

Денис Кухтар¹, Роксолана Олесків²

¹ кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою
Інституту будівництва, архітектури та енергетики
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу
(м. Івано-Франківськ, Україна)

E-mail: denys.kukhtar@nung.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

² кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою
Інституту будівництва, архітектури та енергетики
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу
(м. Івано-Франківськ, Україна)

E-mail: roksolanaoleskiv@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-3028>

**МЕТОД ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ РАДАРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ
МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЙ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ**

У роботі представлено використання методу диференціальної інтерферометрії для території підземного газосховища, який дозволяє відстежити вертикальний рух топографічної поверхні об'єкту.

Представлено результати опрацювання 29 радіолокаційних знімків, отриманих супутником Sentinel-1 за період з червня 2020 р. до травня 2021 р. На основі результатів опрацювання було отримано 28 деформаційних карт, які показують динаміку вертикальних рухів земної поверхні між послідовними зніманнями. Результати узгоджуються з даними наземних досліджень та відповідають сезонним рухам покрівлі газосховища, зумовлених виробничими процесами. Вважаємо застосування методу дистанційного радіолокаційного зондування ефективним для моніторингу короткострокових рухів топографічної поверхні підземного сховища газу.

Ключові слова: підземне газосховище; диференціальна інтерферометрія; інтерферограма; дистанційне зондування; супутникові радіолокаційні знімки; Sentinel-1.

Рис.: 2. Бібл.: 14.

Вступ. Моніторинг підземних сховищ газу (ПСГ) – це гарантія безперебійної роботи стратегічно важливого об'єкту паливно-енергетичного комплексу. Нові технології дозволяють проводити певні етапи відстеження дистанційними методами неруйнівного контролю, які не потребують зупинки чи зміни режиму експлуатації підприємства, а проводяться незалежно від технологічного процесу об'єкту. Світовий досвід демонструє ефективне використання супутникових знімків для вирішення завдань інженерно-геодезичного моніторингу. Застосування супутникової радіолокаційної інтерферометрії (InSAR), активної технології дистанційного зондування Землі, є потужним інструментом для визначення деформації поверхні та відображення рельєфу на поверхні земної кулі.

Саме дослідження зміни висотного положення топографічної поверхні підземного газосховища є важливим елементом моніторингу. Застосування методики InSAR забезпечує створення суцільної карти вертикальних рухів покрівлі ПСГ. На відміну від дискретних результатів визначення висот реперів, суцільні карти вертикальних деформацій дозволяють виявляти небезпечні прояви: тріщинуватості покрівлі, розгерметизації, зміни агроландшафтів тощо. Зокрема, в багатьох випадках, неналежна експлуатація ПСГ призводить до його розгерметизації, що зумовлює загазованість повітря, проникнення газохімічних сполук у водоносні горизонти, а також виникнення небезпечних зсувних та ерозійних процесів, що викликає зміни ландшафтів природно-територіальних комплексів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням даних супутникової радарної інтерферометрії на важливих енергетичних об'єктах займаються багато науковців. Цікавим є результати такої роботи саме для територій ПСГ [2, 3], аналіз даних якої вказує на виявлення досить чітких змін вертикального переміщення топографічної поверхні з точністю до міліметрів. Результати показують високу кореляцію між періодичним закачуванням і відбором природного газу в/з підземного резервуара та періодичними змінами висоти місцевості над ним (амплітуда змін висоти в сантиметрах), що може дозволити виявити аномальні явища.

Окрім очевидних переваг використання безконтактних методів спостереження, супутникова радарна інтерферометрія забезпечує високу точність та просторову щільність результатів спостережень. За результатами опрацювання, отримують карти вертикальних рухів досліджуваної території. Наявність доступу до баз даних супутникових знімків дозволяє створювати набори даних для аналізу геодинамічної активності території в минулому, а також визначати швидкість переміщення окремих ділянок. Метод використовується для моніторингу природних небезпек, наприклад, землетрусів, виверження вулканів, зсувів; також у структурному проектуванні, зокрема моніторинг просідання та структурної стабільності [4].

Вертикальні переміщення території ПСГ можна відстежити контактними геодезичними методами (геометричне нівелювання, ГНСС вимірювання) [5]. Поєднання дистанційних та наземних методів моніторингу газотранспортної системи та територій підземних сховищ газу удосконалює процес відстеження та виявлення змін у положенні характерних точок рельєфу.

Методи дослідження. Для створення карт вертикальних рухів земної поверхні, на основі супутникових радіолокаційних даних, застосовують два основні підходи: метод диференціальних інтерферограм (DInSAR) [6,7,8] та удосконалений метод диференціальних інтерферограм (A-DInSAR) [9]. Створення диференціальної інтерферограми (Differential InSAR) виконується на основі опрацювання двох радіолокаційних знімків певної території із застосуванням цифрової моделі рельєфу. Принципова відмінність удосконаленого методу диференціальних інтерферограм полягає в опрацюванні часової серії, яка складається з десятків радіолокаційних знімків. У залежності від особливостей опрацювання часових серій знімків, розрізняють методи постійних розсіювачів (PS – Persistent Scatterers Method), коротких базисних ліній (SBAS – Small Baseline Subset). Розв'язок багатьох задач потребує комбінації вказаних підходів [10, 11].

Кожен із вказаних методів має свої переваги та недоліки. Тому вибір методу досліджень проводиться на основі аналізу особливостей об'єкту спостережень, наявності вхідних даних та додаткових даних для верифікації результатів.

Метою даного дослідження є оцінка ефективності застосування методу диференціальної радіолокаційної інтерферометрії для реєстрації вертикальних рухів земної поверхні на території підземного сховища природного газу.

Об'єктом дослідження є територія Богородчанського підземного сховища газу. Вхідними даними для проведення дослідження були радіолокаційні знімки, отримані супутником Sentinel-1, який запущений та функціонує в рамках європейської програми Copernicus. Мінімальний інтервал часу між зніманнями досліджуваної території супутником Sentinel-1 становить 12 днів. Політика відкритого доступу, яка ведеться програмою Copernicus, забезпечує можливість вільного використання даних дистанційного зондування, у тому числі даних супутникових радіолокаційних спостережень.

Порівняння результатів опрацювання диференціальних інтерферограм з результатами незалежних спостережень не проводилось через відсутність додаткових даних наземних вимірювань (часові серії GNSS даних, геометричне нівелювання). Тому інтерпретацію вертикальних рухів на території підземного сховища газу проводили на основі даних про сезонні цикли закачування та викачування газу із газосховища [5]. Для дослідження сезонних вертикальних рухів земної поверхні було обрано період з червня 2020 р. до травня 2021 р. Вказаний період відповідає річному циклу роботи газосховища: розпочинається із закачування газу до сховищ влітку; восени, з початком опалювального сезону, розпочинається відбір газу, який триває до завершення опалювального сезону навесні. Згідно даних АТ «Укртрансгаз» у 2020 році підземні сховища газу в Україні

були заповнені на 82,8%, що в середньому на 30% перевищило показники попередніх та наступних років [12]. Тому, з урахуванням великих обсягів закачування газу, нами очікувалась значна геодинамічна активність поверхні над територією газосховища в період 2020-2021 рр.

Для вказаного періоду часу (червень 2020 р. – травень 2021 р.), до опрацювання було взято 29 супутникових радіолокаційних знімків, отриманих супутником Sentinel-1A, з часовим інтервалом між зніманнями 12 днів. Тип даних – SLC (Single Look Complex Product); режим знімання IW (Interferometric Wide Mode) – широкосмугова інтерферометрія з роздільною здатністю знімка 5*14 м. Для кожної послідовної пари знімків створювалась диференціальна інтерферограма та карта вертикальних рухів території газосховища і прилеглих територій. Загалом отримано 28 деформаційних карт, які показують динаміку вертикальних рухів земної поверхні між зніманнями.

Результати. Відомо, що метод диференціальної радарної інтерферометрії особливо ефективно показує себе у випадку різких просторових рухів земної поверхні впродовж короткого проміжку часу. Прикладами таких ситуацій є зсуви ґрунту, деформації земної поверхні внаслідок землетрусів та вулканічної активності, інші геодинамічні процеси. Ефективність визначення рухів земної поверхні досягається завдяки короткому часовому базису між радарними знімками, мінімальне значення якого становить 12 днів.

Застосування даного методу для території підземного сховища газу показало відсутність аномальних вертикальних переміщень. Суттєвих вертикальних рухів земної поверхні за 12-денні інтервали не відбувалося. Згідно результатів аналізу 28 диференціальних інтерферограм (на основі 29 радіолокаційних знімків) та карт вертикальних рухів земної поверхні, досліджувана територія показувала однакову динаміку з усіма довколишніми ділянками за межами газосховища. Територія промислового майданчику станції, на кожній деформаційній карті, характеризувалася відносною стабільністю, що є свідченням безпеки та експлуатаційної надійності газоперекачувального обладнання.

На кількох картах зафіксовано вертикальні рухи, які вирізнялися із загальної тенденції: точкові осідання при загальній динаміці підняття; підняття окремих ділянок при відсутності вертикальних рухів на решті території.

На рис.1 представлено карту вертикальних рухів земної поверхні території газосховища, отриману методом диференціальної радіолокаційної інтерферометрії на основі супутникового знімання, виконаного 29.07.2020 р. та 10.08.2020 р. В межах контуру газосховища спостерігаємо різну динаміку поверхні: в центральній частині території, в межах промислового майданчику, вертикальні рухи близькі до нуля; в напрямку з південного-заходу на північний-схід території спостерігаємо точкові підняття на рівні 10-15 мм, які співпадають з положенням експлуатаційних свердловин; територія в північно-східній частині зазнала підняття в межах 20-30 мм. Оскільки період спостереження співпадає з режимом закачування газу в сховище, то можемо інтерпретувати отримані результати як піднімання гирла свердловин та окремих територій в результаті збільшення тиску в газосховищі. Величини отриманих значень відповідають результатам геометричного нівелювання, які систематично проводяться на даному газосховищі, та описані в роботі [13].

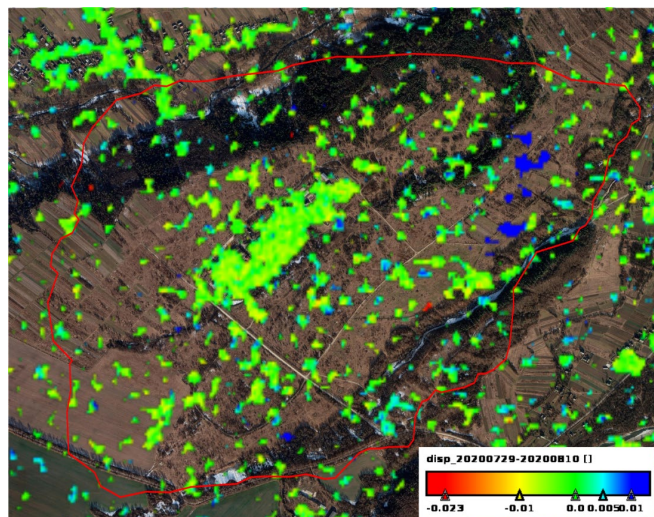


Рис. 1. Карта вертикальних рухів земної поверхні на території газосховища (знімання 29.07.2020 – 10.08.2020): одиниці вимірювання – метри;
— контур газосховища

На рис.2 представлено карту вертикальних рухів земної поверхні території газосховища, отриману на основі супутникового знімання, виконаного 25.04.2021 р. та 07.05.2021р. Переважна більшість території на отриманій карті стабільна у вертикальному положенні. Також спостерігається тенденція до підняття в межах 10 мм. Але ця тенденція притаманна не лише території газосховища, але й поза його межами. Тому не пов'язуємо цю динаміку з технологічними процесами. Однак, на карті чітко прослідковуються точкові ділянки осідань, які розосереджені на всій території газосховища. Положення цих ділянок відповідає розташуванню свердловин. Величини визначених осідань знаходяться в межах від -15 мм до -19 мм. На окремих свердловинах зафіксовано осідання -23 мм та -26 мм. Період спостереження 25.04.2021-07.05.2021рр. відповідає режиму завершення відкачування газу зі сховища. Об'єми газу, а відповідно і тиск, у цей період мінімальні. Тому спостерігаємо осідання гирл свердловин.

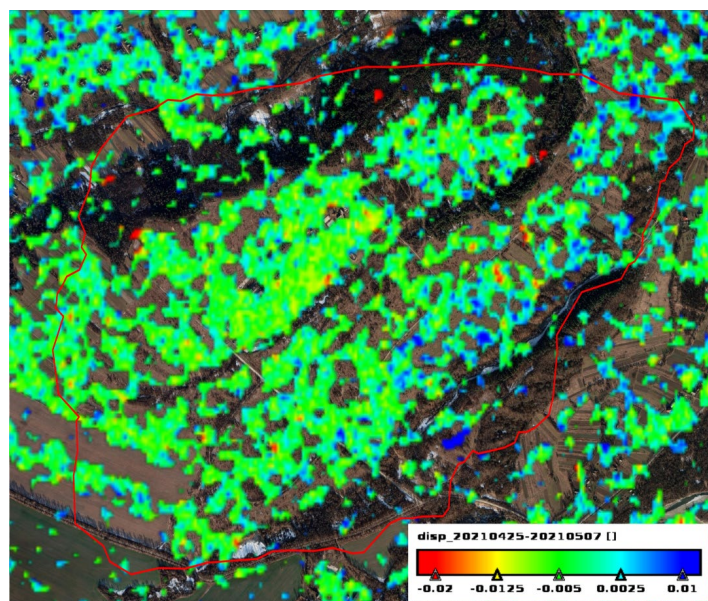


Рис. 2. Карта вертикальних рухів земної поверхні на території газосховища (знімання 25.04.2021 – 07.05.2021): одиниці вимірювання – метри;
— контур газосховища

За результатами опрацювання кожної пари знімків отримуємо суцільні карти вертикальних рухів земної поверхні. Проте надійність результатів для кожного пікселя карти відрізняється. Вона визначається рівнем когерентності сигналу – відношення прийнятого та відбитого сигналу (0 – найменше значення; 1 – найбільше значення). На рис. 1 і рис. 2 представлено деформаційні карти із значеннями когерентності вище 0,4. Шляхом відсіювання некогерентних точок вдалося виключити з аналізу ненадійні результати. Найбільше значення когерентності досягається при радіолокаційному зніманні територій з будівлями та штучним покриттям, тоді як території з рослинним покривом та лісові масиви мають низький рівень когерентності. Тому, з метою покращення відбиваючої здатності досліджуваної території та пониження шумів відбитого сигналу, рекомендується встановлювати наземні кутові відбивачі на ділянках з рослинним покривом та біля гирл свердловин [14].

Висновки.

1. Застосування методу диференціальної інтерферометрії, для території Богородчанського підземного сховища газу, показало відсутність швидких вертикальних рухів земної поверхні впродовж річного циклу роботи газосховища.

2. Завдяки застосованому методу, зафіксовано вертикальні рухи (осідання/підняття) гирл експлуатаційних свердловин спричинені циклічним змінам тиску в процесі технічної експлуатації газосховища. Середня величина осідання свердловин в результаті відкачування газу становила 15-19 мм; максимальна величина осідання досягла -26 мм. В період закачування газу до сховища зафіксовано підняття свердловин в середньому на 10-15 мм; максимальна величина підйому досягала +30 мм.

3. Враховуючи малі величини вертикальних рухів покрівлі газосховища та гирл свердловин, вважаємо перспективним використання удосконаленого методу диференціальної інтерферометрії, зокрема метод постійних розсіювачів (Persistent Scatterer Interferometry), що і буде предметом наших подальших досліджень. Важливо доповнювати дані радіолокаційного зондування території результатами наземних вимірів (часові серії ГНСС спостережень, геометричне нівелювання).

4. Для покращення співвідношення сигнал-шум на радіолокаційних знімках для територій підземного сховища газу рекомендуємо встановлювати наземні кутові відбивачі різних конструкцій. Це особливо важливо в місцях розташування гирл свердловин та вздовж основних ліній геометричного нівелювання.

Список використаних джерел

1. Олесків, Р. Є. Дослідження напружено-деформованого стану свердловин підземних сховищ газу на основі геодезичних вимірів : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.24.01 / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ : КНУБА, 2017.

2. Rapant, P. Radar Interferometry as a Comprehensive Tool for Monitoring the Fault Activity in the Vicinity of Underground Gas Storage Facilities / P. Rapant, J. Struhárand, M. Lazický // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, Is. 2. – P. 271. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020271>.

3. Monitoring Non-Linear Ground Motion above Underground Gas Storage Using GNSS and PS InSAR Based on Sentinel-1 Data. / J. Struhár, P. Rapant, M. Kačmařík, I. Hlaváčová M. Lazický // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, Is. 19. – P. 4898. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14194898>.

4. Гордієнко, О. Метод супутникової радарної інтерферометрії [Електронний ресурс] / О. Гордієнко // GEOTERRACE-2018 : Міжнар. наук.-тех. конф. молод. вчених (м. Львів, 13-15 груд. 2018). – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. – Режим доступу: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/24699/1/GeoTerrace-2018.pdf>

5. Perovych, L. Seasonal deformation processes at underground gas storage station. Baltic surveying / L. Perovych, S. Begin // International scientific journal. – 2017. – Vol. 6. – P. 83-86.

6. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuella case study / M. P. Sanabria, C. Guardiola-Albert, R. Tomás, G. Herrera, A. Prieto, H. Sánchez, S. Tessitore // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2014. – Vol. 14, Is. 5. – P. 1341-1360. Di: <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
7. Cyntia, C. Subsidence analysis in DKI Jakarta using Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) Method / C. Cyntia, I. P. Pudja // *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*. – 2018. – № 2(3). – P. 118-127.
8. Suhadha, A. G. Dynamic Displacement using DInSAR of Sentinel-1 in Sunda Strait / A. G. Suhadha, A. Julzarika // *Trends in Sciences*. – 2022. – № 19 (13). – P. 4623. DOI: <https://doi.org/10.48048/tis.2022.4623>
9. Advanced differential interferometry synthetic aperture radar techniques for deformation monitoring: a review on sensors and recent research development / M. O. Idrees, S. Vahideh, P. Biswajeet, Y. Ahmed // *Geocarto International*. – 2014. – № 29 (5). – P. 536-553.
10. Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic / K. Fárová, J. Jelének, V. Kopačková-Strnadová, P. Kycl // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, Is. 22. – P. 2670. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11222670>.
11. Pawluszek-Filipiak, K. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland / K. Pawluszek-Filipiak, A. Borkowski // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P. 242. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020242>.
12. АТ «Укртрансгаз». ГТС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/kjlum>, <http://utg.ua/utg/gts/description/>
13. Олесків Р.С. Прогнозна модель вертикальних рухів земної поверхні / Р. С. Олесків, В. М. Сай // *Геодезія, картографія та аерофотознімання*. – 2015. – Вип. 81. – С. 82-89.
14. Кухтар, Д. Застосування наземних кутових відбивачів для супутникового радіолокаційного моніторингу [Електронний ресурс] / Д. Кухтар, В. Яцик // *Геофорум-2023 : матеріали Міжнар. наук.-тех. конф. (м. Львів, 19-21 квіт. 2023)*. – Львів, 2023. – С. 65-66. – Режим доступу: <http://surl.li/kjnfa>

References

1. 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].
2. Rapant, P., Struhar, J. and Lazecky, M. (2020). Radar Interferometry as a Comprehensive Tool for Monitoring the Fault Activity in the Vicinity of Underground Gas Storage Facilities. *Remote Sensing*, 12, 2:271. <https://doi.org/10.3390/rs12020271>.
3. Struhar, J., Rapant, P., Kacmarik, M., Hlavacova, I. and Lazecky, M. (2022). Monitoring Non-Linear Ground Motion above Underground Gas Storage Using GNSS and PS InSAR Based on Sentinel-1 Data. *Remote Sensing* 14, 19:4898. <https://doi.org/10.3390/rs14194898>.
4. Gordienko, A. (2018). Satellite radar interferometry method. *Proceedings of international conference of young scientists GeoTerrace-2018*. December 13–15, 2018, Lviv, Ukraine. Lviv, 2018. P.88-22.
5. Perovych, L., Begin, S. (2017). Seasonal deformation processes at underground gas storage station. Baltic surveying. *International scientific journal*, 6, 83-86.
6. Sanabria, M. P., Guardiola-Albert, C., Tomas, R., Herrera, G., Prieto, A., Sanchez, H. and Tessitore, S. (2014). Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuella case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1341–1360. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
7. Cyntia, C., & Pudja, I. P. (2018). Subsidence analysis in DKI Jakarta using Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) Method. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, 2(3), 118-127.
8. Suhadha, A. G. & Julzarika, A. (2022). Dynamic Displacement using DInSAR of Sentinel-1 in Sunda Strait. *Trends in Sciences*, 19(13), 4623. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.4623>

9. Idrees, M. O., Vahideh, S., Biswajeet, P. and Ahmed, Y. (2014). Advanced differential interferometry synthetic aperture radar techniques for deformation monitoring: a review on sensors and recent research development. *Geocarto International*, 29(5), 536-553.

10. Farova, K., Jelenek, J., Kopackova-Strnadova, V. and Kycl, P. (2019). Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovicky Landslide, Czech Republic. *Remote Sensing*, 11, 22:2670. <https://doi.org/10.3390/rs11222670>.

11. Pawluszek-Filipiak, K. and Borkowski, A. (2020). Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland. *Remote Sensing*, 12, 2:242. <https://doi.org/10.3390/rs12020242>.

12. Ukrtransgaz JSC. (n.d.). <http://utg.ua/utg/gts/description/>

13. Oleskiv, R. Ye., Sai, V.M. (2015) Predictive model of vertical movements of the Earth's surface. *Geodesy, Cartography and Aerial Survey: Interdepartmental scientific and technical collection*, 81, 82-89.

14. Kukhtar, D., Yatsyk, V. (2023). Application of ground corner reflectors for satellite radar monitoring. *Proceedings of 26th International Scientific and Technical Conference «Geoforum – 2023»*. April 19–21, 2023. Lviv, 2023. P. 65-66. <http://surl.li/kjnfa>

Denys Kukhtar¹, Roksolana Oleskiv²

¹ PhD in Technical Sciences, Department Geodesy and Land Management
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
(Ivano-Frankivsk, Ukraine)

E-mail: denys.kukhtar@nung.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

² PhD in Technical Sciences, Department Geodesy and Land Management
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
(Ivano-Frankivsk, Ukraine)

E-mail: roksolanaoleskiv@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-3028>

DIFFERENTIAL RADAR INTERFEROMETRY METHOD FOR MONITORING THE AREAS OF UNDERGROUND GAS STORAGE STATION

Abstract. A complex system of hydrocarbon storage in depleted fields requires uninterrupted control over the safety of operation of a strategically important energy facility. Since the pressure drops in the gas storage have a cyclical nature (gas is pumped up in the fall, and gas is withdrawn in the spring), the vertical movements of the earth's surface (the roof of the storage) that are recorded on the physical surface of the object are also cyclical in nature. Using the method of differential interferometry, it is possible to remotely track the vertical movement of the topographic surface of the object in order to detect dangerous manifestations to prevent the occurrence of critical situations. The work presents the results of processing 29 satellite radar images acquired by the Sentinel-1A satellite, with a 12-day time interval between acquisitions for the period from June 2020 to May 2021. This period is related to the full cycle of the underground gas storage operation: seasonal pumping and gas extraction. For each consecutive pair of images, a differential interferogram was created and a map of vertical movements of the topographic surface of the gas storage and adjacent territories was developed. Finally 28 deformation maps were obtained, which show the dynamics of vertical movements of the Earth's surface between acquisitions. The application of the differential interferometry method for the territory of the Bogorodchany underground gas storage facility showed the absence of rapid vertical movements of the earth's surface during the annual cycle of the gas storage facility, which indicates the stable operation. The average amount of subsidence of the topographic surface of the gas storage as a result of gas pumping was 15-19 mm; the maximum amount of subsidence reached -26 mm. During the period of gas injection, the ground surface of the facility lifted by 10-15 mm; the maximum lifting value reached +30 mm. Such data agree with results of ground measurements, therefore the applied remote sensing method is effective for the topographic surface monitoring of the underground gas storage.

Keywords: underground gas storage; differential interferometry; interferogram; remote sensing; satellite radar images, Sentinel-1.