



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.247>

УДК 528.88

## Методика дистанційного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні за даними радарної інтерферометрії

Т. А. Орленко\*

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Усі явища та процеси, що відбуваються на земній поверхні, тісно пов’язані між собою. Землі властиві внутрішні та зовнішні планетарні геологічні процеси, які упродовж всього геологічного розвитку планети призводять до її зміни. Швидкість та масштаби геологічних процесів змінюються в часі та просторі під впливом, зокрема, кліматичних змін. Зміни поділяються на тривалі та миттєві, які спричиняють катастрофічні явища, зокрема зсуви. Важливою складовою геоекологічних досліджень є моніторинг зсувних процесів за допомогою даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). У статті протестовано та експериментально обґрунтовано можливість дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів, для чого використано супутникову радіолокаційну інтерферометрію. Тестовим полігоном було обрано правобережжя Канівського водосховища з великою кількістю зареєстрованих зсувів. Отримано результати активності зсувів за весняний період з 2015 по 2023 роки. У рамках дослідження було ретельно визначено найбільш активні зсувні ділянки, на яких спостерігаються істотні амплітудні коливання. Геоекологічний моніторинг активізації зсувних процесів на детальному рівні проведено за супутниковими знімками Sentinel-1, цифровою моделлю рельєфу (DEM), топографічними картами різних масштабів та геологічними картами четвертинних та дочетвертинних відкладів. Перевагою дослідження зсувних процесів дистанційними методами є можливість оперативно, на великих площах, з досить високою точністю та мінімальними економічними витратами вирішувати завдання природоохоронного напрямку для забезпечення сталого розвитку довкілля та суспільства.

**Ключові слова:** зсуви, радарні зображення, диференціальна радарна інтерферометрія, вертикальні зміщення, цифрова модель рельєфу.

© Т. А. Орленко. 2023

### Вступ

Моніторинг зміщень земної поверхні за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та здійснення їх тематичної інтерпретації з геологічних позицій є одним із методів дослідження зсувів, що відрізняється оперативністю, територіальним охопленням і, за допомогою сучасної супутникової інформації, високою розрізненістю.

Активізація зсувних процесів у межах Києво-Стайківського зсувного району (Демчишин, 1981) відбувається унаслідок перезволоження розчленованої лесової височини із сірими та темно-сірими опідзоленими ґрунтами (Ліщенко, 2014). Причиною формування зсувних процесів у межах Києво-Стайківського зсувного району є залягання двох глинистих горизонтів, верхній – гідрофільні бурі та строкаті глини нижнього плейстоцену-міоцену, нижній – олігоценеоценові глини харківської та київської світ (Беспалова, 2001; Ліщенко та ін., 2017). Тому для зсувів в межах Ржищівської територіальної громади характерною є складна будова з повторною активізацією на певних ділянках.

\* E-mail: [tetianaorlenko@ukr.net](mailto:tetianaorlenko@ukr.net)

У дослідженні розглянуто можливість комплексного геоекологічного моніторингу зсувних процесів за космічними знімками радарного супутника із синтезованою апертурою Sentinel-1, просторовою розрізненістю 10 м (Ferretti et al., 2000; Hererra et al., 2013). Кожне радарне зображення (SAR) містить дві основні характеристики – фазу та амплітуду. Фаза містить інформацію про відстань від датчика до цілі, яка використовується для вимірювання руху поверхні землі в часі. Амплітуда пов’язана з енергією відбитого розсіяного сигналу та використовується для виявлення зміщень ґрунту.

Методика застосування радарної інтерферометрії полягає в обробці пари радіолокаційних зображень на основі даних їх когерентності (Bejar-Pizarro et al., 2017). Застосування цієї методики має обмеження, які впливають на точність вимірювання деформацій (Casagli et al., 2016). Часова, геометрична декореляція та вплив атмосферних збурень зменшують якість просторової та часової когерентності, негативно впливаючи на можливість дослідження зсувів (Hein, 2004; Stankevich et al., 2017).

Метою дослідження є дистанційний геоекологічний моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні з визначенням активних зсувних ділянок. Для досягнення зазначеної мети представлено методику, яка заснована на

використанні даних радіолокаційного знімання. Використання радіохвиль дає змогу радарним системам проводити моніторинг, незважаючи на відсоток наявної хмарності та час доби. Інформація, отримана в результаті опрацювання радіолокаційних даних, є основою для організації детального дослідження території та прогнозування геодинамічної ситуації.

## Матеріали і методи

Точність визначення просторового розміщення кожної точки поверхні або цілі залежить від шумів, що впливають на спостережувані показники, та від достовірності інформації про параметри знімальної системи, що визначають змінні. Найбільш чутливими є параметри базової лінії, оскільки незначна зміна фазового центра суттєво впливає на інтерферометричну фазу (Wang, 2021). На зворотний сигнал розсіювання впливають: вид розчленування рельєфу, його ступінь, тип рослинності, ступінь зволоження поверхні, характер пухких відкладів (Kril, Shekhunova, 2019).

Покроковий алгоритм створення картосхеми вертикальних зміщень земної поверхні зображено на Рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритму створення картосхеми вертикальних зміщень

Для обробки даних супутникової радіолокаційної інтерферометрії використовувалося програмне забезпечення Sentinel Application Platform (SNAP) з відкритим вихідним кодом, надане ESA (Engdahl et al., 2017).

Радіолокаційні знімки супутника Sentinel, що використані в дослідженні, підібрано з урахуванням параметрів орбіти, напрямку знімання супутника, часових характеристик та значень базової лінії. Для зменшення ризику тимчасової декореляції інтерферометричної фази час між отриманням першого та другого космічного знімка має бути найкоротшим. Відстань між положенням супутника на момент отримання зображення має становити від 300 до 500 метрів. З метою створення інтерферограма, використовувалися інтерферометричні продукти Single Look Complex (SLC) з часовою різницею 12 днів, у низхідній геометрії, для визначення

вертикальних змін земної поверхні, за весняний період з 2015 по 2023 роки.

Головним етапом генерації інтерферограма є спільна коресстрація космічних зображень (Рис. 2).

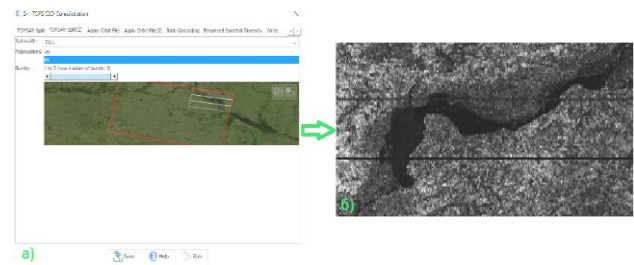


Рис. 2. Проведення коресстрації вихідних зображень: а – алгоритм коресстрації, б – отриманий розподіл інтенсивності сигналу

Зображення скомпільовані в спільний стек, в якому кожна точка земної поверхні має однакові координати. Наступним кроком є застосування оператора Deburst з меню панелі інструментів SNAP для компіляції всіх даних в одне зображення (Rott and Nagler, 2006). Після цього сформовано інтерферограму та видалено топографічну фазу (Рис. 3).

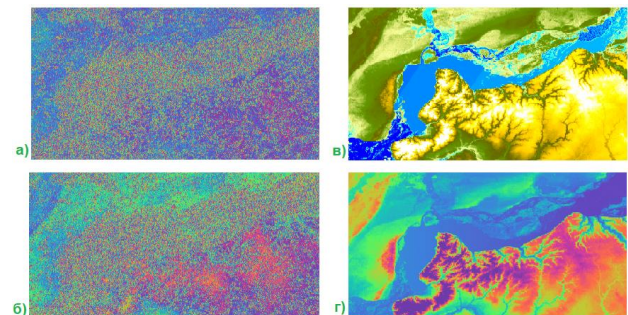


Рис. 3. а – інтерферограма після об'єднання, б – фаза інтерферограма після видалення топографічної фази, в – завантажена автоматично модель DEM для досліджуваної території, г) – топографічна фаза Канівського водосховища

Цей крок дав змогу отримати відфільтровані значення, з видаленими помилковими спалахами, для коректного відображення відношення сигнал/шум. Наступним етапом є розгортка попередньо сформованої фази за допомогою (Bamler et al., 1998, Costantini, 1998) модуля SNAP (Рис. 4).

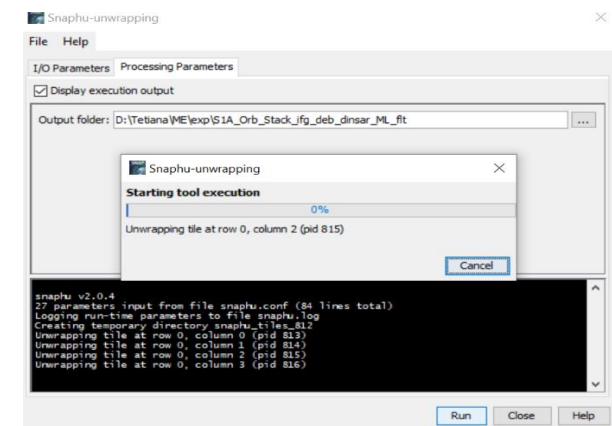


Рис. 4. Розгортка інтерферометричної фази

Методика побудови карти вертикальних зміщень ґрунтується на застосуванні даних розгорнутої інтерферометричної фази їх переведення із радіан у метри.

Значення фази інтерферограми (Peltzer, Rosen, 1995) до вертикальних зміщень переводиться за допомогою такого рівняння:

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi_d, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – це довжина хвилі SAR Sentinel-1 в діапазоні C, а  $\Delta\varphi_d$  – різниця фаз між двома SLC зображеннями без розгортки.

З урахуванням особливостей досліджуваної ділянки абсолютні значення вертикальних зміщень отримані автором за формулою:

$$\frac{0.056 * Unw_{Phase_{ifg}}}{-4 * Pi * cos(rad(incident\ angle))}, \quad (2)$$

де  $Unw_{Phase_{ifg}}$  – отримані значення розгорнутої фази,  $incident\ angle$  – кут нахилу супутника, 0.056 – значення довжини хвилі Sentinel-1 у метрах.

Для того, щоб аналіз сигнатур отриманих значень вертикальних зміщень інтерферограми можна було оцінити належним чином, відношення сигнал/шум автором збільшено до 0,5 та відкинуто значення когерентності менше 0,3. Оскільки вони відповідають за відбиття рослинності на знімку, частково воду та неверифіковані піксели, до того ж тестова ділянка – це досить заліснений берег Канівського водосховища. Також вибрано точки за методом постійних відбивачів, для яких зміщення дорівнюють нулю. Це поля, що не обробляються з 2013 року та мають сталий рівень рослинності під час весняного періоду. У такий спосіб отримано відфільтровані значення когерентності зображення, без впливу рослинності на досліджуваній території. Проведено повторну корекцію результатів вже з урахуванням значень на цих ділянках. Відстані на радарних зображеннях спотворюються через топографічні варіації зображень та нахил осі огляду датчика супутника. Корекція рельєфу компенсує ці спотворення. Отримане геометричне зображення максимально наближене до реальної поверхні землі.

За результатами інтерферометричного оброблення ретроспективних радарних даних усієї зони дослідження отримано характеристики деформацій земної поверхні, а саме значення вертикальних зсувів земної поверхні (Рис. 5). 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”.

## Результати

Тестовим полігоном було обрано правобережжя Канівського водосховища на ділянці Витачів-Стайки, а саме, кар’єр північніше с. Стайки з великою кількістю зареєстрованих зсувів (Рис. 6).

За результатами аналізу вертикальних зміщень визначено ділянки місцевості з поширенням

вертикальних зміщень земної поверхні, які зображені на Рис. 7.

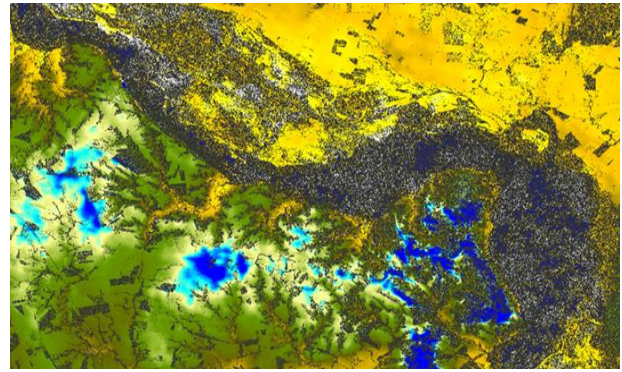


Рис. 5. Зображення картосхеми зміщень із замаскованими областями низької когерентності для територій, що знаходяться під впливом Канівського водосховища



Рис. 6. Багатоспектральний знімок кар’єру північніше с. Стайки. Правобережжя Канівського водосховища

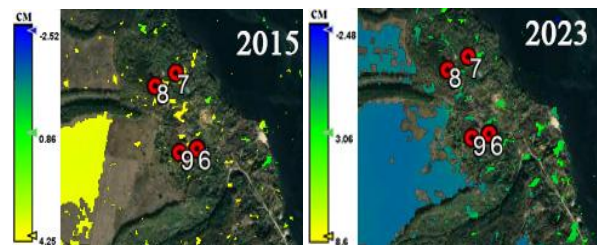


Рис. 7. Вертикальні зміщення земної поверхні в межах тестових ділянок у кар’єрі північніше с. Стайки за березень 2015 та 2023 років

Отримані результати показують, що вертикальне зміщення земної поверхні є сталим як у 2015, так і в 2023 роках у межах досліджуваного кар’єру (точки 6, 7, 8, 9 на Рис. 7). Карта зміщень земної поверхні, створена за методикою радарної інтерферометрії в межах ділянки Витачів-Стайки (зокрема, кар’єр північніше с. Стайки) забезпечує можливість фіксації диференційованого характеру сучасних деформацій. З огляду на аналіз досліджуваної ділянки можна констатувати, що вертикальне зміщення поверхні є сталим для певних ділянок. Спостерігалась активізація визначених зсувів у певні роки, що й було зафіксовано на побудованих картах вертикальних зміщень земної поверхні по роках у період з квітня по травень із 2015 по 2023 роки (Рис. 8).

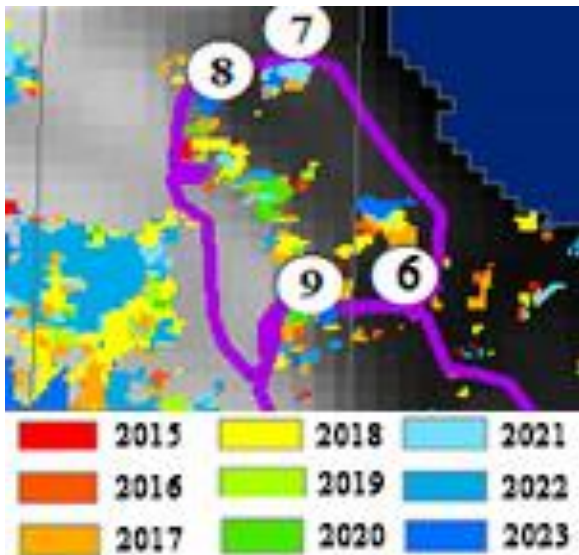


Рис. 8. Зведена картосхема зміщень земної поверхні в межах кар'єру північніше с. Стайки. Правобережжя Канівського водосховища

## Висновки

Методика диференціальної радарної інтерферометрії дає змогу здійснювати моніторинг зміщень земної поверхні в реальному часі та оперативно отримувати актуальні дані. У результаті проведених досліджень проаналізовано геоecологічні умови досліджуваної території та фактори інтенсифікації зсувних процесів, проаналізовано можливості застосування даних дистанційного зондування Землі для виявлення зсувонебезпечних ділянок та методи їх тематичної обробки. Розроблено методику дистанційного геоecологічного моніторингу зсувів на основі даних радіолокаційного знімання з оціненням вертикальних зміщень.

Проведені наземні спостереження зсувів на правобережжі Канівського водосховища показали, що зсувні ділянки в межах дослідної ділянки активізуються в певні роки залежно від кількості й характеру опадів. Підтверджено ефективність застосування супутникових радіолокаційних даних для картування потенційних зсувних ділянок. У поєднанні з геолого-геофізичними, геоморфологічними та структурно-тектонічними даними диференціальна радарна інтерферометрія дає змогу отримати достовірні результати щодо розвитку зсувних процесів та надати рекомендації щодо мінімізації їхнього негативного впливу на сталий розвиток природного середовища.

## Література

- Беспалова, О. М. (2001). Типи зсувних зміщень правобережжя Середнього Дніпра як відображення мікроструктури глинистих ґрунтів. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*, 82–90.
- Демчишин, М. Г. (1991). Геологическая среда Киева. *Геол. журн.*, 2(257), 14–24.
- Ліщенко, Л. П., Пазинич, Н. В., Терemenko, О. М. (2014). Дослідження зсувних процесів на території м. Києва в режимі дистанційного моніторингу. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 2, 2014, 29–34.

- Ліщенко, Л. П., Пазинич, Н. В., Філіпович, В. Є. (2017). Супутниковий моніторинг розвитку зсувних процесів в Придніпровській зоні м. Києва. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 15, 11–22. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2017.15.111>.
- Bamler, R., Adam, N., Davidson, G. W., Just, D. (1998). Noise-induced slope distortion in 2-D phase unwrapping by linear estimators with application to SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 913–921. <https://doi.org/10.1109/36.673682>.
- Bejar-Pizarro, M., Notti, D., Mateos, R. M., Ezquerro, P., Centolanza, G., Herrera, G. ... Fernández, J. (2017). Mapping vulnerable urban areas affected by slow-moving landslides using Sentinel-1 InSAR Data. *Remote Sensing*, 9, 876–893. <https://doi.org/10.3390/rs9090876/>.
- Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Hölbling, D., Füreder, P., Righini, G. ... Bianchi, M. (2016). Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: examples from the EC-FP7 project SAFER. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ*, 4, 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.07.001>.
- Costantini, M. (1998). A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 813–821. <https://doi.org/10.1109/36.673674>.
- Engdahl, M., Veci, L., Lu, J., Fomferra, N., Pratts-Iraola, P., Fomelis, M. (2017) 'SNAP and the Sentinel-1 Toolbox for TOPS Interferometry' In Abstract Book of 10th International Workshop on Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR (Fringe 2017), Helsinki: ESA.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>.
- Herrera, G., Gutiérrez, F., García-Davalillo, J. C., Guerrero, J., Notti, D., Galve, J. P., Cooksley, G. (2013). Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley Case Study (central spanish pyrenees). *Remote Sensing of Environment*, 128, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.020>.
- Hein, A. (2004). *Processing of SAR Data Fundamentals, Signal Processing, interferometry*. Berlin: Springer.
- Kril, T., Shekhunova, S. (2019). Terrain elevation changes by radar satellite images interpretation as a component of geo-environmental monitoring. 13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903176>.
- Peltzer, G., Rosen, P. A. (1995) Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, earthquake observed by SAR interferometry. *Science*, 268, 1333–1336.
- Rott, H., Nagler, T. (2006). The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37(4), 710–719. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.059>.
- Stankevich, S., Piestova, I., Titarenko, O., Filipovych, V., Samberg, A., Dudar, T.; Svideniuk, M. (2018). Urban area geodynamic risk mapping using long-term time series of sentinel-1 satellite radar interferometry. *Information Security: An International Journal*, 40(1), 39–50. <https://doi.org/10.11610/isij.4003>.
- Wang, Y., Zhang, K., Gong, F., Mu, J., Liu, S. (2021). Interferometric phase reconstruction based on probability generative model: Toward efficient analysis of high-dimensional SAR stacks. *Remote Sensing*, 13(12), 2369. <https://doi.org/10.3390/rs13122369>.

## References

- Bamler, R., Adam, N., Davidson G. W., Just, D. (1998). Noise-induced slope distortion in 2-D phase unwrapping by linear estimators with application to SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 913–921. <https://doi.org/10.1109/36.673682>.
- Bejar-Pizarro, M., Notti, D., Mateos, R. M., Ezquerro, P., Centolanza, G., Herrera, G. ... Fernández, J. (2017) Mapping vulnerable urban areas affected by slow-moving landslides using Sentinel-1 InSAR Data. *Remote Sensing*, 9, 876–893. <https://doi.org/10.3390/rs9090876/>.
- Bespalova, O. M. (2001). Types of landslide displacements of the right bank of the Middle Dnieper as a reflection of the microstructure of clayey soils. *Collection of scientific papers of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 82–90.
- Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Hölbling, D., Füreder, P., Righini G., ... Bianchi, M. (2016) Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: examples from the EC-FP7 project SAFER. *Remote Sensing Appl. Soc. Environ*, 4, 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.07.001>.
- Costantini, M. (1998). A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 813–821. <https://doi.org/10.1109/36.673674>.
- Demchyshyn, M. G. (1991). Geological environment of Kyiv. *Geologichnij zhurnal*, 2(257), 14–24.
- Engdahl, M., Veci, L., Lu, J., Fomferra, N., Pratts-Iraola, P., Fomelis, M. (2017) 'SNAP and the Sentinel-1 Toolbox for TOPS Interferometry' In Abstract Book of 10th International Workshop on Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR (Fringe 2017), Helsinki: ESA.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>.
- Herrera, G., Gutiérrez, F., García-Davalillo, J. C., Guerrero, J., Notti, D., Galve, J. P., Cooksley, G. (2013). Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley Case Study (central Spanish pyrenees). *Remote Sensing of Environment*, 128, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.020>.
- Hein, A. (2004). *Processing of SAR Data Fundamentals, Signal Processing, interferometry*. Berlin: Springer.
- Kril, T., Shekhunova, S. (2019). Terrain elevation changes by radar satellite images interpretation as a component of geo-environmental monitoring. 13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903176>.
- Lishchenko, L. P., Pazynych, N. V., Filipovych, V. E. (2017). Satellite monitoring of the development of landslide processes in the Dnieper zone of Kyiv. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 15, 11–22. <https://doi.org/10.36023/ujsr.2017.15.111>
- Lishchenko, L. P., Pazynych, N. V., Teremenko, O. M. (2014). Study of landslide processes on Kyiv's territory in remote monitoring mode. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 2, 2014, 29–34.
- Peltzer, G., Rosen, P. A. (1995) Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, earthquake observed by SAR interferometry. *Science*, 268, 1333–1336.
- Rott, H., Nagler, T. (2006). The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37(4), 710–719. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.059>.
- Stankevich, S., Piestova, I., Titarenko, O., Filipovych, V., Samberg, A., Dudar, T.; Svideniuk, M. (2018). Urban area geodynamic risk mapping using long-term time series of Sentinel-1 satellite radar interferometry. *Information Security: An International Journal*, 40(1), 39–50. <https://doi.org/10.11610/isij.4003>.
- Wang, Y., Zhang, K., Gong, F., Mu, J., Liu, S. (2021). Interferometric phase reconstruction based on probability generative model: Toward efficient analysis of high-dimensional SAR stacks. *Remote Sensing*, 13(12), 2369. <https://doi.org/10.3390/rs13122369>.

## VERTICAL DISPLACEMENT MONITORING TECHNIQUE USING RADAR INTERFEROMETRY DATA

Tetiana Orlenko

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

All phenomena and processes occurring on the Earth's surface are closely related. Earth is characterized by internal and external planetary geological processes, which, throughout the entire geological development of the Earth, lead to its change. The speed and scale of geological processes change in time and space due to climatic changes. Changes are divided into long-term and momentary ones, which cause catastrophic phenomena, including landslides. An essential component of geoecological research is monitoring landslide processes using data from remote sensing of the Earth. The possibility of remote geoecological monitoring of landslide processes using satellite radar interferometry has been investigated, tested and experimentally substantiated. The right bank of the Kaniv Reservoir, with many registered landslides, was chosen as the test site. The results of the activity of vertical displacements of landslides for the spring period from 2015 to 2023 were obtained. Nine test sites and five control, stable areas affected by active surface deformations were investigated using 45 Sentinel-1A images. Geoecological monitoring of the activation of landslide processes at a detailed level was carried out using Sentinel-1 satellite images, a digital terrain model (DEM), topographic maps of various scales, and geological maps of Quaternary and pre-Quaternary structures. The advantage of the study of landslide processes by remote methods is the ability to quickly, on large areas, with relatively high accuracy and minimal economic costs, solve the problems of environmental protection to ensure the sustainable development of the environment and society.

**Key words:** displacements, radar images, differential radar interferometry, vertical displacements, digital terrain model.

Рукопис статті отримано 14.09.2023  
Надходження остаточної версії: 22.09.2023  
Публікація статті: 29.09.2023