

<sup>1</sup> Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: kukhtar3088@gmail.com

<sup>2</sup> Кафедра геодезії та землеустрою, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://doi.org/10.23939/istecap2024.100.033>

## АНАЛІЗ ДЕФОРМАЦІЙ ПОВЕРХНІ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ МЕТОДОМ PSINSAR НА ОСНОВІ ДАНИХ СУПУТНИКА SENTINEL-1

Метою дослідження є застосування методу постійних розсіювачів InSAR для вивчення циклічних рухів земної поверхні, спричинених технологічними процесами експлуатації підземного сховища газу. Об'єктом дослідження є територія Богородчанського підземного сховища газу, створеного на місці виснаженого газового родовища. Вхідними даними для виконання досліджень були 39 радіолокаційних знімків, отримані супутником Sentinel-1 із висхідної орбіти у режимі знімання IW (Interferometric Wide). Часовий ряд охопив період з 31 травня 2021 р. до 23 грудня 2023 р. Інтервал часу між зніманнями – 24 дні. Попередню підготовку радіолокаційних знімків виконано за допомогою алгоритму SNAP2StaMPS v2.0. Оновлена версія має кілька додаткових особливостей, які істотно підвищили ефективність застосування набору інструментів. Стенфордський метод постійних розсіювачів (StaMPS) використано для опрацювання інтерферометричних радарних зображень методом постійних розсіювачів. Реалізацію методу PSI виконано у програмі MatLab. Під час опрацювання даних методом постійних розсіювачів враховано поправки за атмосферні впливи. Для цього використано набір інструментів TRAIN, який виконує розрахунок лінійної тропосферної затримки радіолокаційного сигналу та вводить необхідні поправки. Візуалізацію карт середніх швидкостей деформацій здійснено за допомогою застосунку StaMPS-Visualizer. Встановлено, що використання методу PSInSAR дає змогу виконувати аналіз часових серій деформацій території як промислового майданчика, так і технологічних свердловин. Практичне значення результатів дослідження полягає у формуванні рекомендацій для ефективного використання методу PSInSAR як складової геодезичного моніторингу на Богородчанському газосховищі.

*Ключові слова:* газосховище, радіолокаційна інтерферометрія, постійний розсіювач, StaMPS, TRAIN.

### Вступ

Підземні сховища газу (ПСГ) належать до стратегічно важливих інженерних об'єктів, які відіграють ключову роль у забезпеченні безперебійного постачання газу для промислових та побутових потреб. Накопичення та зберігання газу в сховищах дає змогу ефективно проходити сезонні періоди збільшення попиту на споживання природного газу, а також забезпечити запас на випадок непередбачуваних збоїв у постачанні. Така практика використовується не лише в Україні, але й у європейських країнах.

Залежно від геологічних структур, на яких споруджувались газосховища, існує три основних типи підземних сховищ: виснажені газові резервуари, водоносні горизонти та соляні каверни. Найпоширенішим типом у світі (зокрема в Україні) є газосховища на виснажених газових родовищах. Їхня частка серед усіх газосховищ – близько 80 % [NaturalGas.org]. Такий тип газосховищ найефективніший для забезпечення

базового навантаження під час експлуатації, що відповідає сезонним змінам у використанні газу споживачами. Водночас для забезпечення потреб пікового навантаження, яке відповідає моментам швидкого відбирання великих обсягів газу за короткий проміжок часу, створено газосховища у водоносних горизонтах та соляних кавернах [Tajdu's et al., 2021].

Періодичне закачування та відбір природного газу спричиняють зміни тиску в пласті сховища, які зазвичай досягають 2–10 МПа [Teatini et al., 2011]. Саме під впливом циклічності роботи і зміни тиску в широкому діапазоні виникають змінні напруження в геологічній будові. Це, своєю чергою, може призвести до втрати герметичності сховища або пошкодження обладнання, зокрема нагнітальних / видобувних свердловин. Очікувана тривалість експлуатації підземних сховищ газу – десятки років. Тому постійний моніторинг підземних сховищ газу дуже важливий для забезпечення їх безпечної експлуатації та надійної безперебійної роботи.

Моніторинг територій ПСГ, які створюють техногенний вплив на геологічне та навколишнє середовище, передбачає певні геотехнічні дослідження. Важливу роль у цих дослідженнях відіграють геохімічні [Знак та ін., 2015] та геодезичні методи [Perovych and Begin, 2017; Oleskiv, 2017]. Предметом досліджень геодезичного моніторингу є вертикальні рухи покрівлі газосховища та їх амплітуда під час нагнітання та видобування газу [Dudlia et al., 2012].

Для того, щоб зрозуміти мету геодезичної складової досліджень, розглянемо основні геомеханічні процеси, які відбуваються на газосховищі, та їх вплив на експлуатаційну надійність об'єкта. Покрівля газосховища, яке створено на місці виснаженого родовища, займає своє природне положення після наповнення газом. Водночас в пласті створюється тиск, який був до розроблення родовища газу, а напружено-деформований стан поверхні зникає. Після відкачування газу зі сховища тиск зменшується, а напружено-деформований стан поверхні зростає у зв'язку з осіданнями покрівлі, які виникають. Ці процеси повторюються циклічно з року в рік, що призводить до періодичних вертикальних рухів поверхні над газосховищем: піднімання в період нагнітання газу (квітень – жовтень) та осідання у період відкачування газу (листопад – березень). Надійна та безпечна експлуатація ПСГ відбувається за умови пластичних деформацій покрівлі газосховища, які відповідають сезонним циклам роботи.

Одним із найнадійніших методів геодезичного моніторингу на ПСГ є геометричне нівелювання. Серед обмежень, які притаманні цьому методу, варто відзначити просторово-часову дискретність вимірів. Тобто вертикальні рухи земної поверхні оцінюють на основі зміни висоти реперів за період між циклами спостережень, що може становити кілька місяців. Моніторинг із використанням ГНСС методів дає змогу пришвидшити темпи знімання, проте також не забезпечує високої просторово-часової розрізненості результатів вимірів.

Створення високоточного тривимірного поля деформації покрівлі ПСГ можна забезпечити сумісним опрацюванням наземних методів та методів дистанційного зондування. Для вирішення таких завдань все ширше використовують

дані супутникової радіолокаційної інтерферометрії [Liu et al., 2023]. Цю технологію часто застосовують для геодинамічного моніторингу територій, на яких здійснюється розроблення нафтогазових родовищ [Mu'Amalah et al., 2021; Eckles, 2023], відбувається активне споживання підземних вод у межах великих агломерацій [Vaka et al., 2021], розгортаються проекти із підземного зберігання CO<sub>2</sub> [Vasco et al., 2022]. Спільною особливістю вищезазначених проектів є визначення поступових деформацій земної поверхні з міліметровою точністю у результаті видобування або наповнення підземних геологічних структур. А оскільки параметри таких деформацій подібні до деформацій покрівлі газосховища, то метод супутникової радіолокаційної інтерферометрії застосовують і для геодинамічних досліджень на ПСГ [Ferretti et al., 2014; Rapant et al., 2020; Struhár et al., 2022].

### **Об'єкт дослідження**

Об'єктом цього дослідження є територія Богородчанського підземного сховища газу (Івано-Франківська обл.), введеного в експлуатацію 1979 р. Богородчанське ПСГ створено в середньому піщано-алевролітовому горизонті південно-східного блоку площею 5,5×3,5 км<sup>2</sup>. Внутрішній контур газоносності становить 7,5×4,5 км<sup>2</sup>. Південно-західна геологічна складка обмежена відкладами стебницького насуву, а північно-західна переходить у Гринівське родовище. Із північного сходу і заходу газовий горизонт обмежений тектонічними покладами [Oleskiv, 2017].

Здійснені раніше дослідження із визначення динаміки покрівлі газосховища на основі радіолокаційних даних супутника Sentinel-1 висвітлено в [Kukhtar & Oleskiv, 2023]. Застосований у роботі метод диференціальної інтерферометрії (DInSAR) недостатньо чутливий для визначення сезонних пластичних деформацій. Значення похибок, які впливають на результат (похибки положення супутника на орбіті, ЦМР та атмосферні впливи), близькі за значенням до деформацій земної поверхні. Тому застосування методу DInSAR ефективно у разі деформацій, які на порядок перевищують значення цих похибок.

## Мета

Оскільки предметом вивчення у цьому дослідженні є повільні та циклічні рухи земної поверхні над газосховищем, то вважаємо, що необхідне опрацювання супутникових радіолокаційних знімків удосконаленими методами диференціальної інтерферометрії із застосуванням багаточасових рядів. До таких методів належить метод постійних розсіювачів PSI.

Мета цього дослідження – застосування методу PSI для дослідження циклічних рухів земної поверхні, спричинених технологічними процесами експлуатації Богородчанського підземного сховища газу.

## Вхідні дані та методика досліджень

Метод постійних розсіювачів InSAR (Persistent Scatterer InSAR, або PSI) – це удосконалена технологія інтерферометричного опрацювання радарних зображень, який дає змогу із високою точністю визначати деформації земної поверхні та споруд за допомогою виявлення та аналізу точок, які залишаються стабільними у часі (так званих “постійних розсіювачів”). Ці об’єкти зазвичай мають високу відбивну здатність і не зазнають змін під впливом атмосферних або інших зовнішніх факторів. Використовуючи дані з кількох радарних знімків, отриманих у різні моменти часу, PSI дає змогу з високою точністю виявляти повільні деформації поверхні, спричинені природними або техногенними чинниками.

Вхідними даними для здійснення досліджень були 39 радіолокаційних знімків, отриманих супутником Sentinel-1 із висхідної орбіти. Часовий ряд охопив період з 31 травня 2021 р. до 23 грудня 2023 р. Інтервал часу між зніманнями – 24 дні. Радіолокаційні знімки, які ми опрацьовували, отримано в режимі IW (Interferometric Wide) із просторовим розрізненням  $5 \times 14$  м/піксель. Знімки завантажено з архіву Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/>).

Опрацювання даних супутникового радіолокаційного знімання методом постійних розсіювачів (PSI) виконували у два етапи із застосуванням програмних продуктів, які розповсюджують із відкритим кодом:

1. Автоматизована підготовка даних за допомогою алгоритму SNAP2StaMPS.

2. Реалізація методу StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) у програмі MatLab.

*Крок 1.* За допомогою алгоритму SNAP2StaMPS виконано попередню підготовку радіолокаційних знімків. Автоматизація процесу опрацювання із використання скриптів, написаних на мові програмування Python, дає змогу ефективно працювати із великою кількістю вхідних даних. У результаті на знімку виокремлено територію у межах заданої зони, яка нас цікавить, враховано дані коригування орбіти супутника у момент кожного знімання, виконано корекстрацію пар основного та допоміжних знімків та сформовано відповідні інтерферограми.

Сьогодні пакет SNAP2StaMPS оновлено до версії 2.0 (<https://github.com/mdelgadoblasco/snap2stamps>). Використання попередньої версії SNAP2StaMPS v1.0 потребувало виконання етапу з визначення основного знімка, серед часової серії, за допомогою програми SNAP (Sentinel Application Platform). Завдяки оновленню немає потреби в цьому етапі, оскільки усе виконується в межах алгоритму SNAP2StaMPS автоматично.

Оновлену версію створено на основі користувацьких запитів, які постійно опрацьовували після появи початкової версії. Окрім вищезгаданої опції автоматичного вибору основного знімка, оновлена версія підтримує попереднє опрацювання радарних даних високої роздільної здатності, отриманих супутниками TerraSAR/TanDEM-X у режимі Stripmap (роздільна здатність  $3 \times 3$  м). Алгоритм пакета TSX2Stamps, для підготовки даних TerraSAR/TanDEM-X до опрацювання методом PSI, використовує подібний робочий процес, як і для даних Sentinel-1 TOPSAR. Пакет TSX2Stamps також є у вільному доступі як окремий пакет для завантаження на GitHub (<https://github.com/jziemer1996/TSX2StaMPS>).

На рис. 1 наведено блок-схему алгоритму SNAP2StaMPS v2.0. Бачимо, що оновлена версія SNAP2StaMPS v2.0, окрім нового набору команд для підготовки даних TerraSAR/TanDEM-X, передбачає і додаткові функції (Optional functions). Введення додаткових функцій істотно підвищило зручність і надійність роботи. Функція Auto-Download забезпечила зручність завантаження даних безпосередньо із активного архівного центру Alaska Satellite Facility. Переваги функції

Auto-Master Selection вже відзначено вище. Відомо, що після створення інтерферограм кожен із них необхідно переглянути та перевірити на предмет помилок під час формування. Додана функція друку результатів (Plotting results) дає змогу сформувати папку із зображеннями усіх отриманих інтерферограм. Їх перегляд – це швидкий та зручний спосіб перевірки якості виконання попередніх етапів.

Нижче наведено перелік додаткових особливостей, які отримала оновлена версія SNAP2StaMPS v2.0 [Delgado Blasco et al., 2023]:

- використання оновлених версій Python 3.11 і SNAP v9.0;

- скрипт автозапуску для повної автоматизації усіх етапів опрацювання;
- можливість роботи з двома підсмугами (у разі розташування досліджуваної території в межах окремих підсмуг IW);
- підтримка різних форматів задавання меж досліджуваної території (BBOX, WKT, SHP, KML, GeoJSON);
- підтримка використання зовнішньої цифрової моделі рельєфу (за замовчуванням використовується SRTM 1 sec);
- нові параметри для оптимізації дискового простору.

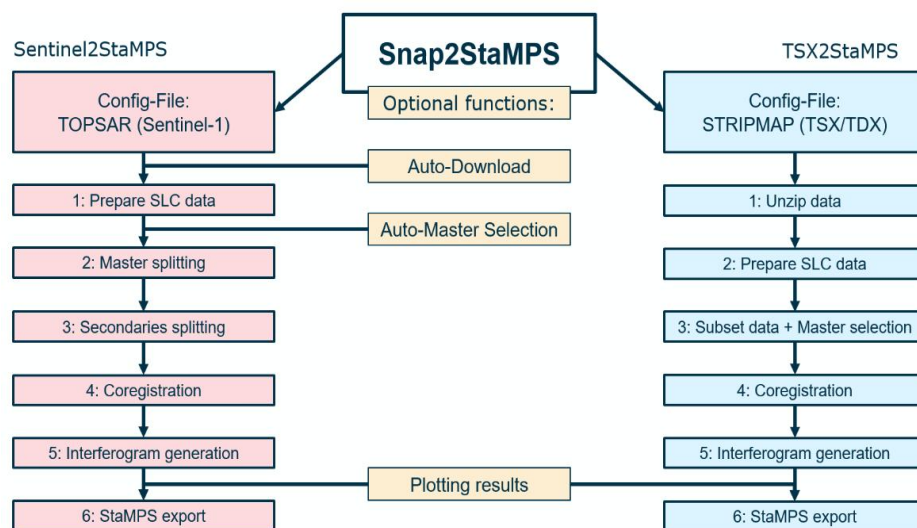


Рис. 1. Блок-схема процесу автоматизованої підготовки даних радіолокаційного знімання за алгоритмом SNAP2StaMPS v2.0

**Крок 2.** Стенфордський метод постійних розсіювачів (StaMPS) [Hooper et al., 2012] – це інструмент для опрацювання інтерферометричних радарних зображень (InSAR), який дає змогу визначати деформації земної поверхні із використанням точок, які стабільно відображають радарний сигнал протягом тривалого періоду. Реалізація методу виконується у програмі MatLab. Опрацювання даних відбувається завдяки скриптам MatLab, які виконують ідентифікацію когерентних пікселів і виділяють складову сигналу, що відповідає деформації земної поверхні в межах цих пікселів. Алгоритм передбачає виконання семи кроків.

Однією із переваг методу постійних розсіювачів є можливість урахування атмосферних впливів під час інтерферометричного аналізу. Стенфордський метод постійних розсіювачів підтримує набір інструментів TRAIN (The Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise) – програмний продукт із відкритим кодом, який використовується для зменшення атмосферних впливів на результати InSAR [Bekaert et al., 2015]. Розрахунок значення атмосферної поправки можна виконувати після завершення семи кроків алгоритму StaMPS. Після цього рекомендовано повторити кроки 6 та 7 алгоритму StaMPS, для урахування атмосферних та просторово корельованих похибок під час повторного розгортання фази.

### Результати досліджень

За результатами опрацювання 39 радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1 методом PSI отримано часову серію деформацій земної поверхні для території Богородчанського ПСГ. Дослідження охопили період 2,5 року, що відповідає кільком періодичним циклам роботи газосховища.

На рис. 2 подано карту середніх швидкостей деформацій, зокрема території газосховища. Відомо, що супутник Sentinel-1 оснащений правостороннім радаром, який виконує знімання не в надир, а під кутом. Враховуючи цей факт, а також те, що для аналізу використано знімки з висхідної орбіти, отримано результуючі швидкості вздовж лінії візування на супутник. Також на рис. 2 наведено розподіл значення стандартного відхилення, що відображає якість визначення швидкостей деформацій. Для території досліджуваного об'єкта це значення не перевищує 1 мм/рік.

Під час опрацювання даних методом постійних розсіювачів ураховано поправки за просторово корельовані похибки (похибка цифрової моделі рельєфу та орбітальні похибки), а також атмосферні впливи. Спершу для цього було використано набір інструментів TRAIN, який виконує розрахунок лінійної тропосферної затримки радіолокаційного сигналу та вводить необхідні поправки [Kukhtar, 2024]. На рис. 3 подано розподіл тропосферної затримки радіолокаційного сигналу, спричиненої атмосферним

впливом у момент знімання. Така узагальнена картина дає змогу оцінити фазовий вплив атмосфери на кожному зі знімків та, у разі потреби, вилучити такий знімок з опрацювання.

Після розрахунку тропосферної затримки сигналу кроки 6 та 7 алгоритму StaMPS виконано повторно для сумісної оцінки просторово корельованих та атмосферних поправок під час розгортання фази.

Для того, щоб пересвідчитись у ефективності застосування поправок, у середовищі програми MatLab виконано почергову візуалізацію карт середніх швидкостей (рис. 4). Діапазон середніх швидкостей деформацій досліджуваної території змінюється. Це поширено, коли в результаті врахування вищевказаних поправок, магнітуда значень практично не змінюється, а верхня та нижня межі діапазону пропорційно зменшуються.

Подання даних у програмі MatLab не завжди зручне та візуально зрозуміле. Тому алгоритм StaMPS передбачає можливість візуалізації карт середніх швидкостей деформацій на оптичному супутниковому знімку. Для цього набір отриманих даних експортується у форматі \*.kmz файлу для візуалізації в GoogleEarth. Інший спосіб – використання застосунку StaMPS-Visualizer [Höser, 2018]. Програма розповсюджується у вільному доступі та дає змогу не лише візуалізувати дані на оптичному супутниковому знімку, але й виконувати аналіз часових серій деформацій для кожного постійного розсіювача та подавати дані у вигляді графіків.

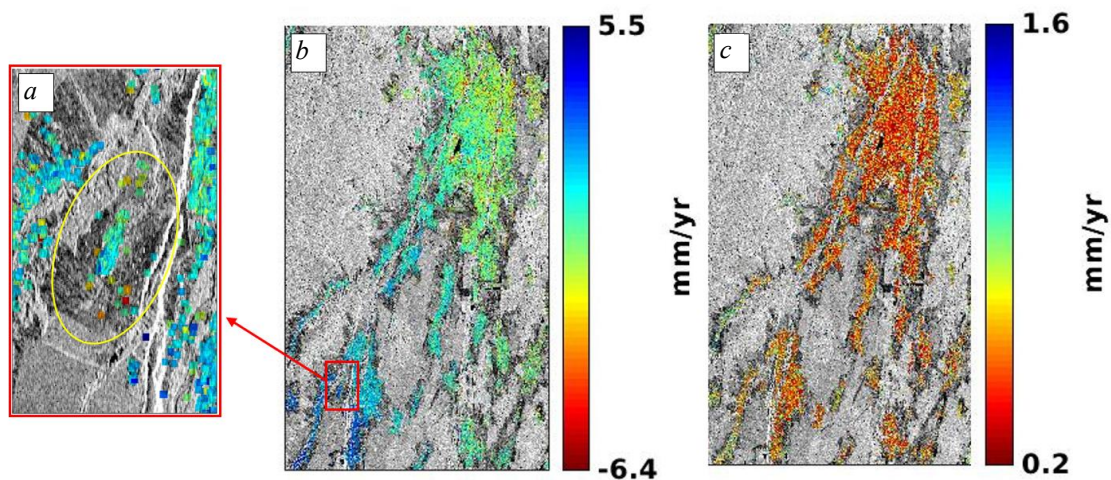


Рис. 2. Карта середніх швидкостей деформацій за 31.05.2021–23.12.2023: а – територія Богородчанського ПСГ (приблизні межі газосховища); б – територія, у межах якої виконано опрацювання SAR знімків; с – розподіл середнього квадратичного відхилення розрахункової швидкості деформацій земної поверхні

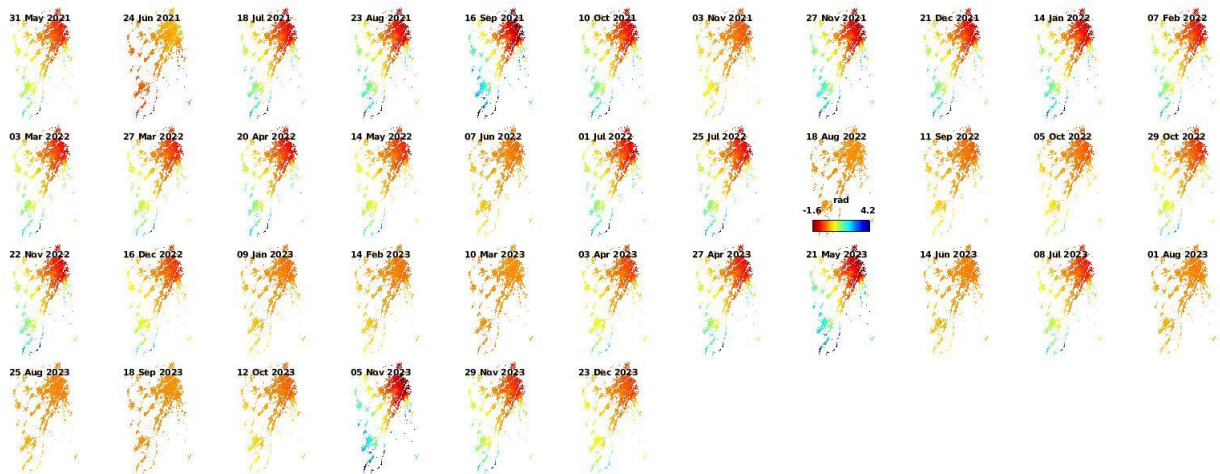


Рис. 3. Тропосферна затримка сигналу для досліджуваної території упродовж 31.05.2021–23.12.2023, рад

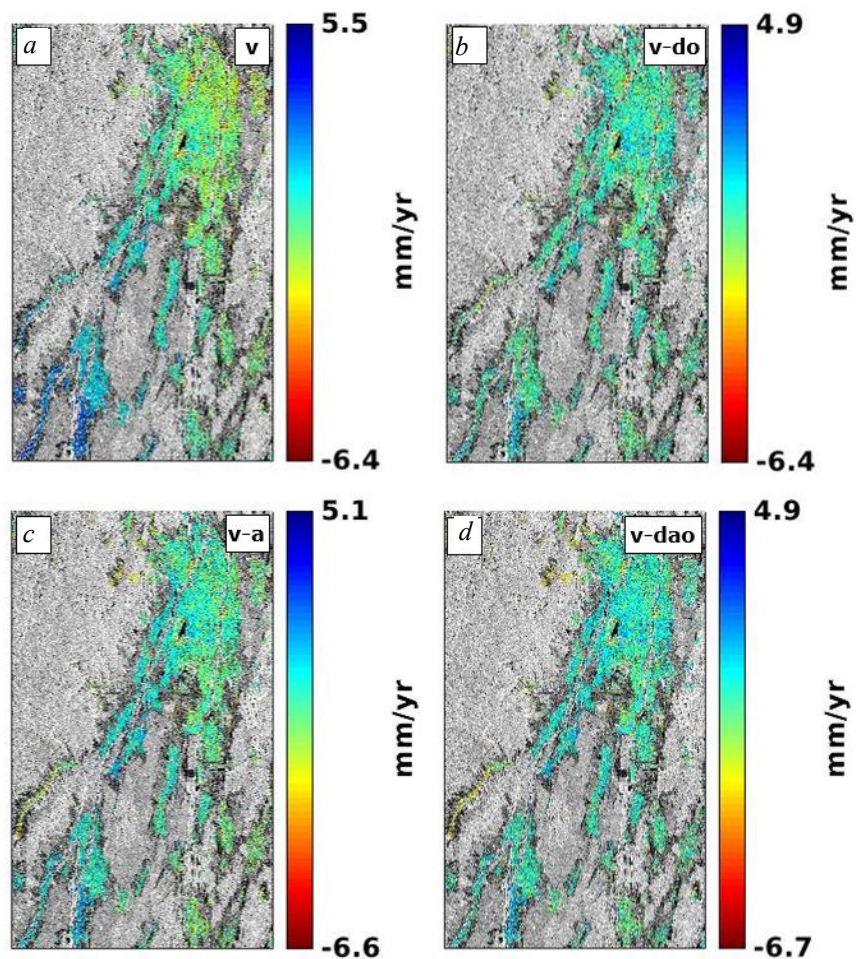


Рис. 4. Карти середніх швидкостей деформацій для досліджуваної території:  
 а – швидкості деформацій без урахування поправок ( $v$ ); б – швидкості деформацій з урахуванням поправок за похибки цифрової моделі рельєфу та орбітальні похибки ( $v$ -do);  
 с – швидкості деформацій з урахуванням лінійної тропосферної затримку сигналу ( $v$ -a);  
 d – швидкості деформацій з урахуванням поправок за похибки цифрової моделі рельєфу, лінійну тропосферну затримку сигналу та орбітальні похибки ( $v$ -dao)

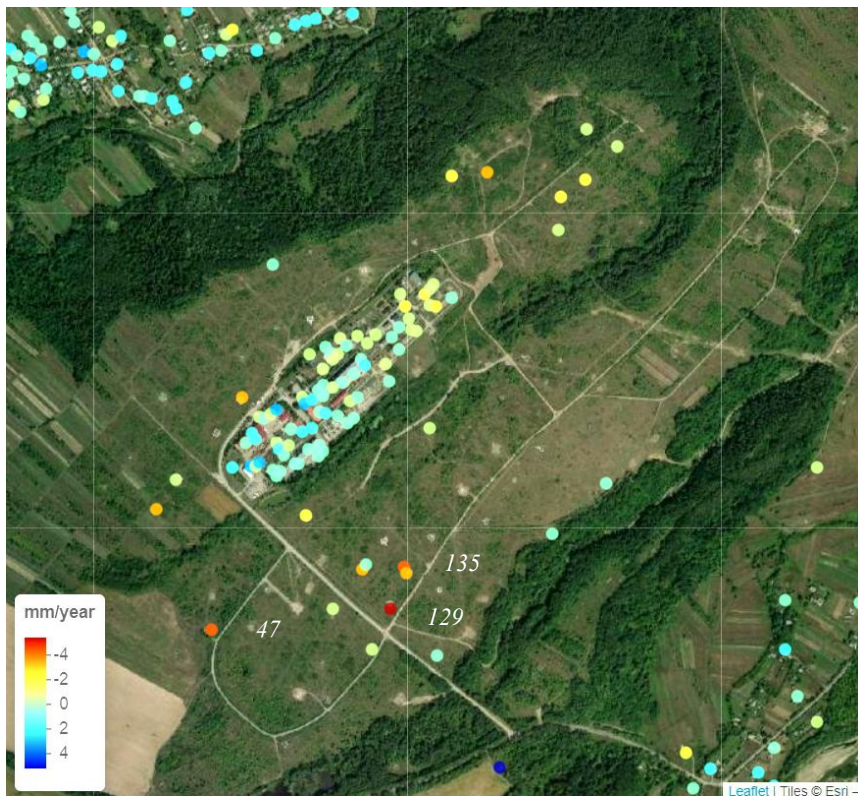


Рис. 5. Карта середніх швидкостей деформацій території Богородчанського ПСГ, отримана методом PSInSAR, за період 31.05.2021–23.12.2023

На рис. 5 наведено карту швидкостей деформацій земної поверхні (уздовж лінії візування на супутник) території Богородчанського газосховища, реалізовану завдяки StaMPS-Visualizer.

Постійні розсіювачі зосереджені здебільшого в місцях розташування споруд та штучних об'єктів, зокрема на території розміщення технологічного обладнання та адміністративних споруд. Аналіз часових серій деформацій вказує на загальну стабільність території проммайданчика. Середні швидкості деформацій на території, де розташоване технологічне обладнання, близькі до нуля.

Найважливішу для геодезичного моніторингу інформацію надають постійні розсіювачі на технологічних свердловинах. Такі свердловини чітко виділяються на радіолокаційних знімках завдяки високій амплітуді відбитого сигналу. Проте на рис. 5 видно, що лише частина технологічних свердловин, які розосереджені по території газосховища, визначені як постійні розсіювачі. Очевидно, що решта з них – відсіяні (*weeded*) під час опрацювання через декореляцію. Декореляція виникає внаслідок втрати когерентності сигналу між двома або більше знімками, які використовують для інтерферометричного аналізу.

Вважаємо, що природа виникнення декореляції на цьому об'єкті пов'язана із сезонними змінами навколишнього середовища (структура рослинного покриву, сніговий покрив). Основний підхід для подолання впливу сезонних змін поверхні, із використанням супутникової радіолокаційної інтерферометрії, полягає у застосуванні наземних кутових відбивачів [Aguado et al., 2015]. Тому для здійснення геодезичного моніторингу території газосховища із застосуванням супутникових радіолокаційних методів рекомендуємо розгорнути мережу кутових відбивачів на / поблизу технологічних свердловин.

Як свідчить аналіз часових серій деформацій на свердловинах, положення переважної більшості впродовж періоду досліджень стабільне. Часові серії даних можуть бути обтяжені шумовими компонентами, які в цьому випадку не були видалені під час опрацювання (рис. 6). Тому для аналізу необхідно розглядати усереднені дані.

Окрім постійні розсіювачі на свердловинах вказують на наявність тенденції до осідання та непластичних деформацій. На рис. 7 наведено графіки деформацій трьох точок (див. рис. 5: № 47, № 129, № 135), які характеризуються найвищою швидкістю осідання за досліджуваний період.

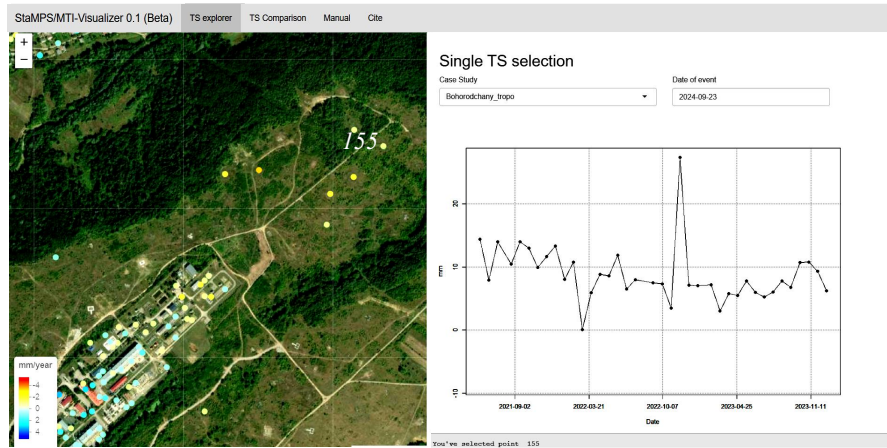


Рис. 6. Часова серія деформацій постійного розсіювача № 155 на технологічній свердловині

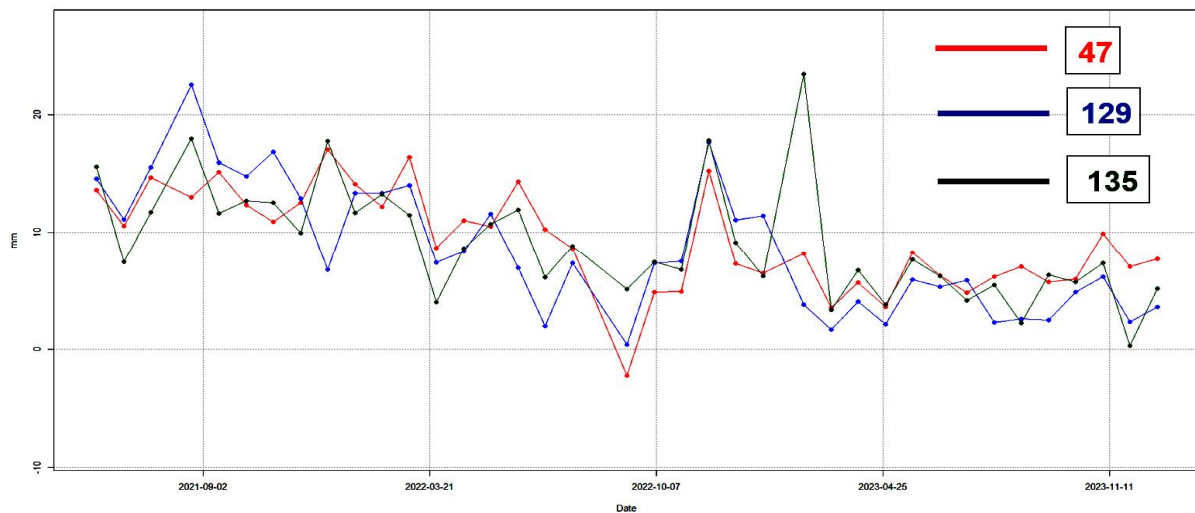


Рис. 7. Часова серія деформацій постійних розсіювачів № 47, № 129, № 135 на технологічних свердловинах

З метою правильної інтерпретації даних подальший аналіз геодинамічних процесів, які відбуваються на території газосховища, повинен виконуватись за наявності даних про технологічні процеси закачування / відбирання газу в ході експлуатації. Результати супутникового радіолокаційного моніторингу також потребують додаткової верифікації за допомогою даних наземних геодезичних спостережень (наприклад, геометричного або ГНСС-нівелювання).

#### Наукова новизна та практична значущість

Отримано результати супутникового радіолокаційного моніторингу території Богородчанського ПСГ за 2,5 року експлуатації газосховища. Встановлено, що використання методу PSInSAR дає змогу виконувати аналіз часових

серій деформацій території як промислового майданчика, так і технологічних свердловин.

Практичне значення результатів дослідження полягає у формуванні рекомендацій для ефективного використання методу PSInSAR як складової геодезичного моніторингу на Богородчанському ПСГ. Основна рекомендація – це розгортання мережі наземних куткових відбивачів для підвищення когерентності сигналу на радіолокаційних знімках.

#### Висновки

Застосування методу супутникової радіолокаційної інтерферометрії, виконане на прикладі території Богородчанського ПСГ, підтверджує ефективність та економічність вирішення питання моніторингу територій підземних



сховищ газу на основі даних дистанційного зондування. Метод InSAR у поєднанні із результатами наземного знімання (геометричного нівелювання, ГНСС-спостереження) здатен забезпечити додаткову інформацію про просторово-часовий розподіл деформацій покрівлі підземного сховища газу.

Для забезпечення надійності результатів визначення деформацій усі експлуатаційні свердловини необхідно обладнати наземними кутовими відбивачами. Це дасть змогу отримувати постійне високе значення відбитого радіолокаційного сигналу та зменшити вплив декореляції під час опрацювання довгих часових серій радіолокаційних даних.

Завдяки відкритому доступу до даних радіолокаційного знімання, які постійно накопичуються та оновлюються кожні 12 днів, моніторинг підземних сховищ газу методом супутникової радіолокаційної інтерферометрії може стати основою системи раннього запобігання критичним деформаціям території. Така система допоможе підвищити експлуатаційну надійність підземного сховища газу завдяки своєчасному реагуванню.

### Список літератури

- Aguado, V., Vink, A., James, B., Biescas, E. (2015). An improved combination of Natural Reflectors and Corner Reflectors to monitor surface heave generated by SAGD operations using InSAR satellite technology. *World Heavy Oil Congress 2015*. Edmonton, AB, Canada, Vol. WHOC15-321.
- Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., and Parker, D. J. (2015). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035>
- Delgado Blasco, J. M., Ziemer, J., Foumelis, M., & Dubois, C. (2023). SNAP2StaMPS v2: Increasing Features and Supported Sensors in the Open Source SNAP2StaMPS Processing Scheme (2.0). FRINGE Workshop 2023, Leeds, UK. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8362628>
- Dudlia, M. A., Shirin, L. N., & Fedorenko, E. A. (2012). Processes Of Underground Gas Storage. *Course book*. Dnipropetrovsk, NMU. 412 p. ISBN 978-966-350-364-6 (in Ukrainian). <https://core.ac.uk/download/pdf/48402493.pdf>
- Eckles, E. (2023). Oilfield Ground Displacement Monitoring Using SAR Data. Retrieved December 1, 2024, <https://www.nv5geospatialsoftware.com/Learn/Case-Studies/Case-Studies-Detail/ArtMID/10204/ArticleID/24281/Oilfield-Ground-Displacement-Monitoring-Using-SAR-Data>
- Ferretti, A., Rucci, A., Tamburini, A., Del Conte, S. and Cesa, S. (2014). Advanced InSAR for Reservoir Geomechanical Analysis. *Conference Proceedings, EAGE Workshop on Geomechanics in the Oil and Gas Industry, May 2014*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140459>.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arian, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>.
- Höser, Thorsten. (2018). Analysing Capabilities and Limitations of InSAR Using Sentinel-1 Data for Landslide Detection and Monitoring. Master's thesis, Bonn: Department of Geography, Bonn University
- Kukhtar, D. (2024). A Method of Tropospheric Signal Delay Correction in Satellite SAR. *Modern Achievements of Geodetic Science and Industry*. No. 2 (48), 41–48. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-2-48-41-48> (in Ukrainian).
- Kukhtar, D. & Oleskiv, R. (2023). Differential radar interferometry method for monitoring the areas of underground gas storage station. *Technical Sciences and Technology*, 3 (33), 235–241. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3\(33\)-235-241](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-235-241) (in Ukrainian).
- Liu, C., Ji, L., Zhu, L., Xu, C., Zhang, W., Qiu, J., & Xiong, G. (2023). Present-Day Three-Dimensional Deformation across the Ordos Block, China, Derived from InSAR, GPS, and Leveling Observations. *Remote Sensing*, 15. 2890. <https://doi.org/10.3390/rs15112890>
- Mu'Amalah, A., Anjasmara, I. M., & Taufik, M. (2021). Land Subsidence Monitoring in Cepu Block Area Using PS-Insar Technique. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 731(1), Article 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/731/1/012011>
- NaturalGas.org (2024, December 1). *Storage of Natural Gas*. <http://naturalgas.org/naturalgas/storage/>
- Oleskiv, R. Ye. (2017). Investigation of stress-strain state of underground gas storage wells based on geodetic measurement. *Dissertation on acquisition of PhD scientific degree by specialty 05.24.01*. Kyiv National University of Construction and Architecture. MSE of Ukraine, Kyiv.
- Perovych, L., & Begin, S. (2017). Seasonal deformation processes at under groundgas storage station. *Baltic surveying. Intern. scientific journal*, Vol. 6, 83–86. [https://lufb.llu.lv/Raksti/Journal\\_Baltic\\_Surveying/2017/Journal\\_Baltic\\_SurveyingVol6\\_2017-83-86.pdf](https://lufb.llu.lv/Raksti/Journal_Baltic_Surveying/2017/Journal_Baltic_SurveyingVol6_2017-83-86.pdf)
- Rapant, P., Struhár, J., & Lazeký, M. (2020). Radar Interferometry as a Comprehensive Tool for Monitoring

- the Fault Activity in the Vicinity of Underground Gas Storage Facilities. *Remote Sensing*, 12, 271. <https://doi.org/10.3390/rs12020271>
- Struhár, J.; Rapant, P.; Kačmařík, M.; Hlaváčová, I.; & Lazecký, M. (2022). Monitoring Non-Linear Ground Motion above Underground Gas Storage Using GNSS and PSInSAR Based on Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 14, 4898. <https://doi.org/10.3390/rs14194898>
- Tajduś, K., Sroka, A., Misa, R., Tajduś, A., & Meyer, S. (2021). Surface Deformations Caused by the Convergence of Large Underground Gas Storage Facilities. *Energies*, 14, 402. <https://doi.org/10.3390/en14020402>
- Teatini, P., Castelletto, N., Ferronato, M., Gambolati, G., Janna, C., Cairo, E., Marzorati, D., Colombo, D., Ferretti, A., Bagliani, A. et al. (2011). Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2011, 116, 21. <https://doi.org/10.1029/2010JF001793>
- Vaka, D., Rao, Y., Ojha, C., & Kumar, V. (2021). Mapping land subsidence in Mumbai by Sentinel-1 InSAR time-series. *Fringe*, 2021.
- Vasco, D., Ferretti, A., Rucci, A., Falorni, G., Samsonov, S., White, D., & Czarnogorska, M. (2022). Geodetic Monitoring of the Geological Storage of Greenhouse Gas Emissions. *Book Series: Geophysical Monograph Series*. <https://doi.org/10.1002/9781119156871.ch2>
- Znak, M. S., Lopushnyak, Ya. I., Morhulets, I. M. (2015). Novi tekhnolohii hazoekhimichnykh doslidzhen dlia kontroliu hermetychnosti pidzemnykh skhovyshch hazu ta okhorony dokillia. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, No. 2, 95–102 (in Ukrainian).

Denys KUKHTAR<sup>1\*</sup>, Roksolana OLESKIV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Higher geodesy and astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: kukhtar3088@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

<sup>2</sup> Department of Geodesy and Land Management, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0003-0334-3028>

#### SURFACE DEFORMATIONS ANALYSIS OF UNDERGROUND GAS STORAGE USING PSINSAR BASED ON SENTINEL-1 SATELLITE DATA

The purpose of this research is using the Persistent Scatterers InSAR method to study cyclic movements of the Earth's surface caused by technological processes of exploiting the underground gas storage facility. The objective of this research is the area of the Bohorodchany underground gas storage facility, which was constructed at depleted gas reservoir. The input data for the research were thirty-nine (39) SAR images acquired by Sentinel-1 satellite in the Interferometric Wide mode from an ascending orbit. The time series covered the period from May 31, 2021 to December 23, 2023. The time interval between the images was 24 days. The SNAP2StaMPS v2.0 algorithm enabled the preliminary preparation of radar images. The introduction of additional functions has significantly improved convenience and reliability of operation. The Stanford Method of Persistent Scatterers (StaMPS) was used for processing radar images by the Persistent Scatterers technique. This method is implemented in MatLab program. In the course of the data processing, the influence of atmospheric effects were taken into consideration. TRAIN toolkit was used for this purposes. It calculates the linear tropospheric delay of a radar signal and makes the required corrections. The visualization of deformation velocity maps of the gas storage area was implemented via the StaMPS-Visualizer. It has been established that the PSInSAR method allows to perform an analysis of time series of deformations on the area of both industrial site and technological wells. The practical significance of the research results consists in formulation of recommendations for effective application of the PSInSAR method as a component of geodetic monitoring at the Bohorodchany underground gas storage facility.

*Key words:* gas storage facilities, radar interferometry, persistent scatterer, StaMPS, TRAIN.

Надійшла 05.09.2024