

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 502.3/7

Oleksandr Trofymchuk¹, Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of NASU, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

Oleksandr Hordiienko¹, Junior Researcher of the Department of natural resources

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4891-3410> **e-mail:** gordiienko.ov@gmail.com

Yevheniia Anpilova^{1,2}, PhD, Senior Researcher of the ¹Department of natural resources; ²Department Computational Hydrosystems

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4107-0617> **e-mail:** yevheniia.anpilova@ufz.de

Yevhenii Yakovliev¹, Dr.Sc., Chief Researcher of the Department of environment research

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015> **e-mail:** yakovlevhydro@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space, National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²UFZ-Helmholtz Centre for Environmental Research, Permoserstr., Leipzig, Germany

MONITORING VERTICAL LANDSLIDES IN THE SOLOTVYNO AGLOMERATION USING SENTINEL-1 SATELLITE IMAGERY

Abstract. *The Synthetic Aperture Radar (SAR) equipped Sentinel-1 satellites are a valuable source of Earth observation data. They provide a spatial resolution of 10 to 20 metres, depending on the imaging mode. Unlike optical sensors, SAR radars can operate day and night, in cloudy weather and in the absence of sunlight. This makes them a reliable source of data in all conditions. Google Earth Engine (GEE), in turn, includes dual-polarisation Sentinel-1 data in its large and up-to-date archive. Since GEE does not have a single lookup complex (SLC) that allows standard methods to investigate changes in terrain, the authors set out to build a model based on the Random Forest (RF) machine learning library built into GEE that would be well suited to detecting natural and anthropogenic changes in the gypsometric structure of the terrain.*

In this article we analyse Sentinel-1 satellite radar images and automatically obtain data on the location of significant relief changes. Our research area is the natural and anthropogenic zones covering the agglomeration of the village of Solotvyno and the fields of flooded salt mines with active development of karst forms and areas with vertical relief shifts. Maps and graphs of changes and deformations in the agglomeration of Solotvyno were prepared on the basis of satellite radar images.

The authors developed a Random Forest machine learning algorithm to detect local vertical displacements of the earth's surface, which has advantages over other algorithms and is data-free (SLC). The algorithm is based on the classification of the earth's surface and identifies well the areas where relief displacements are filled with water, and allows to increase the accuracy of the assessment of hazardous areas of surface deformations (landscapes) in the area of residential, industrial, recreational facilities, important critical infrastructure.

Keywords: remote sensing, SAR, relief deformation, natural and anthropogenic changes, monitoring, environmental protection.

О.М. Трофимчук¹, О.В. Гордієнко¹, Є.С. Анпілова^{1,2}, Є.О. Яковлев¹

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Центр екологічних досліджень ім. Гельмгольца, Лейпциг, Німеччина

МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗСУВІВ У СОЛОТВИНСЬКІЙ АГЛОМЕРАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ SENTINEL-1

Анотація. Супутники Sentinel-1, обладнані радіолокаційними системами із синтезованою апертурою (РСА), є цінним джерелом даних для спостереження за Землею. Вони забезпечують просторову роздільну здатність від 10 до 20 метрів, залежно від режиму зйомки. На відміну від оптичних сенсорів, радіолокатори РСА можуть працювати вдень і вночі, а також за хмарної погоди та відсутності сонячного світла. Це робить їх надійним джерелом даних у будь-яких умовах. В свою чергу, Google Earth Engine (GEE) містить дані Sentinel-1 у подвійній поляризації у своєму великому та актуальному архіві. Оскільки у GEE відсутній комплекс з єдиним пошуком (SLC), що дозволяє стандартними методами досліджувати зміни у рельєфі, авторами було поставлено за мету побудувати модель, на основі бібліотеки машинного навчання Random Forest (RF), вбудованої в GEE, яка б добре працювала для виявлення природних і антропогенних змін у гіпсометричній структурі рельєфу.

У цій статті проаналізовано супутникові радіолокаційні знімки Sentinel-1 та автоматично отримано дані про місцезнаходження помітних змін рельєфу. Територією наших досліджень є природно-техногенні зони, що охоплюють агломерацію селища Солотвино та поля затоплених соляних шахт з активним розвитком карстових форм та ділянками, в яких спостерігаються вертикальні зсуви рельєфу. На основі супутникових радіолокаційних знімків побудовано карти та графіки змін та деформацій на території Солотвинської агломерації.

Авторами розроблено алгоритм на основі машинного навчання Random Forest для виявлення локальних вертикальних зміщень земної поверхні, що має переваги над іншими алгоритмами та полягає в тому, що він не потребує обробки даних (SLC). Алгоритм базується на класифікації земної поверхні та добре ідентифікує ділянки, де рельєфні зміщення заповнені водою, та дозволяє підвищити точність оцінки небезпечних зон деформацій поверхні (ландшафтів) в районі розташування житлових, промислових, рекреаційних об'єктів, важливих об'єктів критичної інфраструктури.

Ключові слова: дистанційне зондування, SAR, деформація рельєфу, природні та антропогенні зміни, моніторинг, охорона навколишнього середовища.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.102-114>

Вступ

Супутникові платформи Sentinel-1 з радіолокатором із синтезованою апертурою (РСА) з просторовою роздільною здатністю 10–20 метрів залежно від режиму, з комбінованим часом перебування на орбіті близько шести діб і повною незалежністю від сонячного світла та хмарності, є привабливим джерелом даних спостереження Землі для вирішення завдань виявлення змін рельєфу. З огляду на це, вони мають явну перевагу над оптичними методами виявлення природних і антропогенних змін у гіпсометричній структурі рельєфу. Google Earth Engine (GEE) містить дані Sentinel-1 у подвійній поляризації у своєму великому та актуальному архіві:

- вертикальна передача та вертикальний прийом (VV)
- горизонтальне передавання та горизонтальне приймання (HH)
- вертикальна передача і горизонтальний прийом (VV + VH)
- горизонтальна передача і вертикальний прийом (HH + HV) [1].

GEE надає не лише доступ до даних у режимі, близькому до реального часу, але й дуже потужний інтерфейс прикладного програмування (API) для обробки та візуалізації даних [2]. Наразі API GEE написаний мовою JavaScript для безпосередньої взаємодії з редактором вебкоду GEE та мовою Python для аналізу даних поза межами вебсередища GEE. Оскільки з технічних причин до архіву не включено складні комплекси з єдиним пошуком (Single Look Complex – SLC), широко використовувані інтерферометричні методи когерентності недоступні.

У своїй оригінальній публікації, що присвячена аналізу поляриметричних даних РСА [3], автори представили процедуру виявлення змін для даних РСА з множинними оглядами, включаючи тестові статистики рівності поляриметричних коваріаційних матриць, які, за припущенням, підпорядковуються складному розподілу Вішарта. Ця процедура здатна визначити, піксель за пікселем, зміни, які відбулися на будь-якому заданому рівні значущості на двох зображеннях радіолокаційної зйомки (ПЛ). Альтернативні підходи до поляриметричного виявлення змін SAR також були опубліковані в [4]. У роботі [5] описано переваги алгоритму виявлення змін на основі Вішарта, з акцентом на подвійну поляризацію, для довгих часових рядів зображень РС в архіві GEE з використанням GEE Python API. Цей алгоритм був неодноразово протестований в даній роботі в області інтересів, а саме при вивченні гірничодобувних форм рельєфу (Солотвино, Україна) [6–9].

Також було розроблено алгоритм на основі машинного навчання, збудованого в GEE за допомогою Random Forest (RF).

Тематика досліджень Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору охоплює всебічний аналіз змін компонентів навколишнього середовища. Одними з ключових напрямків досліджень є використання геоінформаційних технологій (ГІС) та технологій дистанційного зондування Землі, екологічні дослідження техногенно порушених територій [11–14, 22–26].

Методика дослідження

1. Виявлення змін у двочасових серіях зображень. Розглянемо один із способів виявлення змін у РЛ, який представлений на сайті GEE. У ньому ми досліджуємо можливість автоматичного виявлення змін рельєфу за допомогою супутників Sentinel-1.

Територією наших досліджень є природно-техногенні зони, що охоплюють агломерацію селища Солотвино та поля затоплених соляних шахт з активним розвитком карстових форм та ділянками, в яких спостерігаються вертикальні зсуви рельєфу. Для фільтрації колекції знімків ми використали супутник Sentinel-1, що складається зі знімків, отриманих у червні та серпні 2021 року. Оскільки нас цікавить виявлення гіпсометричних змін рельєфу, то для супутникових знімків [10] з активним сенсором у цьому випадку важливо, щоб кути нахилу супутника над горизонтом були однаковими на обох знімках. Також необхідно вказати висхідну (ASC) або низхідну (DESC) орбіту та номер орбіти.

Для нашого дослідження ми використовували ASC та відносний номер орбіти 131. Для досліджуваної території було отримано сім знімків (Табл. 1).

Таблиця 1. Вихідні дані для бітемпорального аналізу

Дата зйомки	Орбіта	Поляризація
07.09.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
07.15.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
07.21.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
07.27.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
08.02.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
08.08.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
08.14.2021	Низхідна орбіта, 131	VV

Для обчислення середнього значення та дисперсії зображення можна скористатися стандартними методами, вбудованими в GEE, які дозволяють будувати графіки та діаграми. У випадку роботи з базою даних GEE поза редактором коду є можливість будувати графіки мовою Python за допомогою numpy та matplotlib.

Розподіл визначається за формулою (1):

$$p_{\gamma;\alpha;\beta}(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \text{mean}(x) = \alpha\beta, \text{var}(x) = \alpha\beta^2, \quad (1)$$

де α – кількість зображень,

$\beta = \mu/\alpha$,

μ – розрахункове середнє значення, яке обчислюється за методом Reducer mean [14].

У нашому випадку параметр $\mu = 7$. Ми можемо перевірити це, наклавши розподіл на гістограму і поділивши гістограму на 1000, що являється коефіцієнтом масштабування. Виходить приблизний збіг в межах допустимого

значення різниці між двома параметрами – 0,3125. Також для оцінки оптимальності заданого нами АОІ доцільно провести порівняльний аналіз між двома знімками в стеку, який показує невеликі зміни, а різниця в часовому інтервалі дорівнює 6 дням (рис. 1). Для знімку була проведена класифікація методом найближчого сусіда. Але навіть за ці шість днів відбулися інформативні для нас зміни рельєфу. На знімку видно яскраві пікселі, які зумовлені гізометричними змінами рельєфу. Цікавою для нас є ділянка в центрі поселення, де відбуваються вертикальні зрушення рельєфу. Вона є найяскравішою на знімку. Решта найяскравіших пікселів можуть бути зумовлені особливістю вивчення таких ділянок за допомогою радіолокаційних даних, а саме кількістю та щільністю біомаси, змінами сільськогосподарських полів, деформаційним впливом, рухом техніки тощо [15–17].

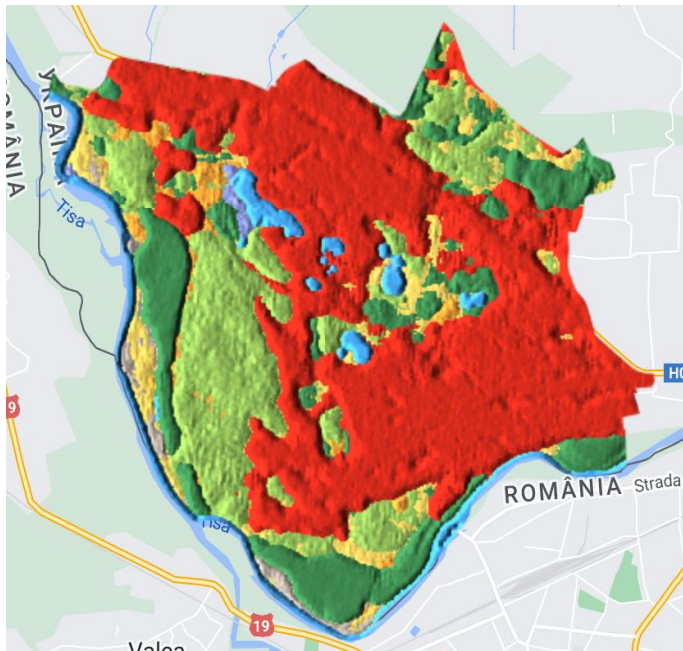


Рис. 1. Класифіковане зображення території дослідження

Ця карта показує нам зміни гіпсометрії рельєфу, але не всі зміни тут є статистично значущими, для більш детального та коректного аналізу ми можемо використати відсотковий розподіл, тобто врахувати статистично значущі зміни в пікселях. Для цього нам потрібно знати, чи є відхилення від заданого значення в кожному пікселі [18–19]. Для цього можна припустити, що значуще відхилення значення пікселя має бути більшим за 0.005.

$$Map = img1 \times 0 \text{ where } q_1 \text{ lt } 0.0005, q_1 = \frac{img1}{img2}, q_2 = \frac{img2}{img1}, \quad (2)$$

де $img1$ – перше зображення з колекції,

$img2$ – друге зображення з колекції,

Map – отримана карта.

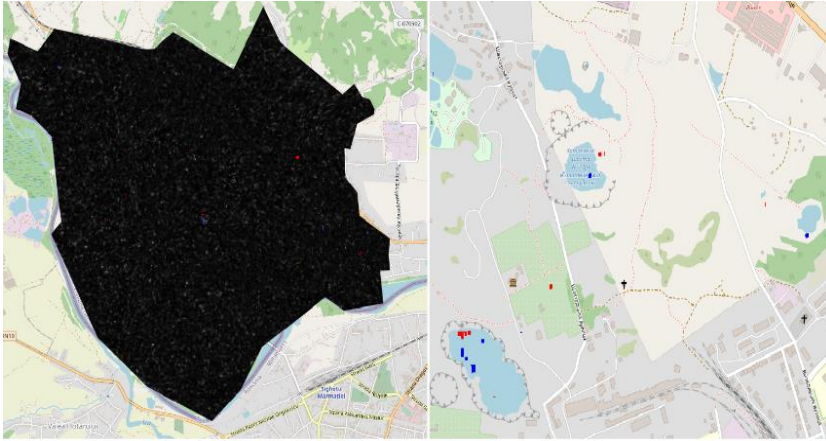


Рис. 2. Значні зміни на двох зображеннях (ліворуч). Значні зміни території дослідження (праворуч)

На отриманій карті чітко видно ділянки, де відбулися вертикальні зміни рельєфу (рис. 2). При цьому більш значні зміни з'явилися вздовж дороги в населеному пункті, ці зміни знаходяться в житловій зоні вздовж траси. У зв'язку з цим можна припустити, що там знесли якусь споруду чи дерево, або це спричинено автомобільним рухом. Що стосується нашої АОІ, то кілька пікселів у межах колишніх шахт, де відбуваються вертикальні переміщення, демонструють значні зміни. Може здатися, що пікселі лежать не в тому місці, де відбуваються зміни, але це нормально і пов'язано з просторовою роздільною здатністю супутникового знімка, а також спотворення може бути спричинене системою координат.

2. Виявлення змін у різночасових серіях зображень. Після виявлення бітемпоральних змін для Sentinel-1 доцільно також провести дослідження різночасових змін. Для цього ми обрали дещо інші дані. Для нашого регіону інтересу існувало 2 орбіти, які повністю його покривали – орбіта з номером 7 та орбіта з номером 80.

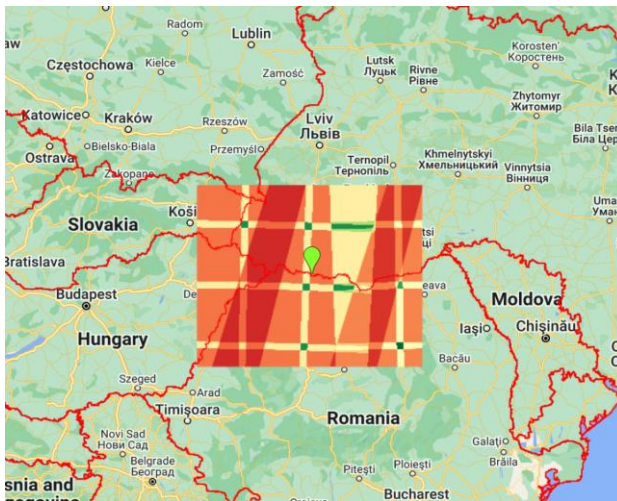


Рис. 3. Перекриття орбіт над зоною дослідження

Друга орбіта була обрана тому, що вона краще відповідала нашим вимогам, вона завжди повністю покривала АОІ. У таблиці 2 наведено 23 отриманих зображення, які ми взяли з колекції GEE.

Таблиця 2. Вихідні дані для різночасового аналізу

Дата зйомки	Орбіта	Поляризація
01.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
07.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
13.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
19.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
25.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
01.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
07.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
13.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
19.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
25.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
31.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
06.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
12.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
18.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
24.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
30.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
06.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
12.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
18.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
24.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
30.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
05.08.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
17.08.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH

З останніх трьох зображень для візуального представлення даних створено RGB-комполит (рис. 4). Для цього, як показав аналіз, достатньо використовувати дані, які представлені в децибелах. На зображенні добре виділяються структури: антропогенні споруди – це найсвітліші пікселі, водне дзеркало – найтемніші пікселі.

Для подальшого дослідження території було використано всю отриману колекцію з 23 знімків. Як зазначено у роботі [20], бітемпоральний аналіз є менш статистично незалежним, тобто ймовірність не отримати хибнопозитивний результат є менш значущою, на відміну від мультитемпорального аналізу. Розв'язуючи вираз (3) для нашої кількості зображень, отримуємо досить велике значення – 19,8 відсотка.

$$a_T = 1 - (1 - \alpha)^{k-1} \quad (3)$$

де α дорівнює 0,01,
 k – кількість зображень.

Для подальшого аналізу було використано теорему Вілкіса (4), згідно з якою має існувати наближений розподіл з $k - 1$.

$$-2 \log Q_k = [k \log k + \sum_i \log s_i - k \log \sum_i s_i](-2m), \quad (4)$$

де k – кількість зображень,
 $m - 5$.

Також з наведених знімків ми можемо встановити, де вже відбуваються вертикальні зсуви та локальні ділянки водонаповнення. У зв'язку з цим нами було виділено цю ділянку, щоб зменшити нашу АОІ та, відповідно, розрахунки займали менше часу.

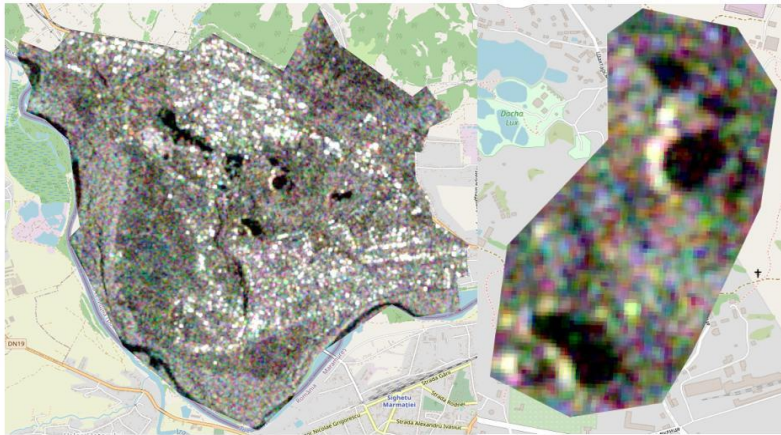


Рис. 4. RGB-композит трьох останніх знімків у зоні спостереження (ліворуч). RGB-композит трьох останніх знімків в АОІ для області, де були виявлені зміни (праворуч)

Далі було виконано порівняння пікселів в нашій колекції з розподілом χ^2 -квадрат (рис. 4). Відповідно було вибрано всю отриману колекцію зображень та виконано розрахунки за формулою 1, в даному випадку кількість зображень становить 23.

Результати дослідження

Тепер побудуємо картографічну модель, яка більш точно покаже різночасові дані про нашу зону цікавості. Для цього нами використано всю серію знімків з квітня по серпень 2021 року. На карті червоним кольором позначені ділянки, де за півроку відбулися зміни гіпсометрії поверхні. Автоматично ми визначили, де саме відбуваються ці зміни, та продемонстрували їхню просторову протяжність за допомогою карти (рис. 5). Червоні пікселі, які зустрічаються на воді, визначимо як ті, що мають значну різницю між електромагнітними та відбивними властивостями [21].

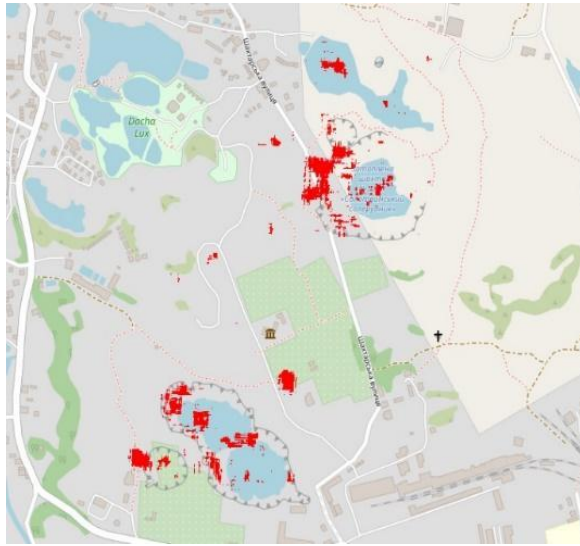


Рис. 5. Зміни поверхні на основі різночасових даних

Було побудовано карту, що відображає зміни рельєфу у часі, а саме наскільки рано (ліворуч) і наскільки сильно (праворуч) відбулися зміни (рис. 6). Чорним кольором відображено території, де відсутні зміни, перехід від темних пікселів до світлих характеризує зміну значень у сторону збільшення. Це означає, що інтенсивності відбиття VV та VH спричинені переважно змінами рельєфу. Базовою картою було обрано Open Street Map (OSM), на якій позначені існуючі карстові воронки, а саме в них відбувається більшість змін гіпсометричної структури рельєфу. Без надійної перевірки на місцевості не можна стверджувати, що побудовані нами карти змін можуть бути корисними для оцінки збитків, але їх потенційна корисність цілком очевидна.

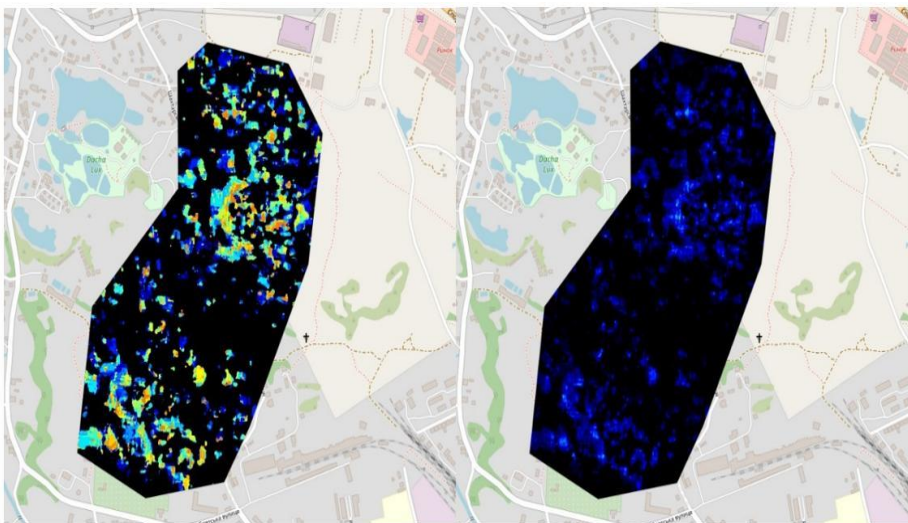


Рис. 6. Інтенсивність змін рельєфу з плином часу

Аналізуючи представлені картографічні моделі, можна припустити, що тотальні зміни рельєфу здебільшого заповнюються водою та площа водної поверхні збільшується.

Дослідити це явище можна за допомогою GEE наступним чином. Для цього необхідно вирішити задачу бінарної класифікації поверхні: водна поверхня та все інше (грунт, споруди, рослинність). У нашому ШНМ для машинного навчання було створено два вищезгадані класи, кількість дерев 30. Для визначення водної поверхні було створено 16 класів і 3 великі класи, які покривали поверхню, цей метод виявився найкращим. Було використано всю колекцію, доступну на даний момент, від першого знімка з грудня 2014 року по серпень 2021 року. За допомогою GEE було отримано 27 знімків. Зображення розташовані в хронологічному порядку, зліва направо, зверху вниз. Перший знімок, як і всі наступні, є медіанним зображенням за три місяці. Отже, картографічні моделі демонструють динаміку затоплення порушених ділянок рельєфу.

Для отримання такого часового ряду було використано всі знімки з колекції та застосовано до них функцію медіанного значення за кожні три місяці, щоб зменшити кількість запитів до бази даних GEE, оскільки вона має ліміт на один запит і не дозволяє робити більше 5000 запитів за один раз. Через відсутність у базі даних GEE даних SLC, які дозволяють проводити інтерферометрію, цей метод, за певних умов, може підказати, де і наскільки, як часто відбуваються вертикальні зсуви рельєфу. Згідно з дослідженням, на цій території є зсуви, шахти яких розташовані в тих місцях, де підвищується рівень водної поверхні.

Висновки

Використовуючи описані методи та алгоритми, ми можемо порівнювати карти, створені на основі початкової та кінцевої колекції знімків, що відобразатимуть серйозні зміни. Згідно з попередніми дослідженнями, в нашій зоні інтересу знаходяться три шахти, які спричиняють вертикальні зсуви рельєфу. За допомогою порівняння останніх доступних знімків у серпні 2021 року було виявлено, що зміни в каналі VV збігаються з розташуванням цих трьох шахт. Потім було використано різночасовий аналіз шестимісячних знімків для виявлення та картографування змін, які показують, як вони відбуваються кількісно та в часі. Заключним етапом дослідження стала розробка алгоритму, який використовує всю наявну колекцію зображень, а карти були створені за допомогою візуалізації супутникових радіолокаційних знімків. Також на основі GEE JavaScript API було створено вебдодаток, за допомогою якого можна проводити моніторинг змін рельєфу на досліджуваній території. Якщо порівняти першу та останню карти (рис. 7), то добре видно, як змінився рельєф під впливом антропогенного фактору.

Місця прискореного осідання земної поверхні та площі затоплення добре ідентифікуються на супутникових знімках та дають змогу відслідковувати їх динаміку з моменту появи. Зліва перший знімок – зимовий і, можливо, не вся водна поверхня річки, яка протікає вздовж південно-західного кордону селища, потрапила в аналіз, що можна пояснити ускладненим розпізнаванням мерзлої води. На лівому знімку також є невеликі плями, які також пов'язані з наявністю снігу, такі плями можна побачити на всіх зимових знімках. На

правому знімку чітко видно ділянки, де розвивається зсув земної поверхні під впливом антропогенного фактору. Вся серія знімків може бути використана для оцінки швидкості цього руху.

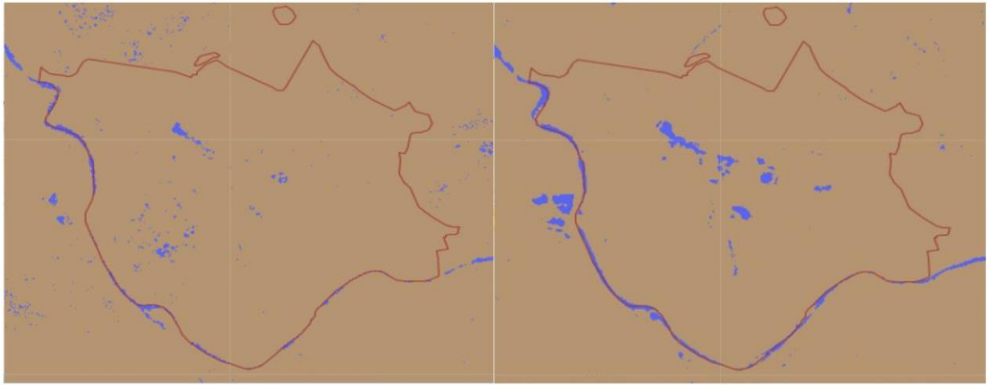


Рис. 7. Порівняння першого (ліворуч) та останнього (праворуч) супутникових знімків

Таким чином, вищезазначені методи дозволять:

- підвищити точність оцінки небезпечних зон деформацій поверхні (ландшафтів) в районі розташування житлових, промислових, рекреаційних об'єктів, важливих об'єктів критичної інфраструктури;
- виявити на ранній стадії загрозу розвитку та активізації гірничо-технологічних деформацій рельєфу;
- виявити антропогенно порушені території, які потенційно піддаються підтопленню;
- кількісно ідентифікувати зміни гіпсометричних форм рельєфу, які заповнюються водою та формують ділянки інженерно-геологічної небезпеки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
2. Mutanga, O.; Kumar, L. Google Earth Engine Applications. (2019). *Remote Sens.* 11, 591. <https://doi.org/10.3390/rs11050591>.
3. Conradsen, K., Nielsen, A., Schou, J., Skriver, H. (2003). A test statistic in the complex Wishart distribution and its application to change detection in polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 4-19. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808066>
4. Akbari, V., Anfinsen, S. N., Doulgeris, A. P., Eltoft, T., Moser G., Serpico S. B. (2016). Polarimetric SAR Change Detection with the Complex Hotelling–Lawley Trace Statistic, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (7), 3953-3966. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2532320>
5. Canty, M.J., Nielsen, A.A., Conradsen, K., & Skriver, H. (2019). Statistical Analysis of Changes in Sentinel-1 Time Series on the Google Earth Engine. *Remote Sens.*, 12, 46. <https://doi.org/10.3390/rs12010046>

6. Trofymchuk, O., Kolodyazhnyy, O., Yakovlev, E. (2014). Hazardous activation of Landslides Within Western Carpathian Region (Ukraine). In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (eds) *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8_82/
7. Risk Assessment Report of Advisory Mission to Ukraine. (2016). Solotvyno salt mine area. Union Civil Protection Mechanism of EU.
8. Anpilova, Y., Hordiienko, O., Horbulin, V., Trofymchuk, O., Yakovliev, Y. (2021). The use active sensors of remote sensing to describe structures and landscape changes in Solotvyno. In: *Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021, Volume 2021, 1-7*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521018>
9. Anpilova, Y., Yakovliev, Y., Trofymchuk, O., Myrontsov, M., Karpenko, O. (2022). Environmental hazards of the Donbas hydrosphere at the final stage of the coal mines flooding. In *Systems, Decision and Control in Energy III. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham, 305-316. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_19
10. Martin-del-Campo-Becerra, G.D., Reigber, A., Nannini, M., Hensley, S. (2020). Single-Look SAR Tomography of Urban Areas, *Remote Sensing*, doi: <https://doi.org/10.3390/rs12162555>
11. Trofymchuk, O., Anpilova, Y., Hordiienko, O., Myrontsov, M., Karpenko, O. (2023). Method for Detecting Natural and Anthropogenic Changes That Filled with Water in Landscapes Using Radar Satellite Imagery. In: Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*, 481. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_46
12. Trofymchuk, O., Anpilova, Ye., Yakovlev, Ye., Kreta, D., Shekhunova, S. (2020). Assessment of Solotvyno agglomeration mines flooding impact on water resources with GIS. In *Monografie - Politechnika Lubelska. Water Supply and Wastewater Disposal: Designing, Construction, Operation and Monitoring*, 315-327.
13. O. Trofymchuk, Y. Yakovliev, Y. Anpilova, M. Myrontsov, V. Okhariev, (2021). Ecological Situation of Post-mining Regions in Ukraine. *Decision and Control in Energy II*, 293-306, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_17
14. Trofymchuk, O., Anpilova, Y., Yakovliev, Y., Zinkiv, I. (2020). Ground Deformation Mapping of Solotvyno Mine Area Using Radar Data and GIS. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo138>
15. Bovenga, F. (2020). Special Issue "Synthetic Aperture Radar (SAR) Techniques and Applications", doi: <https://doi.org/10.3390/s20071851>
16. Canisius, F., Brisco, B., Murnaghan, K., Kooij, M., Keizer, E. (2019). SAR Backscatter and InSAR Coherence for Monitoring Wetland Extent, Flood Pulse and Vegetation: A Study of the Amazon Lowland, doi: <https://doi.org/10.3390/rs11060720>
17. Monti-Guarnieri, A., Manzoni, M., Giudici, D., Recchia, A., Tebaldini, S. (2020). Vegetated Target Decorrelation in SAR and Interferometry: Models, Simulation, and Performance Evaluation. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12162545>
18. Zhao, J., Yu, A., Zhang, Y., Zhu, X., Dong, Z. (2019). Spatial Baseline Optimization for Spaceborne Multistatic SAR Tomography Systems. doi: <https://doi.org/10.3390/s19092106>.
19. Morton, C. (2019). *Image Analysis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing*, 4th ed., Boca Raton, BR.
20. Conradsen, K., Nielsen, A., Skriver, H. (2016). Determining the Points of Change in Time Series of Polarimetric SAR Data. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7398022>
21. Liang, S., Wang, J. (2019). *Advanced Remote Sensing 2nd ed.*, Beijing, BJ.
22. Trofimchuk, A., Vasyanin, V. (2015). Simulation of Packing, Distribution and Routing of Small-Size Discrete Flows in a Multicommodity Network. *Journal of Automation and Information Sciences*, 47, 15-30. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i7.30>
23. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., Klymenkov, O. (2018). TXT-tool 2.380-1.1: Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6_37

24. Anpilova, Y., Dovgyi, S., Yakovliev, Y., Hordiienko, O., Myrontsov, M., Karpenko, O. (2023). Impact of Modern Anthropogenic Factors on the Hydrological System of the Donbas. In: Zaporozhets, A., Popov, O. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 456. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_16
25. Kaliukh, I., Trofymchuk, O., Farenjuk, G., Ivanik, O., Shekhunova, S. (2019). Practical measures for landslide risk mitigation in the Ukrainian Carpathians. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902165>
26. Kaliukh, I., Trofymchuk, O., Lebid, O. (2019). Numerical Solution of Two-Point Static Problems for Distributed Extended Systems by Means of the Nelder–Mead Method. *Cybern Syst Anal*, 55, 616–624. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00170-3>

Стаття надійшла до редакції 13.12.2023 і прийнята до друку після рецензування 08.04.2024

The article was received 13.12.2023 and was accepted after revision 08.04.2024

Трофимчук Олександр Миколайович

доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ
Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна, 03186
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

Гордієнко Олександр Вікторович

молодший науковий співробітник Відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ
Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна, 03186
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4891-3410> **e-mail:** gordiienko.ov@gmail.com

Анпілова Євгенія Сергіївна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, старший науковий співробітник Відділу обчислювальних гідросистем (CHS), Центр екологічних досліджень ім. Гельмгольца
Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна, 03186
Пермозерштрассе, 15, Лейпциг, Німеччина, 04318
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4107-0617> **e-mail:** yevheniia.anpilova@ufz.de

Яковлев Євгеній Олександрович

доктор технічних наук, головний науковий співробітник Відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ
Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна, 03186
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015> **e-mail:** yakovlevhydro@gmail.com