

Максим ПАКШИН<sup>1</sup>, Іван ЛЯСКА<sup>1а</sup>, Наталія КАБЛАК<sup>2</sup>, Галина ЯРЕМКО<sup>3</sup><sup>1</sup> Центр прийому та обробки спеціальної інформації та управління навігаційним полем, Залісці, Хмельницька область, Україна, <sup>1а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8766-2098><sup>2</sup> Ужгородський національний університет, пл. Народна, 3, Ужгород, 88000, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-2257-2264><sup>3</sup> Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-2907-931X><https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.041>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК РУДНИКІВ ДП “СОЛОТВИНСЬКИЙ СОЛЕРУДНИК” НА ЗЕМНУ ПОВЕРХНЮ, БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВОГО РАДАРНОГО МОНІТОРИНГУ

Ці дослідження спрямовані на проведення геодинамічного аудиту ДП “Солотвинський солерудник” та прилеглої території з можливістю виявлення зон із осіданням або підняттям земної поверхні, які плавно сповільнюються, прискорюються або розвиваються із постійною швидкістю. Для моніторингу зони інтересу використано сучасні технології супутникової радарної інтерферометрії. Достовірність отриманих результатів підтверджено вимірюваннями вертикальних зміщень земної поверхні та окремих об’єктів методом геометричного нівелювання. За результатами спостережень величин зсувів земної поверхні та окремих об’єктів космічними (радарної інтерферометрії) та наземними (геометричним нівелюванням) методами зафіксовано високу кореляцію даних і підтверджено наявність зон активних осідань на території гірничої виробки. До найнебезпечніших екзогенних геологічних процесів (ЕГП) за величиною збитків, завданих господарським об’єктам, належать: зсуви, карст, підтоплення, абразія, селі тощо. Поширення та інтенсивність прояву ЕГП визначаються особливостями геологічної та геоморфологічної будови території, її тектонічним, неотектонічним та сейсмічним режимами, а також гідрологічними, кліматичними, гідрогеологічними палео- та сучасними умовами. Солотвинський солерудник – одне із найстаріших підприємств Закарпаття. Родовище експлуатується з часів Римської імперії. У 1360 р. на місці рудника було засновано поселення солекопів – Солотвино, яке згодом стало центром солевидобування і королівською монополією. На родовищі пройдено дев’ять шахт. У 1995–1996 та 2001 роках після паводків почалося затоплення шахт. У 2005 р. у Солотвино активізувалися зсувні та карстові провалля, що призвело до пошкодження житлових будинків, доріг та інфраструктури. Повністю затоплені дві шахти, й нині на території солерудника і на прилеглих територіях спостерігаються небезпечні природні та техногенні процеси. Це переважно соляний карст – як підземний, так і поверхневий, провали територій у місцях розташування шахт, а також зсувні процеси. Тому мета цих досліджень – проведення геодинамічного аудиту ДП “Солотвинський солерудник” та прилеглої території з можливістю виявлення зон із осіданням або підняттям земної поверхні, які плавно сповільнюються, прискорюються або розвиваються із постійною швидкістю. Для досліджень та виконання геодинамічного аудиту ДП “Солотвинський солерудник” та прилеглої території використано дані радіолокаційної інтерферометрії від 30.04.2016 р. до 25.06.2018 р. У роботі використано сучасні методи інтерферометричної обробки супутникових радіолокаційних даних: метод “PS” – метод постійних розсіювачів та метод SBAS – метод малих базових ліній. Методом геометричного нівелювання проведено вимірювання вертикальних зміщень в окремих місцях земної поверхні з метою верифікації інтерферометричних даних. Для моніторингу зони інтересу використано сучасні технології супутникової радарної інтерферометрії. За результатами спостережень величин зсувів земної поверхні та окремих об’єктів космічними (радарної інтерферометрії) та наземними (геометричним нівелюванням) методами зафіксовано високу кореляцію даних і підтверджено наявність зон активних осідань на території гірничої виробки.

**Ключові слова:** ДЗЗ; радарна інтерферометрія; вертикальні зміщення земної поверхні; методи PS та SBAS; геометричне нівелювання; моніторинг.

### Вступ

Проблема оцінювання змін земної поверхні актуалізується в умовах посиленого розвитку урбанізованих територій. Особливо важливого значення набуває моніторинг вертикальних зсувів земної поверхні для територій з видобуванням

корисних копалин. Геодезичні методи (*метод геометричного нівелювання, GNSS вимірювання тощо*) спостережень за деформаціями земної поверхні сьогодні є трудомісткими, а в деяких випадках небезпечними. Такі обставини не дають змоги застосувати їх повною мірою і, як правило, на всій зоні досліджень, навіть на невеликих

територіях. Альтернативою зазначеним методам є використання радіолокаційних космічних засобів і інтерферометричних методів опрацювання даних. Перевагами такої технології є: спостереження за деформаціями земної поверхні на великих територіях із мінімальним витратами часу і коштів, оперативність, швидке збирання картографічної інформації і, що дуже важливо, можливість отримати виміри, виконані у минулому, скориставшись архівними знімками. Такий спосіб є повністю безпечним, оскільки використовує тільки дані супутникового радарного знімання і не потребує польових робіт. Масове застосування супутникових радарних даних в останні шість років стало можливим завдяки появі програми “Copernicus” Європейського космічного агентства (ESA) і даних KA Sentinel-1 (a, b), які є у відкритому доступі. Скориставшись доступністю радіолокаційного знімання KA Sentinel-1a і Sentinel-1b, більшість дослідників тепер можуть кількісно оцінювати рух Землі як у вертикальному, так і в східно-західному напрямках, комбінуючи дані радарного сканування, отримані під час польоту супутників з півдня на північ і з півночі на південь. Використання радіохвиль дає змогу радарним системам вести моніторинг, наприклад, деформацій земної поверхні, незважаючи на хмарність та час доби. Така технологія, інтегрована в класичну систему маркшейдерсько-геодезичних спостережень, дасть можливість регулярно отримувати моделі вертикальних зсувів земної поверхні. Інформація, одержана у результаті опрацювання даних радіолокаційного знімання, стане основою для організації детальнішого дослідження території та прогнозування геодинамічної ситуації. Зазначений комплекс заходів покликаний підвищити рівень промислової безпеки під час ведення гірських робіт на експлуатованих об’єктах надрокористування.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми**

Технічна спроможність SAR продемонстрована раніше, ця технологія набула широкої популярності на початку 90-х завдяки успішним спостереженням за деформаціями ґрунту, спричиненими землетрусом Ландерса в Каліфорнії [Berardino, et al., 2002] і рухом льодового покриву в регіоні Антарктиди [Gabriel, et al., 1989]. Радіолокаційне знімання – 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*) [Gabriel, et al., 1989]. Зворотний сигнал містить інформацію про фізичні та геометричні властивості поверхні [Giff, et al., 2008]. У країнах ЄС, особливо в Італії, організовано національний моніторинг зсувів і осідань на вугільних шахтах за

даними супутникових радарів COSMO-SkyMed (CSM), TerraSAR-X (TSX), TanDEM-X (TDX), Sentinel-1 (a, b) на основі технології постійних інтерферометричних відбивачів (PS). Норвезька геологічна служба (NGU), Норвезьке управління водних ресурсів і енергетики (NVE) і Норвезький космічний центр запустили “InSAR Norway”, яка є першим загальнонаціональним і безкоштовним онлайн-картографічним сервісом для даних InSAR. Служба зробила дані InSAR доступними для всієї Норвегії. Науково-дослідний інститут NORUT очолював створення системи моніторингу земної поверхні та об’єктів із використанням супутникових даних KA Sentinel-1 (a, b). Радіолокаційна інтерферометрія за даними Sentinel-1 дає змогу виконувати просторово-часові спостереження із високою роздільною здатністю (наприклад, щільна мережа точок вимірювання) на великих територіях, та відстежувати і відображати динаміку поточних процесів завдяки частому повторенню спостережень супутника (динаміку зміни деформацій) [Strozzi, et al., 2013; Elliott, et al., 2016; Li, et al., 2016].

**Постановка проблеми.** ДП “Солотвинський солерудник”, що адміністративно розташоване у Тячівському районі Закарпатської області, містить однойменне родовище кам’яної солі, яке є одним із найбільших родовищ в Україні. З середини 90-х років минулого століття на його рудниках, які функціонували, почали виникати проблеми, що призвели до небезпечної техногенної екологічної ситуації. У 2007 р. ДП “Солотвинський солерудник” припинилося видобування кам’яної солі, було також закрито підземне відділення Української алергологічної лікарні. Ситуація погіршувалася і з 2010 р. проблема набула державного значення (*експертний висновок МНС України від 09.12.2010 р. № 02-17292/165*). У 2013 р. Солотвино оголошено зоною надзвичайної ситуації державного значення.

Результати досліджень [Szűcs, et al., 2021] показують, що, незважаючи на величезні зусилля з управління ризиками, територія ризиків продовжує розширюватися із максимальною швидкістю 5 см/рік. Спостереження за деформаціями протягом 4,5 року не показали уповільнення процесів. Ситуація залишається дуже складною, продовжується просідання ґрунтів, утворюються нові провали, які загрожують безпеці людей. Усі ці процеси свідчать про те, що ситуація в Солотвино залишається нестабільною і потребує, передусім, об’єктивної геодинамічної оцінки і, надалі, постійного і надійного моніторингу деформації земної поверхні. Зазначений комплекс заходів допоможе в ухваленні управлінських рішень щодо стабілізації території та її безпечного використання надалі як туристичної зони відпочинку, а з часом, можливо, і як підприємства із видобування солі.

### Матеріали та методи

Інтерферометрія – один із методів радіолокаційного знімання (РЛЗ), що фіксує амплітуду і фазу відбитого сигналу. Одне зображення, отримане за допомогою радара з синтезованою апертурою (РСА), здебільшого не має практичного значення, тоді як два знімки (*інтерференційна пара*), отримані під різними кутами, можуть використовуватись для побудови цифрової моделі рельєфу [Gabriel, et al., 1989].

Щодо РЛЗ орієнтація базової лінії уздовж або перпендикулярно до напрямку руху радіолокатора із синтезованою апертурою (РСА) визначає тип інтерферометричних вимірювань, тому є поздовжня і поперечна інтерферометрія. Технологія поздовжньої інтерферометрії основана на вимірюваннях, виконаних у площині, паралельній до руху носія РСА. У цьому випадку результати опрацювання сигналу отримують одночасно від двох антен, розташованих уздовж лінії руху радіолокатора. Такі вимірювання дають можливість виявляти рухомі об'єкти на тлі підстильної поверхні й вимірювати їхню швидкість. Для поперечної інтерферометрії дві або більше антен повинні бути розташовані в площині, перпендикулярній до напрямку руху носія РСА. Спільне опрацювання фазової інформації, одержуваної двома антенами одночасно або через проміжок часу, дає змогу відтворити рельєф підстильної поверхні або розрахувати зміщення (вертикальні та з півдня на північ і з півночі на південь) земної поверхні та об'єктів.

Інтерферометричне опрацювання комбінує комплексні зображення, зафіксовані антенами під

різними кутами спостереження або в різний час. За результатами порівняння двох знімків тієї самої ділянки місцевості отримують інтерферограму, що являє собою мережу кольорових смуг, ширина яких відповідає різниці фаз обох експозицій. Інтерферометрія є альтернативною традиційною стереофотографічною технологією для створення топографічних карт із високим просторовим розрізненням, незалежною від погодних умов і часу доби під час знімання [Fanti, et. al., 2013].

Кожну точку комплексного знімка можна описати в загальному вигляді функцією виду:

$$F(x, y) = I(x, y) * e^{i\varphi(x, y)}, \quad (1)$$

де  $I$  – інтенсивність сигналу, яка припадає на точку;  $\varphi$  – фаза точки;  $x, y$  – координати точки.

“Перемноження” знімків у кожній точці дає:

$$T(x, y) = F_1(x, y) * F_2^*(x, y) = I * e^{i\Delta\varphi(x, y)}$$

де  $I'$  – інтерферометрична інтенсивність точки;  $*$  – комплексне сполучення;  $\Delta\varphi(x, y)$  – інтерферометрична фаза.

Різниця фаз між двома точками на інтерференційній парі пропорційна до різниці ходу  $2(r_0 - r_1) = 2\Delta r$  (коефіцієнт 2 вказує на подвійне проходження шляху хвилями) і дорівнює  $4\Delta r\pi/\lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі.

На рис. 1 показано положення двох носіїв РСА ( $S_1$  і  $S_2$ ) і їхнє паралельне ( $B_r$ ) і нормальне ( $B_n$ ) зміщення щодо лінії спостереження, а також вказано розташування двох точок ділянки  $P_1$  і  $P_2$  і їхні зміщення – нормальне  $n_p$  і паралельне  $r_p$  щодо лінії спостереження.

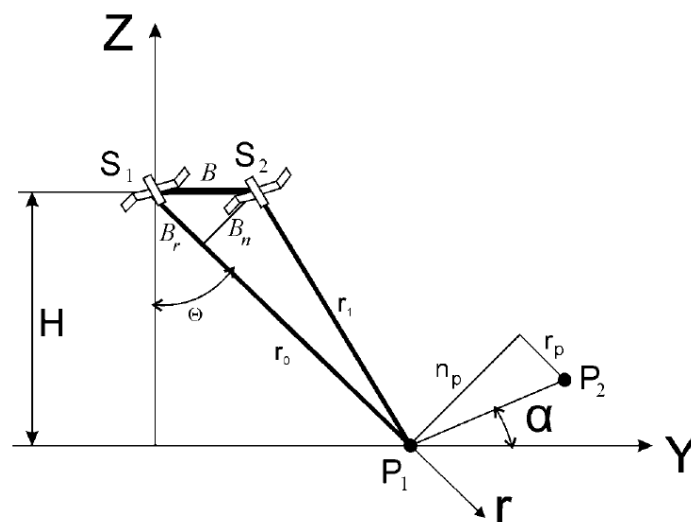


Рис. 1. Схема розташування РСА під час інтерферометричних вимірювань

Основним вважатимемо положення сенсора  $S_1$  із відповідною точкою  $P_1$  з віддаллю між ними  $r_0$ . У разі зміни положення РСА віддаль між ділянкою поверхні та датчиком зміниться на:

$$r = \sqrt{(r_0 + r_p - B_r)^2 + (n_p - B_n)^2}, \quad (2)$$

Якщо віддаль між двома антенами  $S_1$  і  $S_2$  мала порівняно з  $r_0$ , можна записати зміну інтерферометричної фази в наближеному вигляді:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta(\Delta r) = \frac{4\pi B_n n_p}{\lambda r \cap}, \quad (3)$$

Цей результат дає підстави для висновку про те, що якщо відомі відносно зміщення двох орбіт до лінії спостереження  $B_n$ , віддаль  $r_0$  і довжина хвилі, використана під час локації, тоді величина  $\Delta\varphi$  залежить тільки від  $n_p$ .

Отже, інтерференційне зображення фази є картою відносного піднесення ландшафту вздовж лінії спостереження. Після деяких перетворень рівняння (3) можна переписати у вигляді:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi B_n q}{\lambda r \cap \sin \theta} = 2\pi \frac{q}{q \cap}, \quad (4)$$

де  $q = \Delta z$  – відносне підвищення;

$$q = \frac{2B_n}{\lambda r \cap \sin \theta}.$$

Оскільки у радіолокаційних даних є деякі джерела похибок (*часова та геометрична декореляція, затримка атмосферного сигналу тощо*), існує низка методів диференціального інтерферометричного опрацювання часових рядів, які послаблюють вплив цих джерел похибок [Ferretti, et al., 2019]. Оскільки територія досліджуваного об'єкта забудована та вкрита рослинністю, було використано метод постійних розсіювачів (PS) та метод малих базових ліній (SBAS) [Berardino, et al., 2002], особливості яких викладено нижче (*технології багатопрохідної радарної інтерферометрії*).

Опрацювання методом PS, зазвичай, вважають надійнішим, оскільки він використовує 30 або більше знімків тієї самої території за різні дати, виконаних у тій самій геометрії знімання супутникового радіолокатора, тому точність визначення переміщення може досягати кількох міліметрів. Основне призначення технології постійних розсіювачів (PS) – застосування на забудованих територіях. Цей метод зосереджується на підмножині точок, які демонструють порівняно постійні властивості розсіювання у часі. Через домінування відбиття цих точкових розсіювачів у чарунці просторового розрізнення зображення

ефект геометричної декореляції також істотно зменшується. За допомогою рекомбінації повторно впорядкованих зображень SLC формуються інтерферограми. Для зменшення ефекту геометричної декореляції спочатку фільтрують інтерферограму по азимуту, щоб виключити доплерівський спектр, що не перекривається. Завдяки цьому зменшується складова цього шумового коефіцієнта у часовому ряді деформацій постійних розсіювачів (PS).

Відносно PS метод SBAS менш чутливий до кількості знімків, оскільки він використовує просторово розподілену когерентність замість того, щоб розглядати тільки окремі точки, як у PS. За допомогою невеликих базових ліній зменшується як геометричний, так і часовий декореляційний ефект. Через невеликі базові лінії та багатооглядність пікселів зображення, які часто застосовують, підхід SBAS особливо придатний для розподілених механізмів розсіювання, які трапляються у сільських регіонах із незасіяними територіями [Феоктистов, 2015].

Однак загалом варто зазначити, що чим більше знімків, тим краща якість отриманих результатів. Це пояснюється тим, що атмосферний компонент можна точніше оцінити та зменшити. Що стосується визначення функції зміщення точок земної поверхні, SBAS не обмежується лише лінійною; насправді, крім лінійної, підтримуються квадратичні та кубічні моделі.

### Результати досліджень

У статті викладено результати досліджень із адаптації відомих радіолокаційних методик виконання деформаційного моніторингу з використанням космічної радарної інтерферометрії до територій ліквідованих шахт ДП “Солотвинський солерудник” з урахуванням специфіки деформацій земної поверхні. Зону інтересу наведено на рис. 2.

Ми опрацювали дані супутникового радарного знімання КА Sentinel-1a, Sentinel-1b (*режим Interferometric Wide Swath, VV поляризація, інтерферометрична орбіта № 131*) території ДП “Солотвинський солерудник” із 30.04.2016 р. до 25.06.2018 р. із використанням ліцензійного програмного пакета ENVI і модуля SARscape. У табл. 1 наведено список використаних 64 радіолокаційних космічних знімків КА Sentinel-1 (a, b).

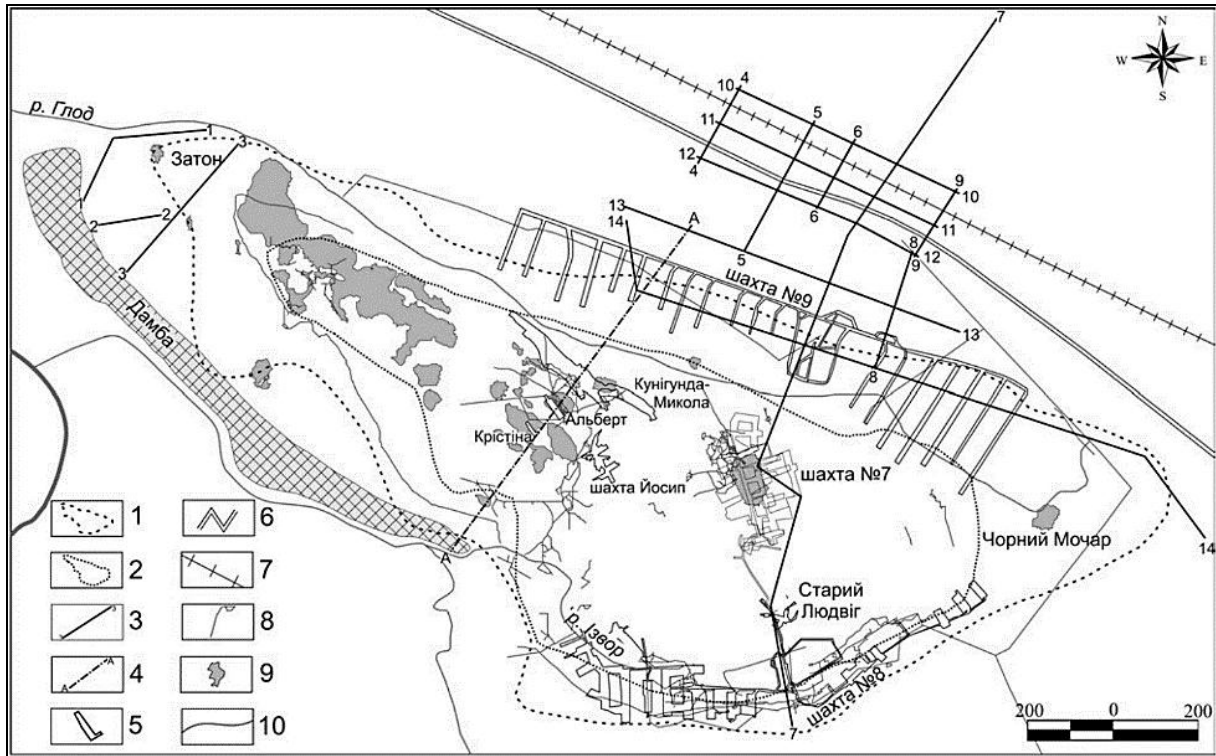


Рис. 2. Схема Солотвинського родовища кам'яної солі – зона досліджень

Таблиця 1

Використані в роботі знімки КА Sentinel-1(a, b)

| № з/п | Дата       | № з/п | Дата       | № з/п | Дата       | № з/п | Дата       |
|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|
| 1     | 30.04.2016 | 17    | 19.04.2017 | 33    | 24.07.2017 | 49    | 27.03.2018 |
| 2     | 12.05.2016 | 18    | 25.04.2017 | 34    | 30.07.2017 | 50    | 02.04.2018 |
| 3     | 24.05.2016 | 19    | 01.05.2017 | 35    | 05.08.2017 | 51    | 08.04.2018 |
| 4     | 05.06.2016 | 20    | 07.05.2017 | 36    | 11.08.2017 | 52    | 14.04.2018 |
| 5     | 29.06.2016 | 21    | 13.05.2017 | 37    | 17.08.2017 | 53    | 20.04.2018 |
| 6     | 11.07.2016 | 22    | 19.05.2017 | 38    | 23.08.2017 | 54    | 26.04.2018 |
| 7     | 23.07.2016 | 23    | 25.05.2017 | 39    | 29.08.2017 | 55    | 02.05.2018 |
| 8     | 04.08.2016 | 24    | 31.05.2017 | 40    | 04.09.2017 | 56    | 08.05.2018 |
| 9     | 16.08.2016 | 25    | 06.06.2017 | 41    | 10.09.2017 | 57    | 14.05.2018 |
| 10    | 28.08.2016 | 26    | 12.06.2017 | 42    | 16.09.2017 | 58    | 20.05.2018 |
| 11    | 09.09.2016 | 27    | 18.06.2017 | 43    | 22.09.2017 | 59    | 26.05.2018 |
| 12    | 21.09.2016 | 28    | 24.06.2017 | 44    | 28.09.2017 | 60    | 01.06.2018 |
| 13    | 03.10.2016 | 29    | 30.06.2017 | 45    | 10.10.2017 | 61    | 07.06.2018 |
| 14    | 15.10.2016 | 30    | 06.07.2017 | 46    | 16.10.2017 | 62    | 13.06.2018 |
| 15    | 27.10.2016 | 31    | 12.07.2017 | 47    | 22.10.2017 | 63    | 19.06.2018 |
| 16    | 07.04.2017 | 32    | 18.07.2017 | 48    | 28.10.2017 | 64    | 25.06.2018 |

У роботі застосовано технології багато-прохідної радарної інтерферометрії: інтерферометричний аналіз методом SBAS, що дає змогу будувати інтерферограми всієї ділянки, і точковий аналіз постійних відбивачів методом PS, результатами яких є карта історії вертикальних рухів земної поверхні та об'єктів. Як опорний рельєф

використана загальнодоступна цифрова модель рельєфу SRTM. Досягнуто такої точності інтерферометричних вимірів: стандартне відхилення (середньої швидкості вертикальних зміщень у радарному вимірі) методом PS не перевищує 2 мм/рік, а методом SBAS – не більше ніж 11 мм/рік.

Методом “PS” визначено загалом 2957 постійних відбивачів (*місць радарних вимірювань*) радарного сигналу (*висококогерентні об’єкти: будинки, споруди, автомобільні дороги та залізниці, кам’яні відвали, кар’єри, ділянки відкритого ґрунту тощо*). У роботі стабільними об’єктами ми вважали ті, швидкість вертикальних зміщень яких міститься в інтервалі (–8 ... +8 мм/рік). У 329 точках зафіксовано просідання, максимальна швидкість яких сягає –39 мм/рік. Методом “SBAS” визначено загалом 1130 постійних відбивачів радарного сигналу (*когерентні об’єкти: кам’яні відвали, кар’єри, ділянки місцевості без рослинності*), в яких максимальні просідання становили до –127 мм/рік.

За результатами інтерферометричного оброблення ретроспективних радарних даних майже усієї зони досліджень отримано стійкі деформаційні характеристики, а саме часові ряди вертикальних зсувів земної поверхні, будинків і споруд, окремо розраховано середні швидкості вертикальних зміщень (*мм/рік*) у місцях радарних вимірювань.

Для зручності подання та аналізу даних деформації земної поверхні кінцеві інформаційні продукти подано у векторних форматах “SHP” для ГІС систем та “KMZ” для програмного забезпечення “Google Earth”. Атрибутивні дані містять інформацію про кожний окремий радарний вимір (*координати, когерентність, середня швидкість вертикального зміщення (мм/рік), стандартне відхилення, динаміку зміщень на кожну дату знімання у міліметрах відносно першої дати знімання, яка є точкою відліку тощо*).

Дешифрування та інтерпретацію даних багатопрхідних супутникових радарних знімів виконано у геоінформаційній системі (ГІС) ArcGis. Створено тематичну карту у растровому форматі (рис. 3). Радарні виміри (*векторні шари*) на карті відображено за атрибутом середньої швидкості вертикальних зміщень (*мм/рік*). Точки відображають метод PS, хрестики – метод SBAS. Їх приведено до кольорової шкали легенди карти (за атрибутом – *середньою швидкістю вертикальних зміщень – автори проєкту створили інтервали, які позначено кольором*) і розташовано на оптичному знімку з метровим просторовим розрізненням (*не актуальним за часом*). Окремо проаналізовано динаміку вертикальних зміщень у

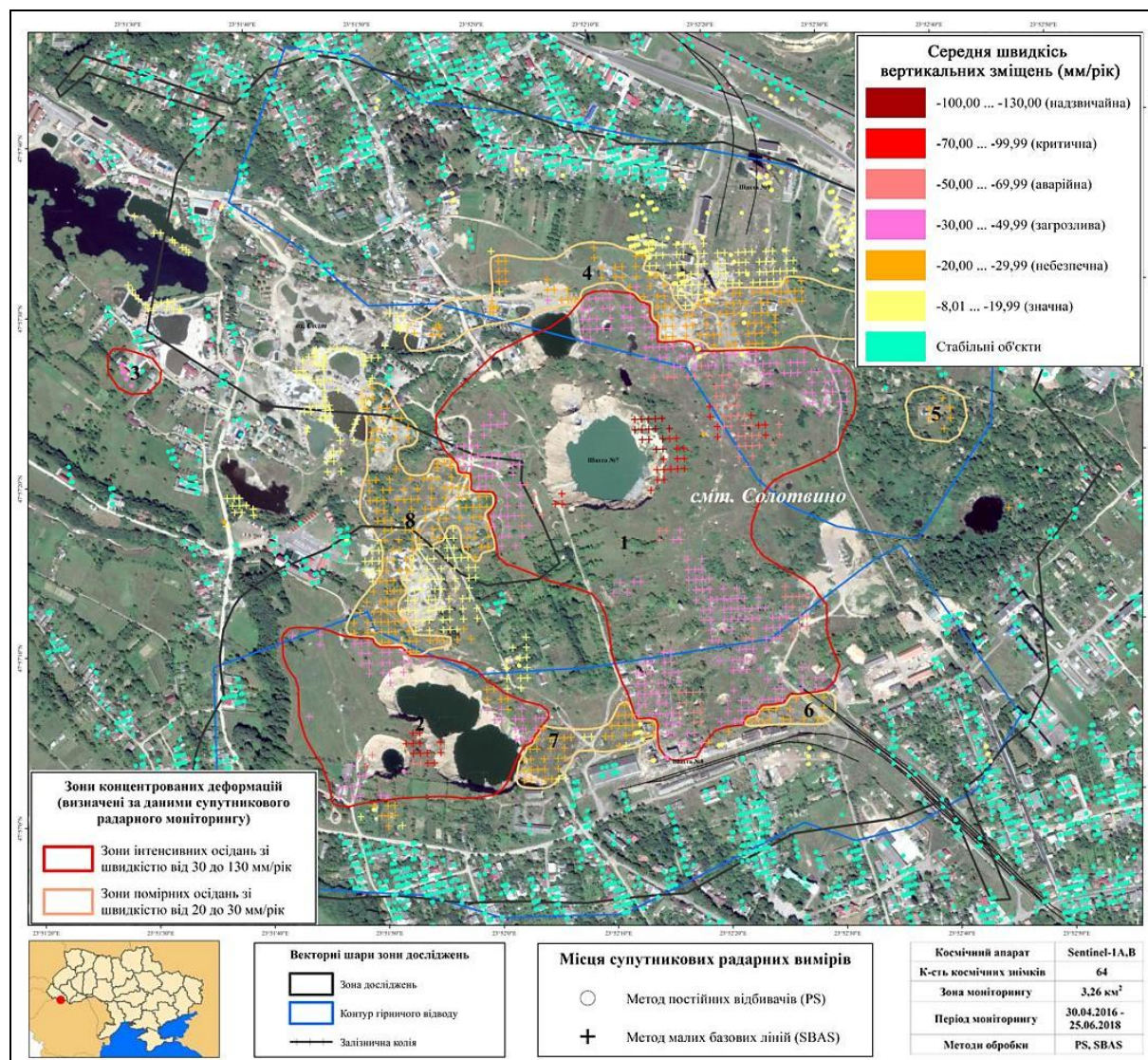
найінформативніших радарних вимірах, що дало змогу визначити основні тренди в зсувах земної поверхні, створено графіки. Чорним контуром позначено територію (*полігон*), яка вважається техногенно небезпечною.

#### *Аналіз отриманих результатів*

За результатами тематичного аналізу середньої швидкості вертикальних зміщень у місцях радарних вимірювань виконано процедуру зонування геодинамічного ризику – визначено ділянки місцевості із концентрованими деформаціями земної поверхні. Автори роботи поділили їх на **дві категорії**: зони **інтенсивних** осідань і зони **помірних** осідань. У категорії інтенсивних осідань визначено три ділянки місцевості – зона осідань 1, зона осідань 2, зона осідань 3. На рис. 3 зони інтенсивних осідань позначено полігонами червоного кольору та цифрами чорного кольору (1, 2, 3), середня швидкість осідань – від –30 до –127 мм/рік. Найбільші осідання земної поверхні зафіксовано у зонах осідань 1 і 2. Вони великі за площею і кожна має виражену мульду осідання, де найбільші осідання виявлено майже у центрі обох зон. Із віддаленням від центра у зонах 1 і 2 інтенсивність осідання земної поверхні поступово зменшується. За припущеннями авторів проєкту, в майбутньому в цих зонах можливі додаткові провали земної поверхні та збільшення наявних. Небезпечна територія бази відпочинку “Руслана”, розташована у зоні осідань 3. Зони осідань 4–8 розміщені на окраїнах зон осідань 1 та 2, де осідання є помірними, їх швидкість від –20 до –30 мм/рік. Їх позначено жовтим кольором (*полігони*) і чорними цифрами (4, 5, 6, 7, 8). На рис. 3 жовтим кольором відображено місця радарних вимірювань, де швидкість осідань становить від –8 до –20 мм/рік; за шкалою авторів проєкту їх визначено як “Значні”.

Зона осідань 1 входить до категорії інтенсивних осідань і, згідно із легендою карти, автори роботи вважають її “загрозливо надзвичайною” через найбільшу швидкість осідання –126 мм/рік (рис. 4). Епіцентр осідань зафіксовано майже у центрі зони. Геодинамічні процеси призвели до утворення провалів на території шахти № 7. Зауважимо, що зона осідань 1 доволі велика і найактивніша у геодинамічному аспекті – осідає із середньою швидкістю –30–127 мм/рік.





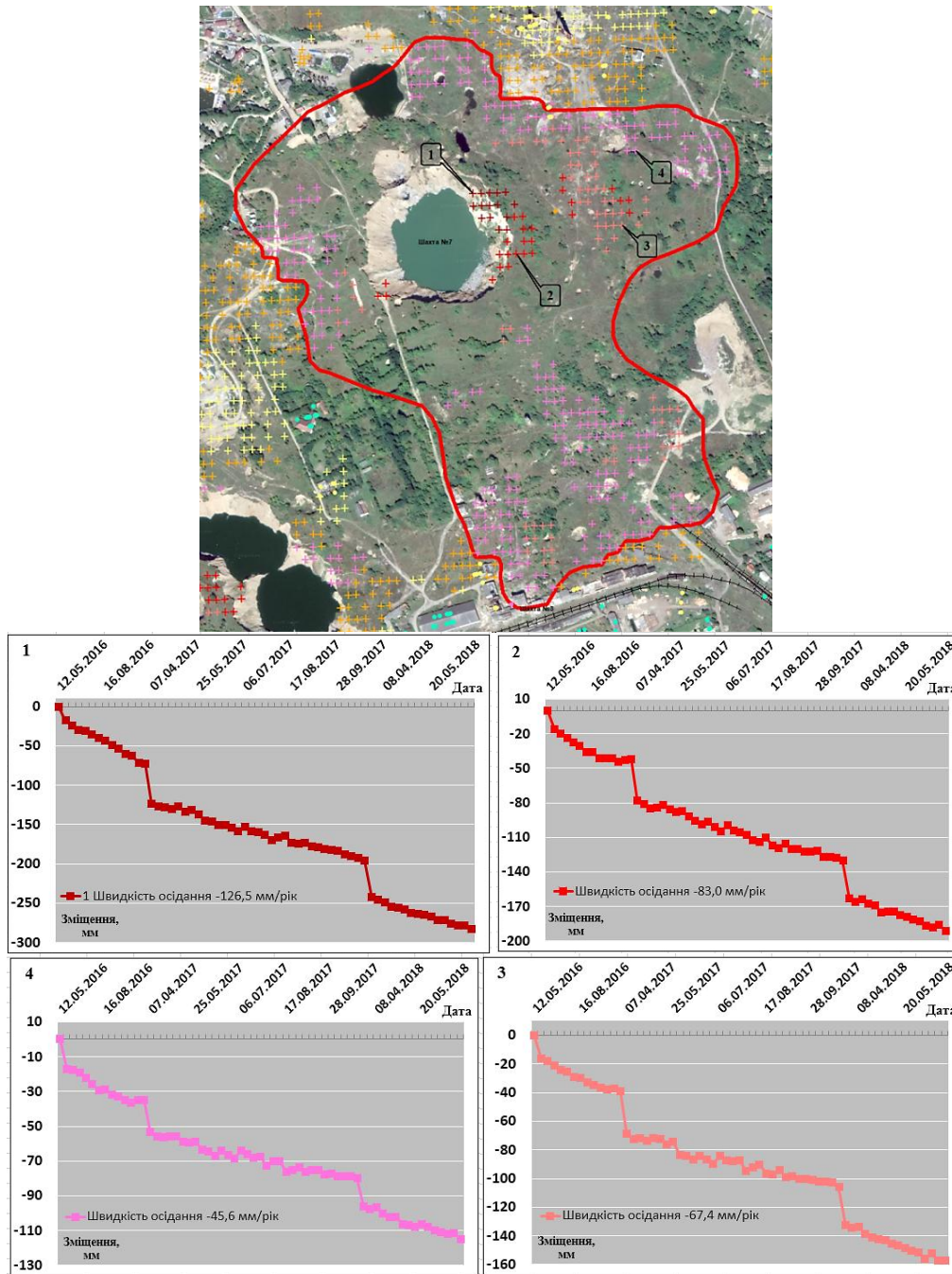
**Рис. 3.** Тематична карта, яка відображає середню швидкість у місцях радарних вимірювань і розділена за інтервалами згідно із легендою

У зоні осідань 1 геодинамічні процеси (*просідання земної поверхні*) повільно продовжуються, що створює передумови для погіршення екологічної безпеки у зоні досліджень. За припущеннями авторів проєкту, в майбутньому можливі нові провали земної поверхні та збільшення наявних. На рис. 4 відображено динаміку осідань у найхарактерніших радарних вимірах у міліметрах. Також на кожному графіку вказано середню швидкість осідання (мм/рік) у конкретному радарному вимірі.

Зона осідань 2 також входить до категорії інтенсивних осідань і, згідно із легендою карти, автори роботи визначили її як “загрозливо критичну”, із найбільшою швидкістю осідання –87 мм/рік (рис. 5). Епіцентр осідань зафіксовано майже у центрі зони. Геодинамічні процеси призвели до утворення провалів.

Зона осідань 2 є другою геодинамічно найактивнішою зоною осідань у діапазоні середньої швидкості осідань від –30 мм/рік до –100 мм/рік. Геодинамічні процеси (*просідання земної поверхні*) повільно продовжуються, що створює передумови для погіршення екологічної безпеки зони інтересу. За припущеннями авторів проєкту, у майбутньому можливе збільшення розмірів провалів земної поверхні. На рис. 5 наведено динаміку осідань у найхарактерніших радарних вимірах у міліметрах, також на графіку відображена середня швидкість осідання (мм/рік) у конкретному радарному вимірі.

Зону осідань 3 визначено як “загрозливу”, згідно із легендою карти, через найбільшу швидкість осідання –39 мм/рік (рис. 6).



**Рис. 4.** Зона осідань 1, графіки динаміки вертикальних зміщень у характерних точках

База відпочинку “Руслана” (рис. 6) розташована на небезпечній території (зона осідань 3) і, за припущеннями авторів проєкту, в майбутньому просідання можуть призвести до аварійної ситуації на її об’єктах.

За результатами геодинамічного аудиту зони інтересу за 30.04.2016 – 25.06.2018 рр. сформовано загальну аналітичну довідку, яка містить перелік геодинамічно активних зон з деформаціями земної поверхні та об’єктів, розташованих у них (табл. 2).

Результати незалежного геодинамічного аудиту об’єктів і територій гірничо-хімічного підприємства “Солотвинський солерудник” отримано із використанням альтернативної методики спостережень, а саме космічних радіолокаційних засобів і методів. Досліджено хронологію просідання ґрунтів та об’єктів у часі за період із 30.04.2016 р. до 25.06.2018 р. За даними аудиту виявлено: зони концентрованих деформацій земної поверхні у діапазоні середньої швидкості осідання від –30 до –130 мм/рік (здійснено



зонування території за ступенем геодинамічного ризику – виділено **інтенсивні й помірні** осідання); проаналізовано динаміку

осідань у характерних радарних вимірах; досліджено об'єкти, які потрапили до техногенно небезпечної зони.

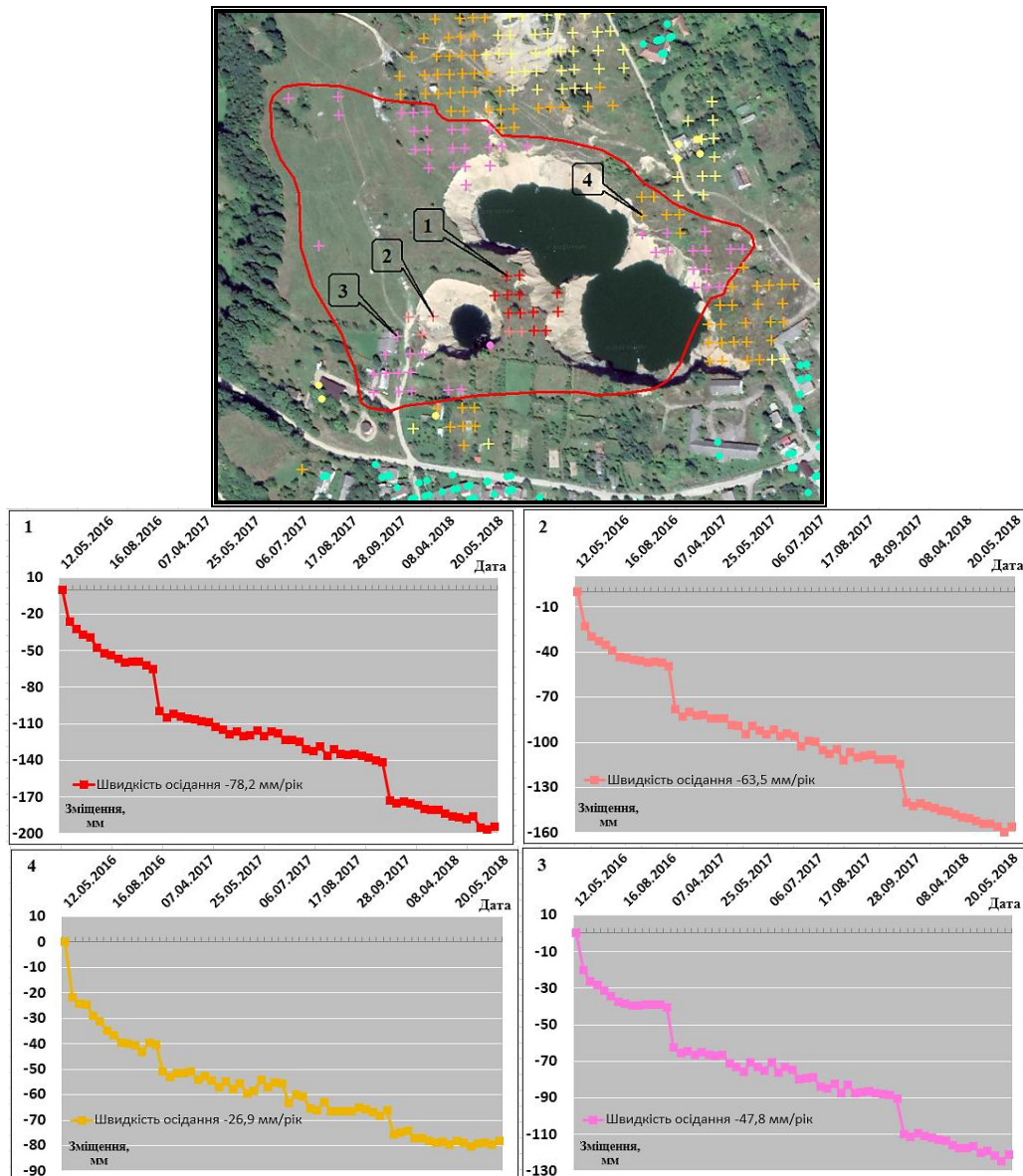


Рис. 5. Зона осідань 2, графіки динаміки вертикальних зміщень у характерних точках

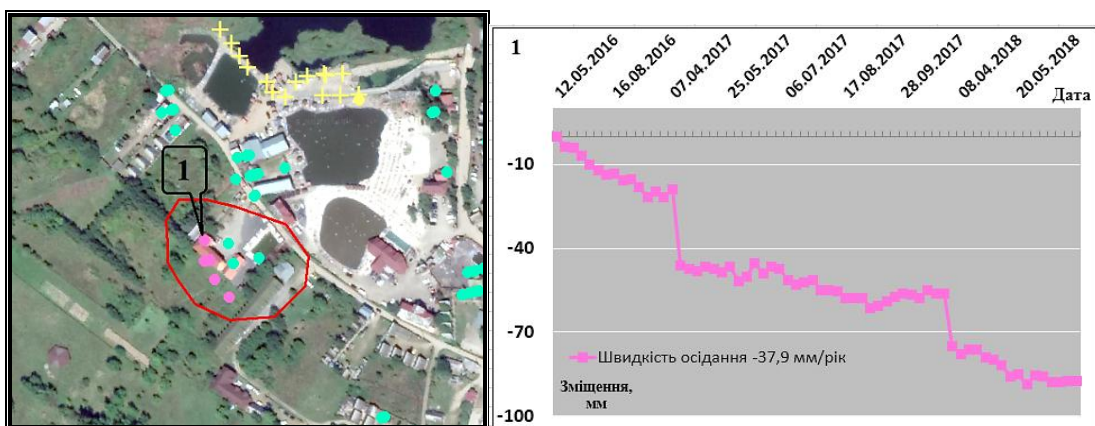


Рис. 6. Зона осідань 3, графіки динаміки вертикальних зміщень у характерних точках

Таблиця 2

## Геодинамічно активні зони з деформаціями земної поверхні та об'єкти, розташовані на них

| № з/п | Назва зони деформацій | Назва об'єкта у зоні осідань                                                                    | Стан об'єкта зони осідань за шкалою авторів проекту | Площа зони осідань, м <sup>2</sup> | Інтервал швидкості осідання, мм/рік | Максимальна швидкість осідання, мм/рік |
|-------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| 1     | Зона осідань 1        | Шахта № 7 та прилегла територія                                                                 | загрозливо-надзвичайна                              | 372962                             | –30...–126                          | 126                                    |
| 2     | Зона осідань 2        | вул. Народна (північна частина)                                                                 | загрозливо-критична                                 | 104689                             | –30...–100                          | 87                                     |
| 3     | Зона осідань 3        | База відпочинку “Руслана”                                                                       | загрозлива                                          | 6050                               | –30...–50                           | 39                                     |
| 4     | Зона осідань 4        | База відпочинку “Ельдорадо”, територія шахти № 9, південна частина території продуктового ринку | небезпечна                                          | 77599                              | –20...–30                           | 31                                     |
| 5     | Зона осідань 5        | Магазин “Начіку”                                                                                | небезпечна                                          | 8989                               | –20...–30                           | 27                                     |
| 6     | Зона осідань 6        | Східна частина шахти № 8                                                                        | небезпечна                                          | 6614                               | –20...–30                           | 29                                     |
| 7     | Зона осідань 7        | Західна частина шахти № 8                                                                       | небезпечна                                          | 16287                              | –20...–30                           | 29                                     |
| 8     | Зона осідань 8        | Територія західніше шахти № 7                                                                   | небезпечна                                          | 55721                              | –20...–30                           | 29                                     |

Засобами високоточного геометричного нівелювання підтверджено результати інтерферометричного оброблення даних радарного знімання (*спостерігається висока згода результатів вимірювань вертикальних зміщень об'єктів інтерферометричними і геодезичними методами*). Обом методами підтверджено наявність зон активних осідань на території гірничої виробки. Визначено, що фактично уся зона досліджень є техногенно небезпечною і становить загрозу для смт Солотвино, за винятком її окраїн на півночі та півдні, й має дві виражені мультисередовищні осідання, розташовані у зонах осідання 1 і 2.

Виконаний аналіз підтверджує необхідність адаптації наявного методу виконання деформаційного моніторингу з використанням космічної радарної інтерферометрії стосовно до територій ліквідованих шахт гірничо-хімічних підприємств та інших об'єктів з урахуванням специфіки деформацій земної поверхні, які виникають. Така технологія, інтегрована в класичну систему маркшейдерсько-геодезичних спостережень, дасть змогу регулярно формувати моделі вертикальних зсувів земної поверхні на великих територіях і значно здешевить отримання таких даних. А за комплексного підходу уможливить верифікацію і

уточнення даних геодезичними методами і засобами. Вчасно організовані спостереження дадуть змогу своєчасно прогнозувати й оцінювати характер і ступінь безпечності ситуації, яка складається, та рекомендувати заходи захисту.

Отже, залежно від місця розташування техногенно навантаженої території на Землі, вплив геодинамічних процесів може проявлятися як на глобальному, так і на регіональному чи локальному рівнях. Поява нових геодезичних та геотехнічних приладів уможливило створення комплексних систем моніторингу техногенно навантажених територій. Використання результатів геотехнічних спостережень у поєднанні з результатами геодезичних вимірювань потребує розроблення методики сумісного опрацювання таких результатів та перевірки її на реальних об'єктах.

Для систематизації, опрацювання та аналізу даних щодо умов розвитку та активізації екзогенних геологічних процесів (зсувів, карсту, підтоплення, абразії та селів) пропонуємо створити автоматизовану інформаційну систему “Екзогенні геологічні процеси”. Основні завдання системи – збирання, накопичення інформації щодо умов розвитку екзогенних геологічних процесів.

### Висновки

1. Визначено актуальні проблеми моніторингу деформацій земної поверхні геодезичними методами у разі підземного розроблення родовищ корисних копалин, обґрунтовано необхідність застосування комплексного підходу до його виконання на основі використання сучасних наземних і дистанційних методів. Описано особливості методу космічної радарної інтерферометрії і його основні переваги над іншими маркшейдерсько-геодезичними методами спостережень.
2. Засобами супутникового радарного знімання та інтерферометричними методами опрацювання даних досліджено вплив гірничих виробок рудників ДП “Солотвинський солерудник” на земну поверхню, будівлі та споруди (*проведено геодинамічний аудит за 30.04.2016–25.06.2018 рр.*), а методом геометричного нівелювання виконано верифікацію отриманих результатів. Доведено, що занедбані соляні шахти становлять значну загрозу для смт Солотвино.
3. Обґрунтовано актуальність використання космічної радарної інтерферометрії в системі комплексного деформаційного моніторингу підроблюваних територій, зокрема – на етапі ліквідації шахтних полів, відповідно до вимог, які ставлять до проведення вимірювань.
4. З метою ліквідації та моніторингу небезпечної ситуації в Солотвино результати будуть використані для екологічної реабілітації й розвитку території та запровадження системи моніторингу.

### Література

- Феоктистов, А. А., Захаров, А. И., Гусев, М. А., & Денисов, П. В. (2015). 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. *Журнал радиоэлектроники*, (9), 13–13.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 40(11), 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183–9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>
- Giff, G., Van Loenen, B., Crompvoets, J. W. H. C., & Zevenbergen, J. (2008, February). Geoportals in selected European states: A non-technical comparative analysis. In *Conference, Small Island Perspectives on Global Challenges: The Role of Spatial Data in Supporting a Sustainable Future location St. Augustine, Trinidad*, 25–29. URL: <http://www.gsdi.org/gsdi10/papers/TS41.3paper.pdf> (date of request: 25.11.2019).
- Strozzi, T., Teatini, P., Tosi, L., Wegmüller, U., & Werner, C. (2013). Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 1177–1191. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20082>, 2013.
- Elliott, J. R., Walters, R. J., & Wright, T. J. (2016). The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nature communications*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/ncomms13844>, 2016.
- Li, Z., Wright, T., Hooper, A., Crippa, P., Gonzalez, P., Walters, R., ... & Parsons, B. (2016). Towards insar everywhere, all the time, with Sentinel-1. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-763-2016>, 2016.
- Szűcs, E., Gönczy, S., Bozsó, I., Bányai, L., Szakacs, A., Szárnya, C., & Wetztergom, V. (2021). Evolution of surface deformation related to salt-extraction-caused sinkholes in Solotvyno (Ukraine) revealed by Sentinel-1 radar interferometry. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3), 977–993. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-977-2021>, 2021.
- Fanti, R., Gigli, G., Lombardi, L., Tapete, D., & Canuti, P. (2013). Terrestrial laser scanning for rockfall stability analysis in the cultural heritage site of Pitigliano (Italy). *Landslides*, 10(4), 409–420.
- Ferreti, A., Monti Guanrieri, C., Prati, C., Rocca, F., & Massonnet, D. (2007). InSAR Principles–Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Publication, 2007. 48 p. URL: [https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19\\_ptA.pdf](https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf) (date of request: 10.12.2019).
- Rucci, A., Ferretti, A., Guarnieri, A. M., & Rocca, F. (2012). Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*, 120, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.030>
- Research of the possibilities of the small baseline method using the SBAS module of the SARscape software package and data SAR ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS as an example. Part 1. Key points of the method / A. A. Feoktistov et al. *Journal of Radio Electronics*. 2015. No. 9. (in Russian). URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/1/text.html>. (date of the application: 01/15/2020).

Maksym PAKSHYN<sup>1</sup>, Ivan LIASKA<sup>1a</sup>, Natalia KABLAK<sup>2</sup>, Halyna YAREMKO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Center for the Reception and Processing of Special Information and Control of the Navigation Field, Zalistsi, Khmelnytskyi region, Ukraine, <sup>1a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8766-2098>

<sup>2</sup> Uzhhorod National University, 3, Narodna Square, Uzhhorod, 88000, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-2257-2264>

<sup>3</sup> Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-2907-931X>

INVESTIGATION OF THE MINING DEPARTMENTS INFLUENCE  
OF SOLOTVYNSKY SALT MINE SE ON THE EARTH SURFACE, BUILDINGS  
AND CONSTRUCTIONS USING SATELITE RADAR MONITORING

The most dangerous exogenous geological processes (EGP) in terms of the amount of damage caused to economic objects include: landslides, karst, flooding, abrasion, mudslides, etc. The distribution and intensity of EGP are determined by the peculiarities of geological and geomorphological structure of the territory, its tectonic, neotectonic and seismic regime, as well as hydrological, climatic, hydrogeological paleo- and modern conditions. Solotvynsky salt mine is one of the oldest enterprises in Transcarpathia. The field has been exploited since the Roman Empire. In 1360, a settlement of salt miners, Solotvyno, was founded on the site of the mine, which later became a center of salt production and a royal monopoly. There are a total of nine mines in the field. In 1995–1996 and 2001, floods began flooding mines. In 2005, landslides and karst abysses intensified in Solotvyno, leading to damage to residential buildings, roads and infrastructure. There was a complete flooding of the mines of two mines. Currently, dangerous natural and man-made processes are observed on the territory of the salt mine and adjacent territories. This is mainly salt karst, both underground and surface, the collapse of areas in the location of mines, as well as landslides. Therefore, the purpose of the research is to conduct a geodynamic audit of SOLOTVYNSKY SALT MINE SE and the surrounding area with the possibility of identifying areas with subsidence or rise of the earth's surface, which are gradually slowing down, accelerating or developing at a constant rate. Output data. Radar interferometry data in the period from April 30, 2016 to June 25, 2018 were used for research and performance of geodynamic audit of SOLOTVYNSKY SALT MINE SE and the adjacent territory. Modern methods of interferometric processing of satellite radar data are used in the work: the method of “PS” – the method of constant scatterers, and the method SBAS – the method of small baselines. The method of geometric leveling was used to measure vertical displacements in some places on the earth's surface in order to verify interferometric data. Monitoring of the area of interest was carried out using modern technologies of satellite radar interferometry. According to the results of observations of landslides and individual objects by space (radar interferometry) and ground (geometric leveling) methods, a high correlation of data was recorded and the presence of zones of active subsidence in the mining area was confirmed.

*Key words:* remote sensing; radar interferometry; vertical displacements of the earth's surface; PS and SBAS methods; geometric leveling; monitoring.

Надійшла 20.09.2021