С. А. Аерокосмічні знімальні системи: підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 316 с.
11. Бурштинська Х., Долинська І. Дослідження впливу основних чинників на розрізненість космічних знімальних систем. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2010. Вип. 73. С. 87–91.
12. Високоточні нахиломірні вимірювання для моніторингу території шахтних полів рудника № 2 стебницького калійного родовища / О. Заяць та ін. Геодинаміка. 2017. №2(23). С. 25–33.
13. Геодезичний моніторинг деформацій методом радарної інтерферометрії / М. Ю. Пакшин та ін. Розвиток технічних наук: проблеми та рішення: зб. матеріалів міжнародної науково-практичної конференції (м.Брно, Чеська Республіка, 27-28 квітня 2018 р.). Брно, 2018. С.168–171.
14. Геодезія. Частина перша. Топографія: навч. посібник / А.Л. Островський, О.І. Мороз, З.Р. Тартачинська, І.Ф. Гарасимчук. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 440 с.
15. Гера О., Гринішак М., Дорош Л. Чинники утворення мульд осідання земної поверхні у районах підземних гірничих виробок. *Технічні науки та технології*. 2021. № 2(24). С. 227-234.
16. Горбатюк С. В. Основні завдання моніторингу землі. Проблеми системного підходу в економіці. 2014. № 50. С. 34–40.
17. Горяннов В. Т. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием аппаратуры антенны. Москва: Радио и связь, 1988. 304 с.
18. Дистанційне зондування з основами фотограмметрії: навчальний посібник. / Білоус В. В. та ін. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2011. 367 с.
19. Дослідження можливостей радарних супутникових даних для геодезичного моніторингу / М.Ю. Пакшин та ін. Геопростір 2017: зб.

матеріалів 3-ої міжнародної наук.-техн. конференції (м. Київ, 4-6 грудня 2017 р.). Київ, 2017. С.73–76.

20. Дорош Л.І., Гера О.В. Супутниковий моніторинг гірничих відводів за даними радарної інтерферометрії. *GEOFORUM 2020*: зб. тез 25-ої міжнародної наук.-техн. конференції (м. Львів, 1-3 квітня 2020 р). Львів. С. 31–34.

21. ДСТУ Б.В.2.1-XXX:201X: Грунти. Методи і вимірювання деформацій основ будинків і споруд. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 201X. 53 с.

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

23. Захаров А. И., Хренов Н. Н Радиолокационные интерферометрические методы наблюдения Земли в задаче мониторинга подвижек газопроводов. Газовая промышленность. 2004. № 3. С. 44–48.

24. Зуйко В. В., Козуб А. М., Михалевич В. Е Сучасний стан і тенденції розвитку космічних систем дистанційного зондування землі провідних країн світу. Інформаційні технології. 2015. № 6 (2). С. 51–60.

25. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARscape и данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS. Часть 1. Ключевые моменты метода / А. А. Феоктистов и пр. Журнал радиоэлектроники. 2015. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/1/text.html>. (дата звернення: 15.01.2020)

26. Канащенкова А. И. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли. Москва: Радиотехника, 2006. 240 с.

27. Кантемиров Ю. И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций PS и SBAS. Геоматика. 2012. № 1. 22–26.

28. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. Москва: Академия, 2004. 336 с.

29. Кобилінська Є. В. Розвиток методів дешифрування об'єктів місцевості при топографічному зніманні космічними системами ДЗЗ. Вісн. геодезії та картографії. 2009. № 4 (61). С. 28–33.
30. Ковтун В. М., Дорош Л. І., Ничвид М. Р. Дослідження точності знаходження масштабних коефіцієнтів цифрових ортофотопланів. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Т. 27, №6. С. 168–171.
31. Косарєв М. В., Ясенев С. О. Аналіз матеріалів космічного знімання для використання в задачах геоінформаційного картографування. Вісник астрономічної школи. 2013. Том 9, №2. С.169–175.
32. Косарєв М. В., Ясенев С. О. Космічні знімки як фундаментальна основа картографічних матеріалів та геоінформаційних систем. Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. 2011. №19. С.42–45.
33. Космічні системи дистанційного зондування землі подвійного призначення: навч. посіб / І.Д. Варламов та ін. Київ: НУОУ, 2015. 204 с.
34. Кохан С.С. , А. Б. Востоков Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручник. Київ: Вища шк., 2009. 511 с.
35. Кузьменко Е. Д., Багрій С. М., Чепурний І. В, Штогрин М. В. Оцінка небезпеки приповерхневих деформацій гірських порід у межах Стебницького калійного родовища методом ПЕМПЗ. Геодинаміка. 2017. №1(22). С. 98–113
36. Лурье И. К, Косиков А. Г. Дистанционное зондирование Земли и географические информационные системы. Теория и практика цифровой обработки изображений. Москва: Научный мир, 2003. 174 с.
37. Лысков И. А., Мухин В. В., Кашников Ю. А. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности методами радарной интерферометрии. Вестник ПГТУ Геология. Неф-тегазовое и горное дело. 2010. № 5. С. 11–16.
38. Лялько В. І., Попов М. О. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: монографія. Київ: Наукова думка, 2006. 360 с.

39. Ляска І.І., Пакшин М.Ю., Стасюк В.М. Дослідження стану геодинамічних процесів в Україні методами та засобами радіолокаційної зйомки. Аерокосмічні технології. 2017. №1. С. 15–22.
40. Мармоза А. Т. Теорія статистики 2-ге вид. та доп. Київ: «Центр учбової літератури », 2013. 592 с.
41. Маслов А.В., Гордеев А.В., Батраков Ю.Г. Геодезия. Учеб. пособие для вузов. Изд. 4, перераб. и доп. Москва: Недра, 1980. 616 с.
42. Матвеев И.Н., Протопопов В.В., Троицкий И.Н., Устинов Н.Д. Лазерная локация. Москва: Машиностроение, 1984. 272 с.
43. Моніторинг вертикальних зміщень території ГХП «Полімінерал» з використанням інтерферометричних методів оброблення супутникових радарних вимірювань та нахиломірних спостережень / І. Мордвінов. та ін. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2018. Випуск I (35). С. 220–226.
44. Назаров А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие для студентов вузов. Минск: ТетраСистемс, 2006. 368 с.
45. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2007 р. Київ: ДП «Агентство “Чорнобильінформ”», 2008. 230 с.
46. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2008 р. Київ: ДП «Агентство “Чорнобильінформ”», 2009. 230 с.
47. Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів від 1:10000 до 1:1000000. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України Наказ №3 від 31.12.1999 р.
48. Основні положення створення топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України Наказ №156 від 24.01.1994 р.
49. Особливості геодезичного моніторингу та прогнозування геотехногенної динаміки на шахтних полях калійних родовищ / К. О. Бурак та ін.. Вісник геодезії та картографії. 2014. № 5. С. 12–18.

50. Оцінка зрушень і деформацій земної поверхні території рудника "хотінь" Калуш-Голинського родовища / Л.І. Дорош та ін. *GEOFORUM 2019*: зб. тез 24-ої міжнародної наук.-техн. конференції (м. Львів, 10-12 квітня 2019 р.). Львів. С. 32-34.

51. Оценка экспрессными методами эколого-геологической обстановки месторождения калийных солей "Стебник" в Предкарпатье (Украина) / А. В. Лушик и пр. *Геодинаміка*. 2017. № 1 (22). С. 55–61.

52. Побережна Л. Я Оцінка екологічних ризиків в районах ліквідованих гірничо-хімічних підприємств (на прикладі м. Калуш): дис... канд. техн. наук: 21.06.01 / ІФНТУНГ. Івано-Франківськ, 2016. 136 с.

53. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С Верба и пр. Москва: Радиотехника, 2010. 675 с.

54. Райтер П.М. Сучасні методи опрацювання інформації в інженерних дисциплінах: лабораторний практикум. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 71 с.

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

56. Рис У. Основы дистанционного зондирования. Москва: Техносфера, 2006. 336 с.

57. Ріпецький Є. 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.

58. Станкевич С. А., Васько А. В. Застосування сучасних технологій аерокосмічного знімання в аграрній сфері. *Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій: матеріали наук.-практ. конференції* (м.Київ, 10-13 травня 2011 р.). Київ, 2011. С.44–50.

59. Томченко О. В. Космічний моніторинг території заказника «Чорнобильський спеціальний». Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних

ситуаціях: зб. наукових статей XIII міжнародної наук.-практ. конференції (м.Київ, 29 верес. – 3 жовт 2014 р.). Київ, 2014. С. 119–127.

60. Тревого І., Горб А., Мелешко О. Застосування радарів із синтезованою апертурою для високоточного геопросторового моніторингу. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2017. Вип. 1. С. 44–46. URL:http://nbuv.gov.ua/UJRN/sdgn_2017_1_11.

61. Урмаев М. С. Космическая фотограмметрия. Москва: Недра, 1989. 279 с.

62. Филатов А. В., Евтюшкин А.В. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи в Западной Сибири методом РСА интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т.6, №2. С.46–53.

63. Фотограмметричні методи в оцінці надзвичайних ситуацій / О. Л. Дорожинський та ін. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2013. Вип. 78. С. 16–23.

64. Штогрин М. В., Анікеєв С. Г., Синицька О. О. Комплексні геофізичні дослідження території Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Нафтогазова енергетика. 2019. № 1(31). С. 7-17

65. Ященко А. И. От водяного уровня до высоко-точного инклинометра. Геопрофи. 2010. 4. С. 17–19.

66. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry / Bernardino P. et al. IEEE Aerospace and Electronic. November 2002. Vol. 40, No. 11. P. 2375-2383.

67. A web-based GPS system for displacement monitoring and failure mechanism analysis of reservoir landslide / Y. Li et. al. Scientific reports. 2017. Vol.7 (1). P. 1–13.

68. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects / G.W. Bawden et. al. Nature. 2001. 412, 812–815.

69. 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.
70. 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.
71. Critical Short Term and Strategic Long Term Slope Monitoring Radar – an approach using SAR / N. Coli et al. *Water and Energy International*. 2015. Vol.60 (6). P. 75.
72. 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.
73. Ding X.L., Liu G.X., Li Z.W., Li Z.L. & Chen Y.Q., 2004. Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2004. Vol. 70(10). P. 1151–1156.
74. Estimation of earth's surface moves and deformation of the territory of mine "Khotin" of kalush-golinsky field by method of radar interferometry / M. Pakshyn et. al. *Geodesy and cartography*. Vilnius. 2019. Vol. 45, Issue 1. P. 37– 42.
75. Field monitoring and deformation characteristics of a landslide with piles in the three gorges reservoir area / Y. Zhang et. al. *Landslides*. 2018. Vol. 15(3). P. 581–592.
76. Fielding E.J., Blom R.G., Goldstein R.M. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR Interferometry. *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25(17). P. 3215– 3218.
77. Forensic analysis of the evolution of damages to buildings constructed in a mining area / A. E. Álvarez-Vigil et al. *Engineering Failure Analysis*. 2010. Vol. 17 (4). pp. 938–960.
78. Ge L.L., Chang H.C., Rizos C. Mine subsidence monitoring using multi-source satellite SAR images. *Photogram. Eng. Remote Sensing*. 2007. Vol. 73(3). P. 259– 266.

79. Giff G., Loenen B., Cromptvoets J., Zevenbergen J. Geoportals in selected European states: A non-technical comparative analysis. *Small Island Perspectives on Global Challenges: The Role of Spatial Data in Supporting a Sustainable Future* location St. Augustine, Trinidad. 2008. P. 25–29. URL: <http://www.gsdi.org/gsdi10/papers/TS41.3paper.pdf> (дата звернення: 25.11.2019)
80. Goel K., Adam N. Distributed Scatterer Interferometry Approach for Precision Monitoring of Known Surface Deformation Phenomena. *EEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*. 2013. Vol. 52, No. 9. P. 5454–5468.
81. Goldstein R. M., Zebker H. A., Werner C. L. Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.* 1988. Vol. 23(4). P. 713–720.
82. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System / M. Bevis et. al. *Journal of Geophysical Research*. 1992. Vol. 97(D14). P. 15787–15801.
83. Gray L., Mattar K., Short N. Speckle Tracking for 2-Dimensional Ice Motion Studies in Polar Regions: Influence of the Ionosphere. *Proc. of the ESA Fringe'99 Meeting*. 1999. P. 1–8.
84. Hanssen R. F. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001. 275 p.
85. Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35 (16). URL: <https://doi.org/10.1029/2008GL034654> (дата звернення: 05.12.2019)
86. Huang H., Legarsky J., Othman M. Land-cover Classification Using Radarsat and Landsat Imagery for St. Louis, Missouri / H. Huang. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2007. Vol. 73. № 1. P. 37–43.
87. Ingo Neumann, Hansjörg Kutterer *Geodetic Deformation Analysis with Respect to Observation Imprecision Shaping the Change*. XXIII FIG Congress Munich, Germany. 2006. P. 13 – 14.
88. *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
(дата звернення: 10.12.2019).

89. Kampes B. M. Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2006. 153 p.

90. Madsen S. N., Zebker H. A., Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing. 1993. Vol. 31. P. 246–256.

91. Mandel J. The Statistical Analysis of Experimental Data. John Wiley & Sons, New York, 1964. 403 p.

92. 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.

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

94. Monitoring of mining branches according to satellite radar interferometry / L. Dorosh et. al. *GeoTerrace-2020*: collection of materials international conference of young professionals (t. Lviv, December 7-9, 2020 Ukraine). Lviv, 2020. P.1-5. (Scopus)

95. 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

96. Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential interferometry / B. Fruneau et. al. Comp. Rend. Geosci. 2005. Vol. 337. P. 1173–1183.

97. Pepe A., Lanari R. On the extension of minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2006. Vol. 44(9). P. 2374–2383.

98. Pretorius C. J., Schmidt W. F., van Staden C. S., Egger K. The extensive geodetic system used for the monitoring of a 185 metre high arch dam in Southern Africa. Session VI: Deformation monitoring and modelling of large dams. Orange, California, USA. 19–22 March. P. 203–213

99. Persistent Scatterer Interferometry / M. Crosetto Montserrat et. al. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. Vol. 115. p. 78–89.
100. 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.
101. Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow / G. Peltzer et. al. *Science*. 1996. Vol. 273. P. 1202–1204.
102. Radar interferometry mapping of deformation in the year after the Landers earthquake / D. Massonnet et. al. *Nature*. 1994. Vol. 369. P. 227–230.
103. Richards M. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing. *IEEE Aerospace and Electronic*. 2007. Vol. 22, № 9. P. 5–29.
104. Research of influence of the earth's subsidence outside the loads contour on the stability of the high position of the points of local leveling networks / L. Dorosh et. al. *Geodesy and cartography. Vilnius*. 2020. Vol. 46, Issue 1. P. 113– 122. (“Scopus”)
105. SAR tomography for the retrieval of forest biomass and height: Cross-validation at two tropical forest sites in French Guiana / D.H.T. Minh et. al. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 175. P. 138–147.
106. Segall P. and Davis J. L. GPS applications for geodynamics and Earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1997. Vol. 25. P. 301–336.
107. Study on perspectives of the interferometric synthetic aperture radar method to ensure the operational reliability of main gas pipelines on sites with complicated engineering-geological conditions / L. Dorosh et. al. *KSIĘGA JUBILEUSZOWA. Publikacje Wydziału Nauk Technicznych z okazji xx lat. Wyższej Szkoły Gospodarki Krajowej w Kutnie*. 2019. № I. P. 19–28.
108. Synergic use of satellite and ground based remote sensing methods for monitoring the San Leo rock cliff (Northern Italy) / W. Frodella et.al. *Geomorphology*. 2016. Vol. 264. P. 80–94.
109. Synthetic aperture radar interferometry / P.A. Rosen et al. *Proceeding of IEEE*. 2000. Vol. 88. No. 3. P. 333–380.

110. Terrestrial laser scanning for rockfall stability analysis in the cultural heritage site of Pitigliano / R. Fanti et. al. *Landslides*. 2013. Vol. 10 (4). P. 409–420.
111. Ünsalan C., Kim L. Boyer *Multispectral Satellite Image Understanding. From Land Classification to Building and Road*. Springer, 2011. 203 p.
112. Wicks C., Thatcher W., Dzuri, D. Migration of fluids beneath Yellowstone Caldera inferred from Satellite Radar Interferometry. *Science*. 1998. Vol. 282. P. 458–462.
113. 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.
114. Zebker H. A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992. Vol. 30(5). P. 950–959.
115. Супутники дистанційного зондування Землі. Geoguide: вебсайт. URL: <http://www.geoguide.com.ua/survey/survey.php?part=dzz&art=allsat> (дата звернення: 06.07.2019).
116. TVIS: вебсайт. URL: <http://www.tvis.com.ua/> (дата звернення: 10.04.2019).
117. Спутниковая радарная интерферометрия: вебсайт. URL: http://dkhramov.dp.ua/Sci.InSAR#.W-nOo1Vl_IX (дата звернення: 19.04.2019)
118. Перелік тематичних задач, що вирішуються з застосуванням методів дистанційного зондування Землі. Studfiles.net: вебсайт. URL: <https://studfiles.net/preview/3740870/page:8/> (дата звернення: 25.01.2019).
119. SARscape: вебсайт. URL: <http://www.sarmap.ch/wp/index.php/software/sarscape/> (дата звернення: 25.09.2020).
120. Information about SARscape for ENVI: вебсайт. URL: <https://nps.edu/documents/106458200/109356511/SARscape.pdf/6430cf52-e1bd-4186-9be8-325f671a821d?t=1452145838000> (дата звернення: 25.09.2020).