

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ДОРОШ ЛЮБОВ ІГОРІВНА



УДК 528.88

**МОНІТОРИНГ ТЕХНОГЕННО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАСОБАМИ
РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Бурак Костянтин Омелянович,
завідувач кафедри геодезії та землеустрою
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу,
м. Івано-Франківськ.

Офіційні опоненти – докторка технічних наук, професорка
Кохан Світлана Станіславівна,
завідувачка кафедри геоінформатики і
аерокосмічних досліджень Землі
Національного університету біоресурсів і
природокористування України,
м. Київ;

кандидат технічних наук,
Четверіков Борис Володимирович,
доцент кафедри фотограмметрії та геоінформатики
Національного університету «Львівська
політехніка»,
м. Львів.

Захист відбудеться « 29 » _____ грудня _____ 2021 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, ауд. 502 II навч. корпус.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий « 26 » листопада 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент



Паляниця Б.Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дисертації. Згідно з даними Національних доповідей про стан техногенної та природної безпеки в Україні, внаслідок надзвичайних ситуацій геологічного характеру держава зазнає багатомільйонних збитків. Процеси деформації земної поверхні загрожують стабільності важливих об'єктів інфраструктури, таких як будівельні споруди, лінії електропередач, автодороги, залізниці, газопроводи, водогони тощо. 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, а саме: зсувів, просідання поверхні землі, карстопровальних явищ. Карстові провали утворюються як на території шахтних полів, так і в прибортових частинах територій родовищ. Внаслідок 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. Деякі підземні шахти були засипані твердими матеріалами для того, щоб підтримувати розроблені порожнини, більшість з яких була заповнена розсолем, частина – прісною водою. Але заповнення шахт розсолем не гарантує стійкості проміжних колон. Внаслідок руйнації цих колон земля над шахтою просідає.

Для того щоб контролювати перебіг таких процесів та вживати відповідних заходів, необхідно вчасно організовувати моніторинг розвитку цих процесів.

Оскільки процес визначення активних (аномальних) зон деформацій земної поверхні геодезичними та геофізичними методами є часозатратним та дороговартісним, необхідно розширювати перелік методів спостереження за деформаціями земної поверхні шляхом залучення сучасної технології дистанційного зондування Землі – радіолокаційної інтерферометрії. Використання цієї технології до кінця не обґрунтоване під час виконання інженерно-геодезичних робіт, тому постає потреба у виявленні альтернативних методик. З огляду на науковий, економічний та екологічний аспекти тема дисертаційного дослідження є, безперечно, актуальною, а здобутки можуть стати в нагоді широкому колу фахівців.

У процесі виконання дисертаційних досліджень враховано досвід провідних вітчизняних та зарубіжних учених. 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., Гуляєв Ю. П., Зайцев А. К., Bürgmann, R., Dresen, G., Wu M., Wang, H. F., Savage J.C. Дослідженням методів опрацювання радіолокаційних даних займалися І. Мордвідов, І. Ляска, М. Пакшин, А. А. Феоктистов, А. В. Филатов, А. В. Евтюшкін, D. Massonnet, K.L. Feigl, M. Costantini, M. A Richards та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких відображені в дисертаційній роботі, виконані відповідно до наукового напряму кафедри геодезії та землеустрою Івано-Франківського

національного технічного університету нафти і газу «Геодезичне та землепорядне 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 методіку 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'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.

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 полягає в наступному:

- 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 проєктних 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, нераціонального 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».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати досліджень дисертаційної роботи, висновки та пропозиції одержані автором самостійно. Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві, такий: оцінено точність визначення динаміки деформацій споруди [4]; опрацьовано дані радіолокаційної інтерферометрії та перманентної станції GNSS та виконано аналіз результатів [6]; апробовано запропоновану методику опрацювання радіолокаційних знімків для визначення вертикальних зміщень на ділянці дослідження [1]; проведено порівняльний аналіз результатів серій спостережень наземним геодезичним методом з даними радіолокаційної інтерферометрії для підтвердження наявності зони активних осідань на територіях гірничих виробок [5, 7]; створено графіки осідань земної поверхні території шахтного поля «Хотінь»

[3, 7]; проведено опрацювання радіолокаційних даних методами PS та SBAS [8, 9], проведено розрахунок осідань фундаментів методом еквівалентного шару ґрунту [2].

Апробація матеріалів дисертації. Основні теоретичні та експериментальні результати досліджень дисертаційної роботи представлені в доповідях та обговорювалися на 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Геопростір 2017», м. Київ, 4-7 грудня 2017 р.; Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток технічних наук: проблеми та рішення», м. Брно, Чеська Республіка, 27-28 квітня 2018 р.; XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «GEOFORUM'2019», Львів – Брюховичі – Яворів, 10-12 квітня 2019 р.; XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «GEOFORUM'2020», Львів – Брюховичі – Яворів, 1-3 квітня 2020 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Geoterrace-2020», Львів, 07-09 грудня 2020 р.; 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: дві – у науковому періодичному виданні іншої держави, яке включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, одна – у науковому неперіодичному виданні іншої держави (Польща); одна – у науковому фаховому виданні України та п'ять – у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (120 найменувань). Загальний обсяг дисертації становить 141 сторінка, ілюстрації складають: 56 рисунків, 13 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульована мета і завдання досліджень, розкрито наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, охарактеризовано особистий внесок здобувача, подано інформацію про апробацію результатів дисертації та кількість публікацій.

У першому розділі дисертаційної роботи «**Спостереження за деформаціями земної поверхні та їх дослідження методами радіолокаційної інтерферометрії. Аналіз літературних джерел**» обґрунтовано необхідність проведення моніторингу вертикальних зміщень на прикладі території Калуш-Голинського родовища калійних солей. Розглянуто проблеми осідання земель, яке спричинене гірничорудними виробками. Проаналізовано сучасний досвід вітчизняних та закордонних вчених у вирішенні пріоритетних завдань. Розглянуто низку нормативних документів та зроблено висновок про доцільність оновлення наявних інструкцій шляхом доповнень інформацією щодо використання космічних знімків, отриманих не тільки в оптичному, але й в частотному діапазонах. Представлені основні напрямки використання космічних знімків, отриманих системами дистанційного зондування Землі, зокрема спостереження за сучасними геодинамічними рухами Землі. Проаналізовано класифікацію методів вимірювань деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів.

Як правило, геодезичний моніторинг у гірничодобувному виробництві виконується із застосуванням тахеометрів, GNSS-приймачів та інклінометрів. У вітчизняній практиці при визначенні зміщень і деформацій земної поверхні внаслідок впливу підземних гірничих виробок традиційно використовуються інженерно-геодезичні спостереження, а саме геометричне нівелювання, дані якого є найбільш точними та достовірними. У той же час до недоліків даного методу спостереження можна віднести високу трудомісткість та вартість таких робіт. Крім того, вказані прилади не завжди ефективні в умовах відкритих кар'єрів. Упродовж останнього десятиріччя застосування радіолокаційних систем (РЛС) стає більш поширеним у гірничодобувному виробництві не лише через високі технічні показники і здатність працювати незалежно від метеорологічних умов, але й завдяки можливості накопичувати результати, аналізувати їх і прогнозувати критичні деформації за кілька діб до їх виникнення.

На основі розглянутих основних напрямків використання РЛС, принципів та основних характеристик цих систем доповнено схему для застосування даної технології під час виконання ряду інженерно-геодезичних робіт (див. табл. 1).

Таблиця 1

Застосування РСА для розв'язання інженерно-геодезичних задач

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 (в залежності від типу ґрунтів) 30 мм	Точність визначається різними умовами і залежить від багатьох параметрів, може варіюватися від 5 до 25 мм.
Визначення кренів споруд (димарів, щогл, високих веж і т.п.)	0,0005 Н (Н висота споруди)	
При зніманні та обстеженні підземних комунікацій, що не мають виходів на поверхню землі, у тому числі спостереження за трасами трубопроводів	0,1 м (за умов розміщення підземних комунікацій на глибині 10 м)	TerraSAR-X, Sentinel 1A/1B, ASNARO-2, Kompsat-5
Виявлення геодинамічних полігонів	мм/ рік	TerraSAR-X, Sentinel 1A/1B, ASNARO-2, Kompsat-5, COSMO-SkyMed-1-4

Обґрунтовано основні переваги радіолокаційних систем над іншими видами знімання для забезпечення моніторингу за деформаціями земної поверхні та приповерхневих об'єктів, а саме: при зніманні використовуються хвилі набагато більшої довжини, ніж при зніманні в оптичному діапазоні; висока оглядовість, можливість миттєвого одержання актуальної та об'єктивної просторової інформації про великі території, можливість одержання інформації у важкодоступних місцях та високого рівня генералізації інформації.

У другому розділі дисертаційної роботи **«Комплексна методика опрацювання радіолокаційних даних для спостереження за деформаціями земної поверхні»** подано теоретичні основи формування радіолокаційного зображення, методи опрацювання радіолокаційних даних та способи зменшення впливу спотворень на цих знімках, практичну реалізацію радіолокаційних знімків для визначення величини осідання (підняття) земної поверхні. Розглянуто та проаналізовано алгоритм роботи методів опрацювання радіолокаційних знімків.

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 вкритих рослинністю територіях.

Запропоновано комплексну методику опрацювання радіолокаційних даних для моніторингу об'єктів техногенно-небезпечного характеру. За допомогою комплексної методики опрацювання радіолокаційних знімків можна отримати суміщену схему моніторингу динаміки процесів осідання ділянки дослідження.

У третьому розділі дисертаційної роботи **«Експериментальні дослідження деформацій земної поверхні та приповерхневих об'єктів методами радіолокаційної інтерферометрії»** представлено етапи опрацювання радіолокаційних знімків на території об'єктів дослідження: житлового масиву Хотінь, прилеглих територій та корпусів Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Застосовано комплексну методику на підставі методів PS та SBAS для оцінки стану території шахтного поля «Хотінь». Проведено порівняльний аналіз результатів даних радіолокаційної інтерферометрії з наземними геодезичними методами.

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

Калуш-Голинське родовище калійних солей розташоване у внутрішній зоні Передкарпатського передового прогину в Калуському районі Івано-Франківської області. Це з багатьох точок зору унікальний об'єкт, на якому поклади кам'яної солі експлуатувалися протягом багатьох століть. На цій території над відпрацьованими площами шахтних полів розташовано понад півтисячі житлових будинків та магістральний газопровід «Угерсько-Івано-Франківськ». Оглядова карта Калуш-Голинського родовища зображена на рис. 1.

Рудник «Калуш» експлуатувався більше ста років. На даний час рудник ліквідований шляхом часткового заповнення відпрацьованих порожнин соляними розсолами в кількості 2502 тис. м³, що дозволило тільки частково стабілізувати процес просідання земної поверхні.

Після прийнятих свого часу неправильних рішень щодо розробки родовища були спричинені численні провали земної поверхні над площею шахтних полів у місті Калуші, руйнування будинків і комунікацій.

Необхідність проведення спостережень на такому техногенно-небезпечному об'єкті очевидна, тому перші серії вимірів традиційною методикою високоточного

геометричного нівелювання проводилися на вказаному об'єкті з 1965 р. до 2010 р. і далі були припинені через відсутність фінансування.

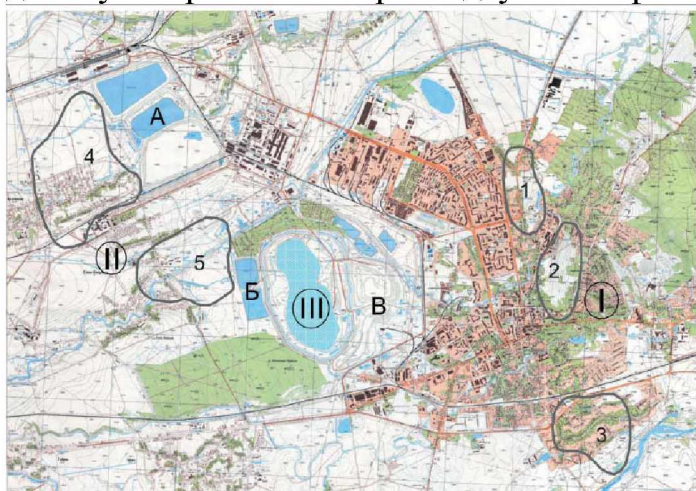
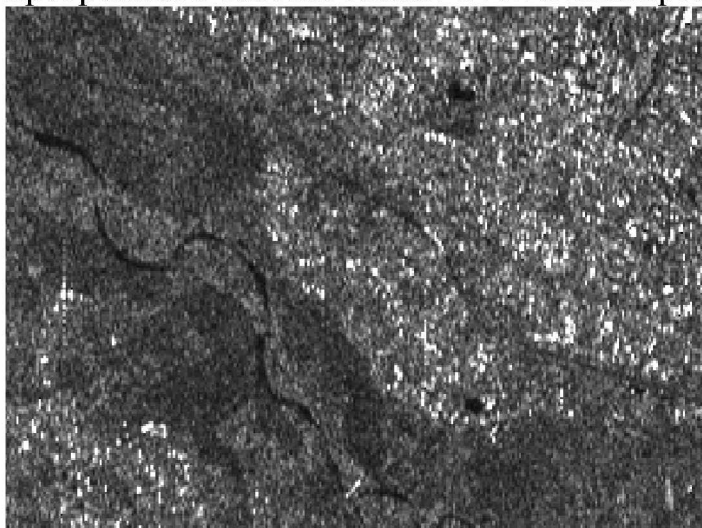


Рис. 1. Оглядова карта Калуш-Голінського родовища

*Рудники: I – “Калуш”,
II – “Нова Голінь”,
III – Домбровський кар’єр;
шахтні поля: 1 – Північне каїнітове,
2 – Центральне каїнітове,
3 – Хотінське сільвінітове, 4 – Східна
Голінь, 5 – Сивка-Калуська;
А – хвостосховища,
Б – акумулюючі ємності, В – відвали
кар’єру*

Для вивчення характеристик земної поверхні та приповерхневих об’єктів території шахтного поля «Хотінь» проведено спостереження за даними радіолокаційної інтерферометрії на період з 03.04.2016 р. до 31.10.2017 із космічного апарату (КА) Sentinel-1 (рис. 2). Виконано підбір серії знімків (34 знімки). Опрацювання радіолокаційних даних виконували за допомогою програмного забезпечення ENVI SARscape.

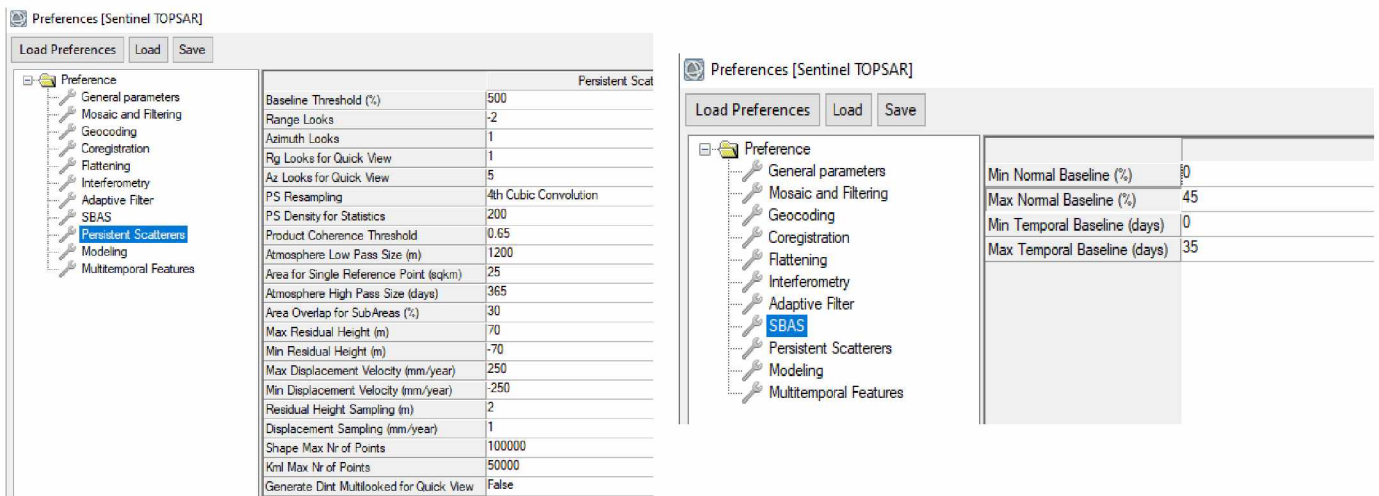


*Рис. 2. Радіолокаційний знімок з
КА Sentinel-1A за 2016.04.03 території
шахтного поля «Хотінь»*

Для методів PS та SBAS 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). Задані параметри визначають, які пари знімків відповідають критеріям для кожного методу, залежно від обмежень по вибору інтерферометричних пар для подальшого проведення автоматизованого опрацювання. Для методу SBAS кількість пар склала 82, для методу PS – 33.

Першим кроком інтерферометричного опрацювання є точне просторове суміщення (корегістрація) основного й допоміжного радіолокаційних зображень інтерферометричної серії, що виконується в модулі SARscape в автоматичному режимі.

Наступним етапом було 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.



а

б

Рис. 3. Налаштування параметрів програмного забезпечення ENVI SARscape: а) для методу PS; б) для методу SBAS

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 (рис. 4) 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. 5).

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, після ряду перетворень результатом є отримання зображення когерентності (рис. 6).

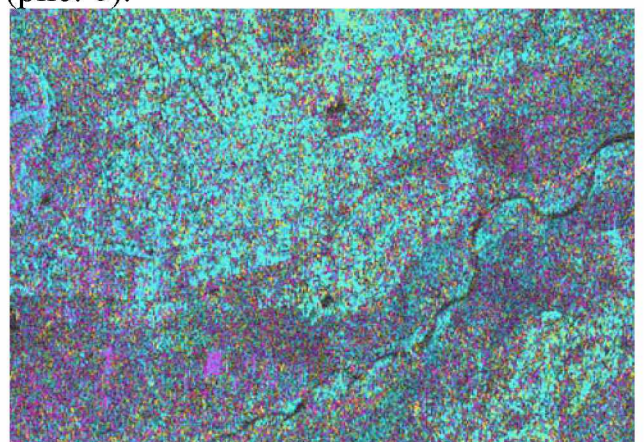


Рис. 4. Диференціальна інтерферограма за період 03.04.2016 – 15.04. 2016

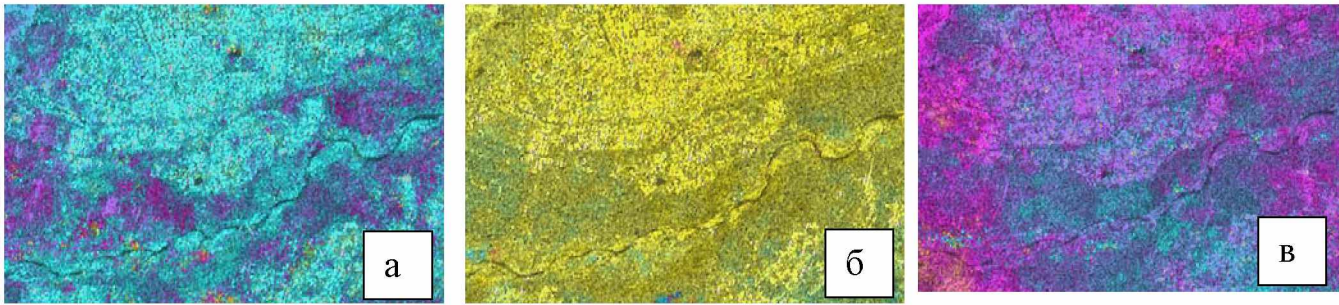


Рис. 5. Фільтрована диференціальна інтерферограма за допомогою фільтра Гольдштейна за період: а) 03.04.2016 – 15.04. 2016;
б) 10.04.2017 – 22.04.2017; в) 19.10.2017 – 31.10.2017

На рис. 6 добре видно, що активні осідання земної поверхні розташовані в центрі знімка й 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.

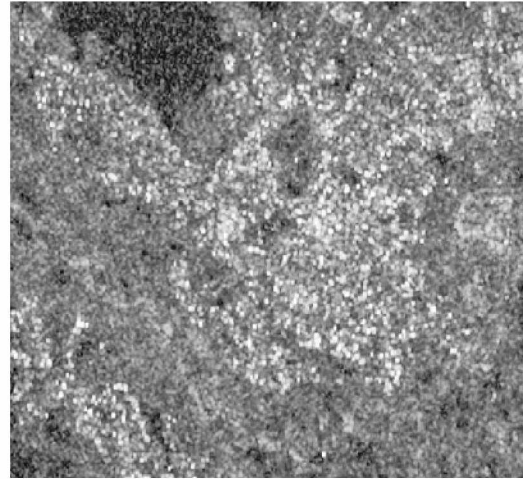


Рис. 6. Зображення когерентності за період 03.04.2016 – 15.04. 2016

Згодом результати були геокодовані й переведені у векторний файл з набором точок (відбивачів радіолокаційного сигналу), в атрибутах яких записані: зміщення на кожну дату знімання; середньорічна швидкість зсувів; сумарна величина зсувів; когерентність; висота над еліпсоїдом WGS-84 тощо. У цих точках алгоритм знайшов постійні стабільні відбивачі радіолокаційного сигналу (72 точки за методом SBAS – табл. 2б та 1557 точок за методом PS – табл. 2а).

Таблиця 2

Результати опрацювання даних радіолокаційної інтерферометрії методом:

- а) постійних відбивачів (PS) території шахтного поля «Хотінь»;
б) малих базисних ліній (SBAS) території шахтного поля «Хотінь»

а

OBJECTID	1	2	3	...	1557
Tot_D_mm_	227,2	207,8	-753,9		288,6
D_20160403	0,0	0,0	0,0		0,0
D_20160415	-0,2	-4,1	-6,1		-1,9
D_20160427	-5,9	11,1	-7,2		-1,7
D_20160509	-0,4	-3,7	-7,2		1,1
D_20160521	-2,6	-6,2	-10,8		-2,9
D_20160602	9,3	6,9	-14,2		3,5
...					
D_20171031	13,6	17,4	-34,7		13,1

б

OBJECTID	1	2	3	...	72
Tot_D_mm_	8,5	7,1	4,5		13,5
D_20160403	-381,0	-344,3	-251,9		-359,7
D_20160415	0,0	0,0	0,0		0,0
D_20160427	0,1	0,0	0,6		-0,7
D_20160509	-0,6	-0,6	-0,3		-1,9
D_20160521	-0,5	-0,3	0,0		-3,6
D_20160602	-1,5	-1,5	-1,5		-5,7
...					
D_20171031	-4,7	-3,0	-0,9		-1,8

Опрацювання масиву вимірювань за обома методами дозволило нанести на цифрову карту дані, що відображають середні швидкості осідання протягом року в місцях радіолокаційних вимірювань (рис. 7).

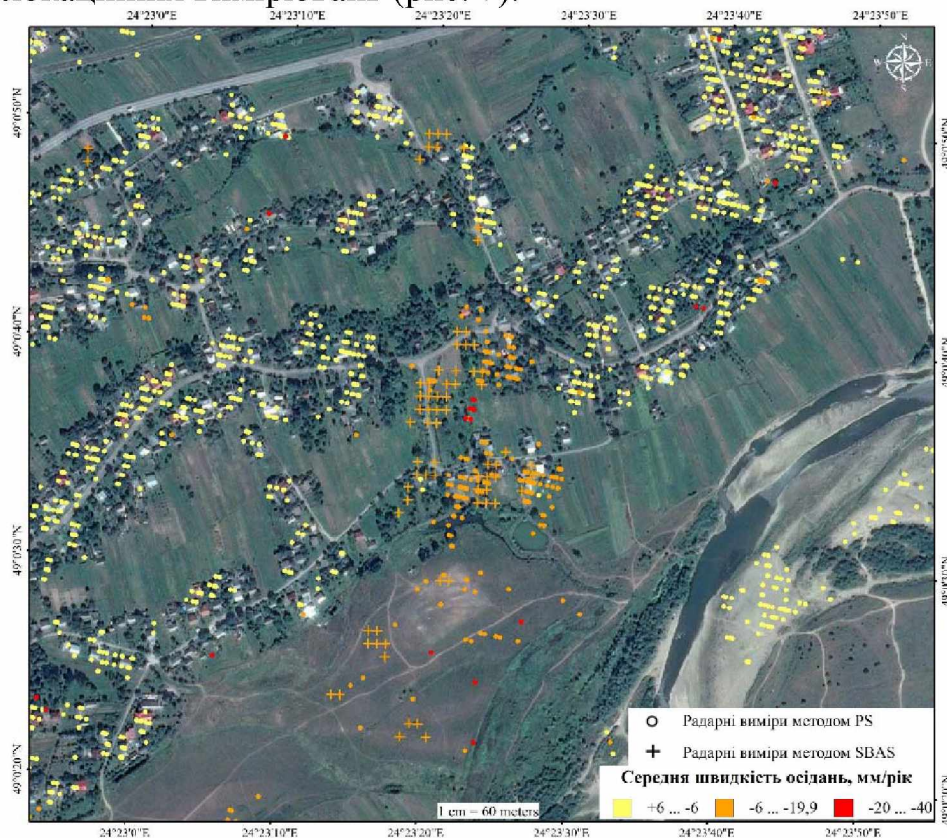


Рис. 7. Схема розміщення постійних стабільних відбивачів радіолокаційного сигналу на території шахтного поля «Хотінь»

З використанням методів PS, SBAS на досліджуваній території зафіксовано три зони (рис. 7): стабільну зону (радіолокаційні вимірювання позначені жовтим кольором; за методом PS визначено 1331 точку), активну зону осідань з швидкістю - 6 мм/рік ÷ 20мм/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).

На особливу увагу заслуговує частина шахтного поля родовища, через яку проходить магістральний газопровід високого тиску діаметром 250 мм. Для оцінки його експлуатаційної надійності в 2017 році проведений комплекс заходів, окремі з яких спрямовані на встановлення границь мульди осідання в районі розміщення газопроводу. Для цього у 2017 році проведена серія спостережень за осіданням реперів частини профільних ліній у районі газопроводу.

Виміри проводились за методикою спостережень, розробленою спеціально для даного об'єкта із повним дотриманням нормативних вимог.

Складено відомості сумарних і поточних осідань контрольованих (деформаційних) реперів на основі електронних таблиць MS Excel для об'єктів шахтного поля «Хотінь». Матеріали спостережень урівнювали параметричним методом, і виконувалась оцінка точності вимірів із використанням спеціально

розробленого програмного комплексу, що базується на вирішенні оптимізаційної задачі нелінійного програмування. Виконано математично статистичне опрацювання з метою прогнозу динаміки процесів, що контролюються методами тренд-аналізу.

За результатами нівелювання та опрацювання відомостей висот ґрунтових реперів за період від початку їх спостережень з 1957 по 2018 років знайдено найстабільніші реperi профільних ліній, висоти яких прийняті незмінними. Ці реperi послужили вихідними для підрахунку висот та осідань усіх інших реперів профільних ліній.

За результатами як останніх чотирьох серій спостережень, так і за весь період спостережень було створено графік осідань земної поверхні (рис. 8). На рис. 8 зображено графік осідання профільної лінії III спостережної станції «Хотинське поле», яке наглядно демонструє динаміку осідання земної поверхні, що в епіцентрі досягає величин до 2500 мм.

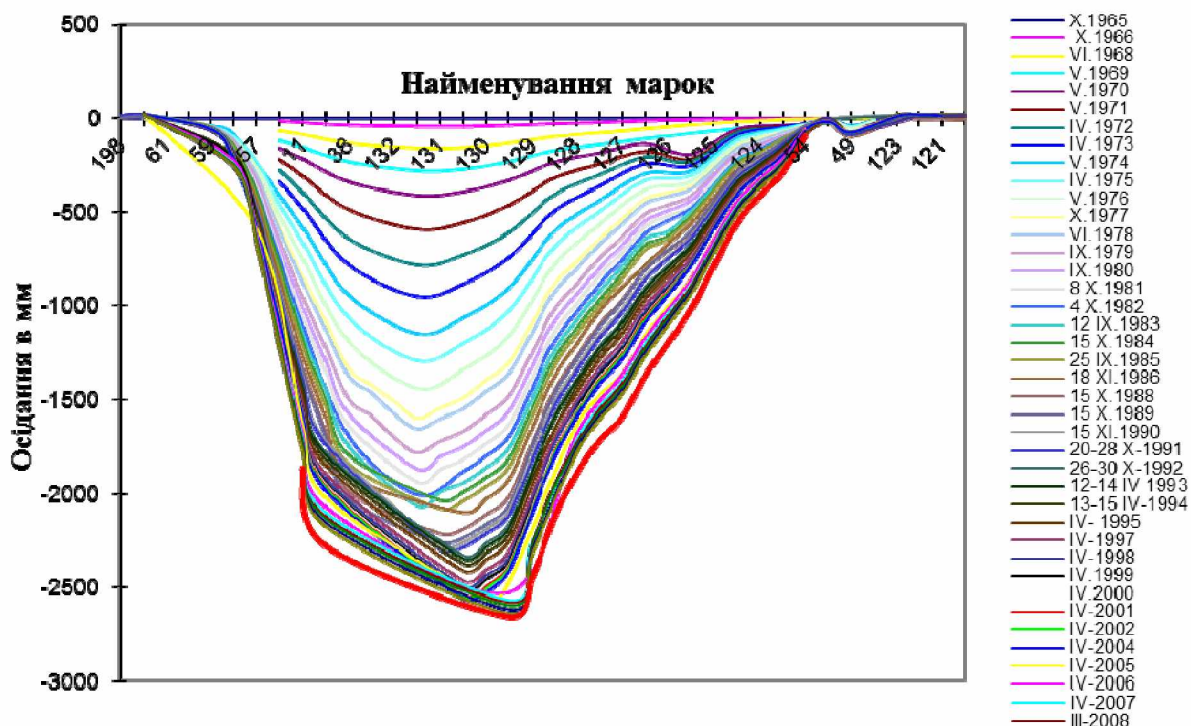


Рис. 8. Графік осідання профільної лінії III (Рп 198 - Рп 120) спостережної станції «Хотинське поле» за результатами вимірів 1965-2017 рр.

Отримані результати вимірювань з використанням даних радіолокаційної інтерферометрії та високоточного геометричного нівелювання зон, у яких спостерігають осідання, збігаються (рис. 9). Таким чином Рп 219, Рп 27, Рп 115, Рп 28, Рп 116, Рп 128, Рп 129, Рп 164, Рп 165, Рп 166 знаходяться в зоні осідань з 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). У той же час на пунктах Рп 73, Рп 11, Рп 159, Рп 160, розташованих в стабільній зоні (рис. 9), обчислена за результатами геометричного нівелювання швидкість осідання становить від -8,9 мм/рік до -11,8 мм/рік.

На основі отриманих результатів геодезичних та супутникових спостережень території інтересу можна стверджувати, що осідання земної поверхні, спричинене техногенним впливом виробок рудника «Хотинь», яке спостерігалось з 1977 року,

існує й існуватиме надалі, хоча з меншими швидкостями. Тому є необхідність організації на постійній основі комплексної моніторингової системи спостережень для попередження техногенної катастрофи.

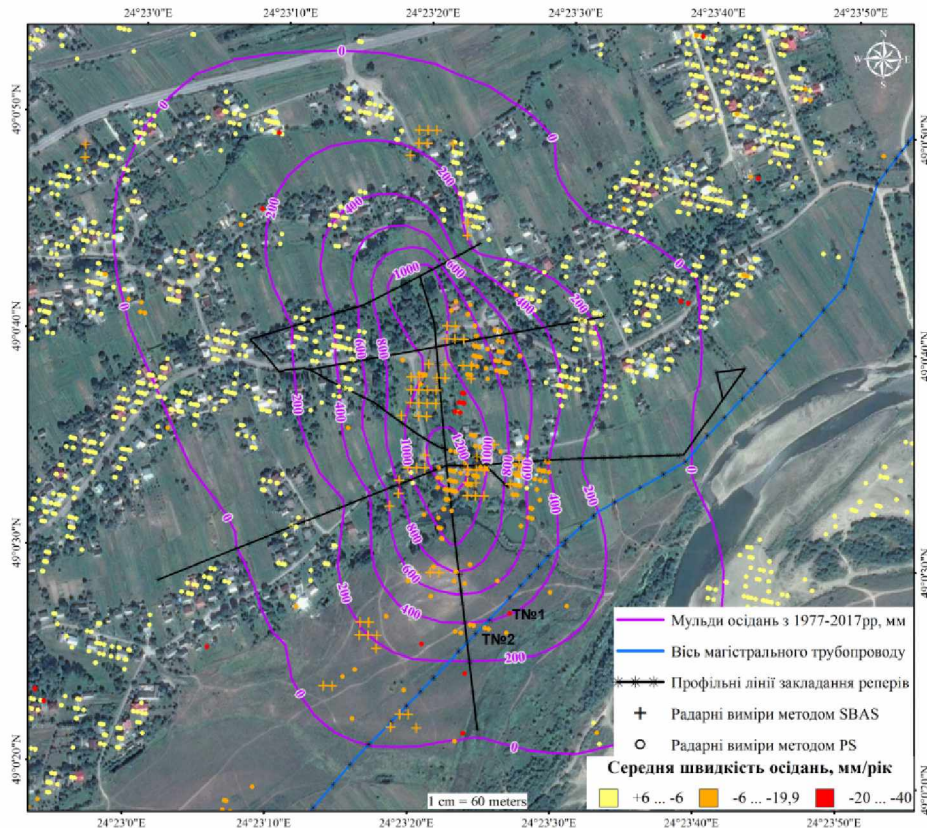


Рис. 9. Суміщена схема отриманих результатів моніторингу динаміки процесів осідання ділянки дослідження

Використання технології радіолокаційної інтерферометрії для моніторингу території дозволяє визначити небезпечні ділянки, у 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, при цьому мінімізувати затрати часу і коштів, а також забезпечує можливість швидкого збору картографічної інформації.

Аналіз оцінювання надійності будівель за даними радіолокаційної інтерферометрії на прикладі корпусу № 5 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Для оцінювання точності визначення деформацій будівлі обрано корпус № 5 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ), якому понад 50 років (рис. 10). З практики відомо, що найбільші осідання споруд відбуваються в період перших п'яти років від здачі в експлуатацію. Отже можна стверджувати, що обрана для досліджень будівля є стійкою та надійною. Розрахунок зміщень проводився з використанням інтерферометричного опрацювання масиву даних з 72 радіолокаційних знімків з КА Sentinel-1 на територію ІФНТУНГ за період з 01.04.2019 р. до 22.10.2020.

Методика визначення осідань споруд, яка використана в роботі, заснована на спільному виявленні постійних об'єктів (відбивачів) на великій серії знімків (метод – Persistent Scatterer). Пари знімків вибираються програмою у ENVI SARscape автоматично з поданої серії знімків на основі заданих параметрів перед початком розрахунків (рис. 11).



Рис. 10. Зона досліджень – територія ІФНТУНГ

Load Preferences		Load	Save
Preference			
Persistent Scatterers			
General parameters	Baseline Threshold (%)	500	
Mosaic and Filtering	Flange Looks	-2	
Geocoding	Azimuth Looks	1	
Coregistration	Rig Looks for Quick View	1	
Flattening	Az Looks for Quick View	5	
Interferometry	PS Resampling	4th Cubic Convolution	
Adaptive Filter	PS Density for Statistics	200	
SBAS	Product Coherence Threshold	0.75	
Persistent Scatterers	Atmosphere Low Pass Size (m)	1200	
Modeling	Area for Single Reference Point (sqkm)	25	
Multitemporal Features	Area for High Pass Size (days)	365	
	Area Overlap for SubAreas (%)	30	
	Max Residual Height (m)	70	
	Min Residual Height (m)	-70	
	Max Displacement Velocity (mm/year)	250	
	Min Displacement Velocity (mm/year)	-250	
	Residual Height Sampling (m)	2	
	Displacement Sampling (mm/year)	1	
	Shape Max Nr of Points	100000	
	Kml Max Nr of Points	50000	
	Generate Dirt Multilooked for Quick View	False	

Рис. 11. 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.

Диференціальні інтерферограми за окремо вибрані дати подані нижче на рис. 12.

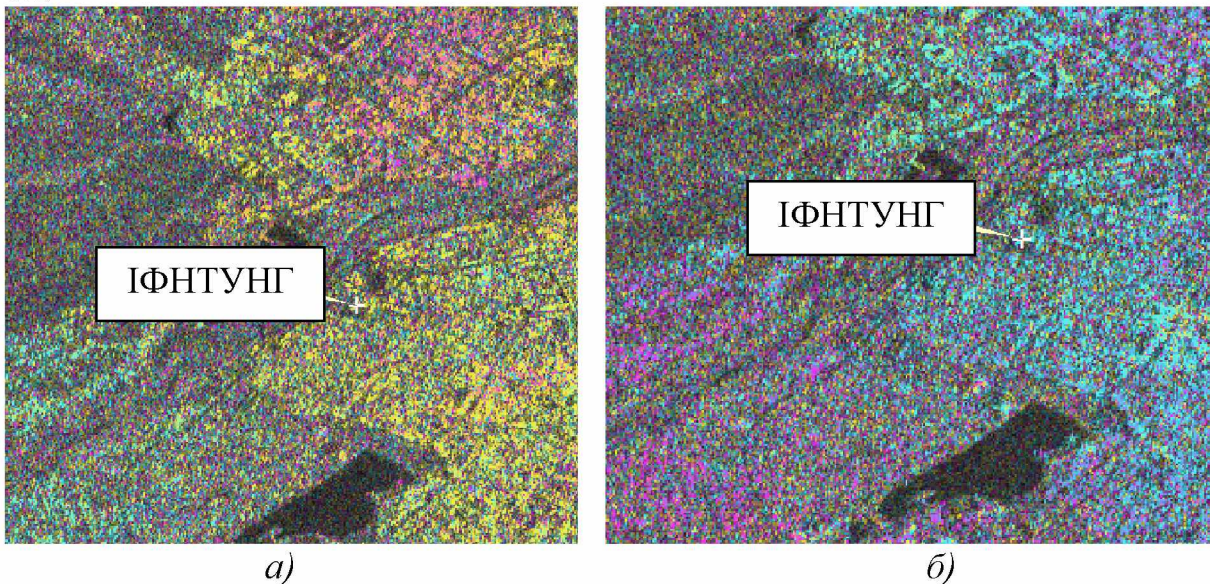


Рис. 12. Диференціальна інтерферограма за період: а) 01.04.2019 – 09.11.2019; б) 06.07.2019 – 09.11.2019

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 рис. 13 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.

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 файл, що містить точки, які характеризують динаміку деформацій споруди.

На рис. 14 представлено розміщення постійних стабільних відбивачів радіолокаційного сигналу на корпусі ІФНТУНГ. У цих точках алгоритм знаходив постійні стабільні відбивачі радіолокаційного сигналу, які є основними елементами в 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 в межах від -4 до +4 мм/рік (табл. 3).

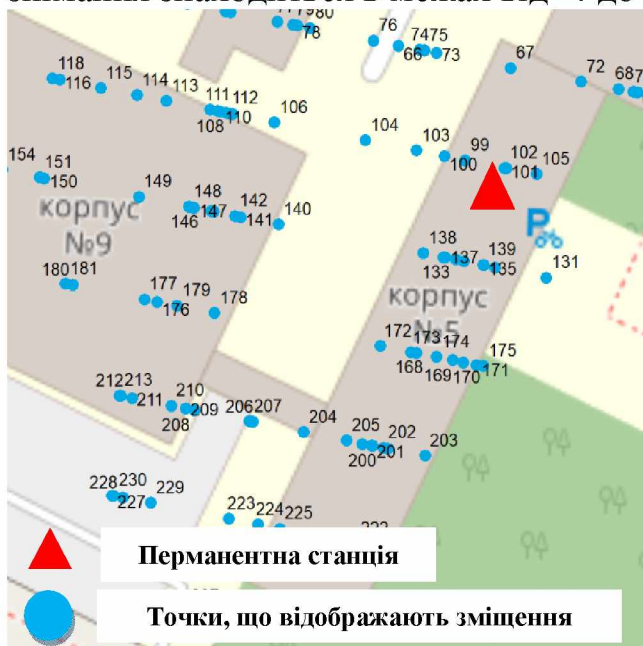


Рис. 14. Розміщення постійних стабільних відбивачів радіолокаційного сигналу на будівлі (корпус № 5 ІФНТУНГ)



Рис. 13. Розрахований файл когерентності

Таблиця 3

Середня швидкість вертикальних зміщень корпусу № 5 ІФНТУНГ

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 постійної станції FRKV (табл. 4), яка входить до мережі постійних станцій System Solution.

Таблиця 4

Дані постійної станції FRKV

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

Виміри постійної станції FRKV отримано в період з 26.03.2020 до 10.10.2020 в системі координат WGS-84. За даними табл. 4 графічно представлено на рис. 15 зміну висоти постійної станції відповідно до дати спостереження.

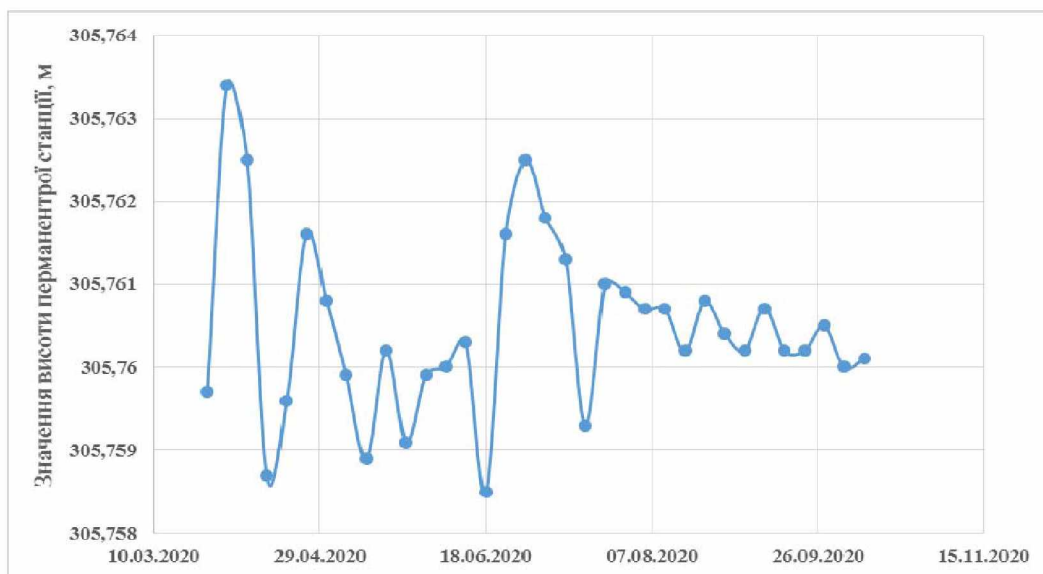


Рис. 15. Графік зміни висоти постійної станції FRKV

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. 15).

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

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

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 нівелювання 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 й порівняльного аналізу даних радіолокаційної інтерферометрії з даними наземних геодезичних методів вказують на те, що дані радіолокаційної інтерферометрії дозволяють виділяти активні ділянки з нетиповими деформаціями.

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-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 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")

Стаття в науковому фаховому виданні України

3. 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

4. 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

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. **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.

9. 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)

АНОТАЦІЯ

Дорош Л. І. Моніторинг техногенно-небезпечних об'єктів засобами радіолокаційної інтерферометрії. – На правах рукопису.

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

Дисертаційна робота полягає в обґрунтуванні необхідності проведення моніторингу вертикальних зміщень на техногенно-небезпечних об'єктах та об'єктах інфраструктури із залученням новітньої технології радіолокаційної інтерферометрії. У роботі подано світовий досвід застосування радіолокаційних даних в інженерно-геодезичній галузі. Опрацьовано та доповнено схему застосування радіолокаційних систем для вирішення інженерно-геодезичних завдань. Подано теоретичні основи формування радіолокаційних знімків. Висвітлено основні принципи функціонування радіолокаційних систем. 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. Сформовано відповідні висновки щодо переваг та недоліків застосування методів опрацювання радіолокаційних даних. Запропоновано комплексну методику опрацювання радіолокаційних даних для моніторингу об'єктів техногенно-небезпечного характеру. Проведено порівняльний аналіз застосування методів постійних відбивачів (PS) та малих базисних ліній (SBAS) для опрацювання радіолокаційних знімків. Досліджено точність радіолокаційних вимірювань в залежності від типу підстильної поверхні знімання. Виконано порівняльний аналіз даних радіолокаційної інтерферометрії з даними наземних геодезичних методів.

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

АННОТАЦИЯ

Дорош Л. И. Мониторинг техногенно-опасных объектов средствами радиолокационной интерферометрии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 – геодезия, фотограмметрия и картография. Национальный университет «Львовская политехника». Львов. 2021.

Диссертационная работа состоит в обосновании необходимости проведения мониторинга вертикальных смещений на техногенно-опасных объектах и объектах инфраструктуры с привлечением новейшей технологии радиолокационной интерферометрии. В работе представлен мировой опыт применения радиолокационных данных в инженерно-геодезической отрасли. Обработано и дополнено схему применения радиолокационных систем для решения инженерно-геодезических задач. Представлены теоретические основы формирования радиолокационных снимков. Освещены основные принципы функционирования радиолокационных систем. Проанализированы источники искажений радиолокационных снимков, причины их возникновения и пути уменьшения их

влияния на результаты исследований. Рассмотрены основные этапы обработки радиолокационных снимков и принятые методы для их реализации. Сформированы соответствующие выводы относительно преимуществ и недостатков применения методов обработки радиолокационных данных. Предложена комплексная методика обработки радиолокационных данных для мониторинга объектов техногенно-опасного характера. Проведен сравнительный анализ применения методов постоянных отражателей (PS) и малых базисных линий (SBAS) для обработки радиолокационных снимков. Исследована точность радиолокационных измерений в зависимости от типа подстилающей поверхности съемки. Выполнен сравнительный анализ данных радиолокационной интерферометрии данным наземных геодезических методов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радиолокационная интерферометрия, деформации земной поверхности, линейные зависимости, методы PS и SBAS, статистический анализ, техногенно-опасные объекты.

ANNOTATION

Dorosh LI Monitoring of technogenic-dangerous objects by means of radar interferometry. – On the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.24.01 Geodesy, photogrammetry and cartography. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021

The given research paper substantiates the necessity of monitoring the vertical displacements at technogenically dangerous objects and infrastructure facilities. It gives an overview over the available world experience of using the radar data in cartographic and engineering-geodetic branches from scientific, technical and regulatory literature. It includes the analysis of methods for measuring the deformations of the Earth's surface and near-surface objects.

In order to solve the engineering-geodetic tasks, a scheme of applying the radar systems was worked out and supplemented.

The reasonability of using cosmic information was established to monitor 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 main objectives of research, goals and means of their implementation have been formulated.

The research paper provides the theoretical bases of radar imaging. It highlights the basic principles of radar systems functioning and 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 were studied, the methods for their implementation were adopted. The relevant conclusions were made concerning the advantages and disadvantages of using the methods of radar data processing. The comparative analysis was performed with regard to applying the methods of permanent reflecting shields (PS) and small baselines (SBAS) for radar image processing.

It is proposed to use the Goldstein filter algorithm to obtain corrections of the phase component and reduce interferometric processing. After filtering phase noise by Goldstein's algorithm, the size of noise areas decreases and noise correlation radii increase.

The research work offers a complex range of methods for radar data processing to monitor the technogenically dangerous objects. With the help of this method of radar image processing, active zones of vertical displacements of the earth's surface were identified, the average annual speed of which is from +6 mm / year to -40 mm / year.

A number of studies have been conducted to confirm the possibility of using the data of radar imaging. The research defined 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 deformations of the Earth's surface on the mine field "Khotin", Ivano-Frankivsk oblast, Ukraine, were monitored by both surface method (high-precision geometric leveling) and spacial method (radar interferometry). The research paper includes the data of total and current subsidences of controlled (deformational) survey marks on basis of electronic tables *MS Excel* for the objects of mine field "Khotin". The mathematical-statistic processing was fulfilled to predict the dynamics of processes controlled by the trend-analysis methods.

The graphs of the Earth's surface subsidences were created based on both the results of both recent four series of observations and during the entire period of observations. Referring to the analysis of geodetic survey of previous years and the series of measurements in 2017, certain zones with abnormal values of subsidence were singled out and subsidence troughs were constructed.

The accuracy of radar measurements was defined depending on the type of possible surface imaging. The accuracy of measuring vertical displacements reaches the order of 4-6 mm for built-up areas, and in the presence of vegetation in the study area, the accuracy of subsidence measurements is 6-20 mm.

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.

The results of experimental studies using the proposed comprehensive methodology and comparative analysis of radar interferometry data with data from terrestrial geodetic methods indicate that the radar interferometry data allow to identify active areas with atypical deformations.

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 dangerous objects.

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.*

Підписано до друку 25.11.2021 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,89.
Тираж 100 прим. Зам. 211420.

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів
Регістраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.