

РОЗДІЛ V

Геоєкологія та геоінформатика

УДК 528.4

DOI <https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2025.6.13>

Василь Гудак

аспірант кафедри геоінформатики, ННІ «Інститут геології»,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
gudak_vasyl@knu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7333-0409>

Сергій Маргес

аспірант відділу аерокосмічних досліджень в геології та геоєкології,
Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук,
Національна академія наук України
sergimarhes@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2942-9406>

Віталій Зацерковний

доктор технічних наук, професор, ННІ «Інститут геології»,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>

РОЗРОБКА ІНТЕРАКТИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ Й АНАЛІЗУ ГЕОПРОСТОРОВИХ АНОМАЛІЙ У QGIS НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Анотація. У статті представлено методологію автоматизованого виявлення аномальних геопросторових зон, реалізовану у формі плагіна для геоінформаційної системи QGIS. Розроблений інструмент підвищує ефективність просторового аналізу та забезпечує оперативну ідентифікацію територій із потенційними змінами, що є важливим для моніторингу природних і техногенних процесів.

Запропонований підхід ґрунтується на поєднанні порогового та статистичного аналізу супутникових знімків у середовищі QGIS. Плагін передбачає інтерактивне налаштування параметрів обробки зображень та автоматичне виявлення геодинамічних аномалій, які після етапу векторизації подаються користувачу для подальшої інтерпретації.

Тестування плагіна на супутникових даних типу InSAR підтвердило його ефективність під час виявлення зон вертикальних зміщень земної поверхні. Отримані результати демонструють практичну придатність інструменту для моніторингу геодинамічних процесів і визначають перспективні напрями вдосконалення, зокрема реалізацію роздільної обробки позитивних і негативних зміщень для підвищення точності ідентифікації аномалій.

Ключові слова: автоматизоване виявлення, геопросторові зони, плагін QGIS, супутникові зображення, геодинамічні аномалії, геопросторовий аналіз, екзогенні геологічні процеси.

Hudak Vasyl, Marhes Serhii, Zatserkovnyi Vitaly. DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE TOOL FOR DETECTION AND ANALYSIS OF GEOSPATIAL ANOMALIES IN QGIS BASED ON SATELLITE DATA

Abstract. The article presents a methodology for automated detection of anomalous geospatial zones, implemented as a plugin for the QGIS geographic information system. The developed tool enhances the efficiency

of spatial data analysis and enables rapid identification of territories with potential changes, which is essential for monitoring natural and anthropogenic processes.

The proposed approach is based on the integration of threshold and statistical analysis of satellite imagery within the QGIS environment. The plugin provides interactive adjustment of image processing parameters and automatically detects geodynamic anomalies, which are subsequently vectorized and made available to the user for further interpretation.

Testing of the plugin on InSAR-type satellite data confirmed its effectiveness in identifying zones of vertical ground displacement. The obtained results demonstrate the practical applicability of the tool for geodynamic monitoring and highlight promising directions for future development, particularly the implementation of separate processing of positive and negative displacements to improve the accuracy of anomaly identification.

Key words: automated detection, geospatial anomalies, QGIS plugin, satellite remote sensing, geodynamic anomalies, spatial analysis, exogenous geological processes.

Актуальність теми дослідження. Системи моніторингу стану довкілля на основі супутникових спостережень нині відіграють визначальну роль у гарантуванні безпеки населення, управлінні природними ресурсами та запобіганні катастрофам. У сучасному світі, який перебуває у стані постійних трансформацій, дедалі частіше виникають надзвичайні ситуації природного, техногенного та воєнного характеру. За таких умов критично важливим є оперативне реагування, що передбачає швидке оцінювання стану територій і ухвалення ефективних управлінських рішень для мінімізації наслідків катастроф. Водночас процес аналізу просторової інформації часто є тривалим і трудомістким через великі обсяги супутникових даних, а також відсутність інструментів для їх автоматизованої обробки.

Сучасні методи аналізу супутникових знімків відіграють ключову роль у моніторингу стану навколишнього середовища, оцінюванні техногенного впливу та виявленні геодинамічних процесів. Проте традиційні підходи – зокрема візуальна інтерпретація та ручне оцифрування – виявляються малоефективними під час роботи з великими територіями або обсягами даних. Їхня точність знижується через суб'єктивність оцінювання та складність відтворюваності результатів, що обмежує можливість виконання довготривалого моніторингу й автоматизованого картографування змін.

Для усунення цих обмежень потрібні нові інструменти, здатні забезпечити автоматизацію аналізу супутникових даних, підвищити точність і стабільність результатів та інтегруватися в наявних геоінформаційних середовищах [3; 13].

У таких умовах набуває особливої важливості створення комплексного інструменту, який дає змогу виконувати швидкий і достовірний аналіз супутникових знімків, виявляти зони руйнувань і оцінювати загальний стан територій [10]. Автоматизація аналізу супутникових даних у середовищі геоінформаційних систем (далі – ГІС) мінімізує суб'єктивні помилки, забезпечує стандартизований підхід до ідентифікації аномальних зон і підвищує достовірність результатів [6]. Використання геостатистичних алгоритмів сприяє точнішому розпізнаванню аномалій, зменшенню впливу шумів та підвищенню ефективності аналізу.

Інтеграція таких методів у середовище QGIS відкриває нові можливості для автоматизованого моніторингу змін земної поверхні, зокрема для оцінювання гідрогеологічних умов і антропогенних впливів [3; 4].

У цьому дослідженні представлено розроблений плагін для програмного забезпечення QGIS, який забезпечує автоматизоване виявлення аномальних зон – ділянок, що відрізняються від фонових значень і можуть свідчити про локальні зміни геодинамічного режиму. Особливістю плагіна є його універсальність, що дає змогу застосовувати алгоритм до різних типів супутникових даних. У роботі наведено приклад його використання для InSAR-даних, отриманих із супутників Sentinel-1.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення та впровадження інтерактивного плагіна для ГІС QGIS, який забезпечує автоматизований аналіз і виявлення аномальних геопросторових зон на основі обробки супутникових знімків, зокрема радарних InSAR-даних.

Основне завдання плагіна полягає в автоматизованому виявленні аномалій, що перевищують задані порогові значення, та їх відокремленні від основного масиву даних, який відповідає фоновому рівню. Пороговий параметр використовується як критерій відхилення від середнього, що дає змогу виокремлювати геопросторові об'єкти з нетиповими характеристиками для подальшого аналізу.

Методи та матеріали дослідження. Методологічна основа дослідження ґрунтується на системному підході, принципах геоінформаційного моделювання та автоматизованої обробки супутникових даних. Для реалізації алгоритму використано пороговий і статистичний аналіз супутникових знімків, а також автоматизовану векторизацію аномальних геопросторових зон у середовищі QGIS.

Ефективність розробленого плагіна перевірено шляхом тестування на реальних супутникових даних, що дало змогу виконати кількісне оцінювання геодинамічних змін і підтвердити коректність роботи алгоритму.

У дослідженні використано радарні InSAR-дані, які слугували основним джерелом інформації для виявлення геодинамічних аномалій. Для автоматизованого опрацювання та просторового аналізу застосовано ГІС QGIS із розробленим плагіном, реалізованим мовою програмування Python.

Виклад основного матеріалу з обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Принцип роботи розробленого плагіна структуровано представлено у формі кількох функціональних блоків, що забезпечує чітке розмежування основних етапів обробки даних і взаємодії між компонентами системи.

Ініціалізація плагіна. Процес ініціалізації плагіна *AutoContour* (рис. 1) передбачає завантаження необхідних бібліотек Python, зокрема *PyQt*, *QGIS API*, *GDAL*, *OGR* та *NumPy*. На початковому етапі роботи формується посилання на інтерфейс ГІС QGIS, що надає змогу отримувати доступ до проєктних даних, керувати шарами карти та взаємодіяти з елементами графічного інтерфейсу.

Паралельно здійснюється визначення робочої директорії плагіна, у якій зберігаються службові та тимчасові файли, необхідні для виконання обчислень. Для забезпечення коректної роботи програми оголошуються змінні, які містять шляхи до тимчасових растрових і векторних файлів, що створюються і обробляються під час виконання алгоритму. Таке рішення сприяє модульності, ефективності та безпечності роботи плагіна, оскільки дозволяє уникати накопичення непотрібних проміжних даних, оптимізує використання системних ресурсів і забезпечує стабільне функціонування в середовищі QGIS.

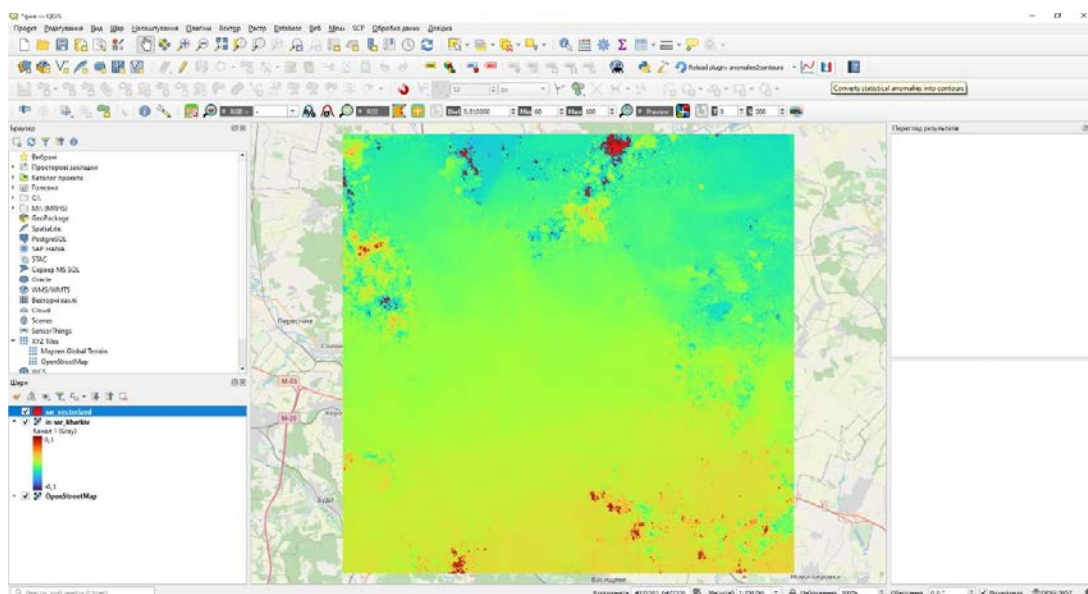


Рис. 1. Загальний вигляд розробленого плагіна в ГІС QGIS

Графічний інтерфейс та інтеграція з QGIS. Інтеграція плагіна із графічним інтерфейсом QGIS здійснюється шляхом його реєстрації в системному меню програми та додавання спеціалізованих елементів управління до панелі інструментів [12]. Реалізація цього процесу відбувається за допомогою методу *initGui()*, який створює інтерфейсні компоненти – зокрема, кнопки, меню та панелі дій, що забезпечують користувачеві доступ до функціональних можливостей плагіна.

Ключовим елементом є дія (*QAction*), яка вводиться до панелі інструментів і меню “*Raster*”, що дозволяє запускати алгоритм автоматичного визначення контурів безпосередньо із графічного інтерфейсу. Плагін підтримує динамічне завантаження локалізованих ресурсів, що гарантує коректне відображення елементів інтерфейсу відповідно до мовних налаштувань користувача.

Для забезпечення належного керування роботою плагіна передбачено механізм його вивантаження через метод *unload()*, який відповідає за очищення інтерфейсу, а також за видалення створених пунктів меню та кнопок із панелі інструментів.

Взаємодія користувача з алгоритмом реалізується через діалогове вікно *AutoContourDialog*, яке забезпечує можливість задавати параметри обробки, зокрема порогове значення для сегментації. Інтерфейс підтримує інтерактивне налаштування параметрів у реальному часі, що дає змогу оперативно контролювати результати аналізу без необхідності повторного запуску алгоритму.

Завдяки реалізованій структурі інтерфейсу плагін органічно інтегрується в ГІС QGIS і забезпечує користувачеві зручний доступ до ключових функцій обробки даних.

Обробка растрових даних. Алгоритм опрацювання растрових зображень спирається на їх математичне представлення у формі дискретної двовимірної функції [8; 14]:

$$G : Z^2 \rightarrow R, G(x, y) = g_{xy}, \quad (1)$$

де $G(x, y)$ – це значення пікселя в точці з координатами (x, y) , а g_{xy} – його інтенсивність, що може відображати різні фізичні або спектральні властивості (наприклад, коефіцієнт відбиття, яскравість у визначеному спектральному діапазоні чи інший параметр, отриманий із дистанційних спостережень).

Статистичне опрацювання растрових даних розпочинається з обчислення базових показників, зокрема середнього рівня яскравості та стандартного відхилення. Середнє значення характеризує загальний фон зображення, що створює основу для виявлення локальних відхилень, тоді як стандартне відхилення відображає ступінь варіації яскравості й слугує ключовим параметром для подальшої ідентифікації аномальних ділянок.

Виділення аномальних зон здійснюється на основі статистичного критерію, який ураховує відхилення окремих значень від середнього в разі нормального розподілу випадкової величини. Такий підхід є поширеним у задачах аналізу супутникових зображень і геопросторових даних [2]. Згідно із цим підходом аномальними вважаються ті значення випадкової змінної, що виходять за межі:

$$\mu \pm k\sigma, \quad (2)$$

де μ – математичне сподівання, σ – стандартне відхилення, k – коефіцієнт аномальності, розглядаються як потенційно аномальні.

У контексті аналізу растрових даних це правило використовується для виявлення ділянок, інтенсивність яких істотно відрізняється від середнього рівня, що може свідчити про наявність природних або техногенних аномалій [1]. Такий підхід базується на припущенні про гаусівський розподіл інтенсивності пікселів, який є типовим для багатьох природних процесів і даних дистанційного зондування Землі [5].

Відповідно, ідентифікація аномальних зон A здійснюється за допомогою такого виразу:

$$A = \mu + k\sigma. \quad (3)$$

Такий критерій дає змогу виокремити області, значення яких істотно перевищують фонові показники. Метод ефективно застосовується для виділення аномалій у супутникових та інших геопросторових даних [1; 2; 5].

Бінаризація растрового зображення виконується шляхом формування маски $B(x, y)$, яка перетворюється на новий растровий шар, де значення 1 відповідає аномальним зонам, а 0 – фоновим ділянкам:

$$B_{bin}(x, y) = \begin{cases} 255, & \text{if } B(x, y) = 1, \\ 0, & \text{if } B(x, y) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Отримана маска забезпечує можливість візуалізації аномальних зон і збереження їх у стандартних геопросторових форматах, зокрема GeoTIFF. На цьому етапі також виконується приєднання системи координат і проєкції, що відповідають вхідному растровому зображенню.

Векторизація та обробка аномальних зон. Процес векторизації аномальних зон у растрових даних ґрунтується на застосуванні алгоритму *gdal.Polygonize()*, що входить до складу бібліотеки *GDAL* і забезпечує перетворення піксельних ділянок з однаковими значеннями на набір замкнених полігонів. Така операція дає змогу трансформувати дискретне растрове представлення у векторну форму, придатну для подальшого просторового аналізу. У результаті забезпечуються ефективне зберігання і опрацювання інформації у форматах геопросторових даних, зокрема Shapefile або GeoJSON.

Алгоритм векторизації включає кілька ключових етапів. На початковій стадії використовується метод сканувальної прямої, який послідовно аналізує растрове зображення та визначає межі аномальних об'єктів. Далі виконується ідентифікація зв'язаних компонентів, що формують замкнені контури на основі топологічних зв'язків між пікселями. На фінальному етапі ці контури перетворюються на векторні об'єкти, які можуть бути використані для подальшого геометричного аналізу, зокрема обчислення площі, периметра, компактності або інших морфометричних показників. Такий підхід підвищує точність і дає змогу автоматизувати ідентифікацію аномалій у супутникових знімках і геопросторових наборах даних.

Після завершення полігонізації виконується фільтрація отриманих векторних об'єктів, спрямована на усунення шумів і артефактів, що могли з'явитися внаслідок неоднорідності растрових даних. Основним критерієм ідентифікації таких артефактів є площа полігона, яка визначається за допомогою формули Гауса [2]:

$$S_i = \frac{1}{2} \left| \sum_{j=1}^n (x_j y_{j+1} - x_{j+1} y_j) \right|, \quad (5)$$

де S_i – площа полігона, x_j, y_j – координати його вершин, n – кількість вершин.

Серед усіх виявлених контурів визначається полігон із максимальною площею, який, за умови значного перевищення над середнім значенням, вважається аномальним артефактом і виключається з подальшого аналізу. Решта полігонів зберігається для подальшої обробки, що підвищує надійність і достовірність результатів геоінформаційного аналізу.

Фінальним етапом є збереження очищених векторних об'єктів у вигляді нового шару у форматі Shapefile, придатного для інтеграції з іншими просторовими даними та візуалізації результатів у середовищі ГІС.

Управління тимчасовими файлами. Під час роботи плагіна здійснюються створення та автоматизоване управління тимчасовими файлами, що включає формування спеціальних каталогів для зберігання проміжних растрових і векторних результатів. Такий процес є невід'ємною частиною обробки, проте може спричиняти підвищене навантаження на пам'ять і впливати на загальну швидкість системи. З метою оптимізації використання ресурсів усі тимчасові файли

автоматично видаляються після завершення їх використання або після закриття середовища QGIS.

Застосування такої стратегії запобігає накопиченню зайвих даних, сприяє раціональному використанню дискового простору та зменшує навантаження на оперативну пам'ять, що має особливе значення під час роботи з великими геопросторовими масивами.

Описана послідовність обробки даних реалізована через активні модулі для растрових і векторних шарів, які автоматично оновлюються в разі зміни параметрів користувача (рис. 2). До таких параметрів належать вибір вихідного растрового шару та встановлення порогу чутливості [7]. Результати обчислень формуються в реальному часі й відображаються як векторні полігони, що окреслюють аномальні області в досліджуваному масиві даних.

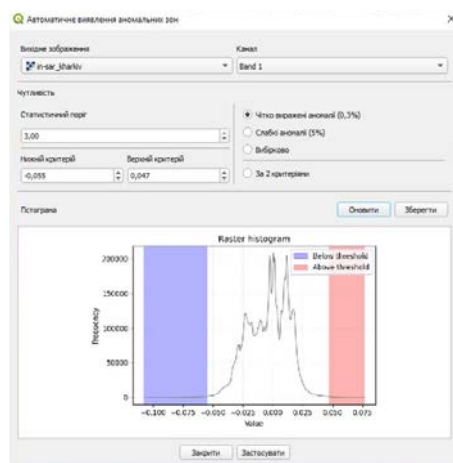


Рис. 2. Діалогове вікно для взаємодії з користувачем у розробленому плагіні

Результати роботи створеного плагіна були перевірені на основі радарних InSAR-даних, використаних для оцінювання вертикальних зміщень земної поверхні. Автоматизоване опрацювання цього типу даних за допомогою плагіна істотно спрощує процес інтерпретації просторової інформації, підвищує ефективність аналітичних досліджень і оперативність ухвалення рішень у сфері моніторингу й управління територіями.

Аналіз супутникових даних Sentinel-1 за методом диференціальної інтерферометрії (D-InSAR) є ефективним інструментом моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні, особливо в межах урбанізованих територій [11]. Цей підхід забезпечує виявлення навіть мінімальних деформацій рельєфу з високою просторовою точністю, що робить його надзвичайно важливим для оцінювання геодинамічних процесів, прогнозування георизиків і підтримки управлінських рішень у сфері містобудування та інженерної геології.

Застосування методу D-InSAR є особливо актуальним у зонах активного будівництва, сейсмічно чутливих районах, регіонах підземного видобутку корисних копалин, а також на територіях, схильних до осідань або зсувів [3; 9]. Завдяки часовому аналізу радарних знімків Sentinel-1 можна простежити динаміку зміщень та виявити довготривалі тенденції деформацій.

Для тестування роботи розробленого плагіна було використано інтерферометричні дані Sentinel-1 (InSAR), що охоплюють північно-західну частину Харківської області й оброблені за допомогою методу D-InSAR (рис. 3-а). Після обробки даних плагін автоматично ідентифікував аномальні значення, які свідчать про наявність змін у досліджуваному регіоні. Такі аномалії можуть бути зумовлені вертикальними деформаціями земної кори, спричиненими як природними, так і антропогенними чинниками.

Отримані результати містять просторове відображення змін у висотах поверхні, що дає змогу детально дослідити геодинамічні процеси та провести подальший аналіз зон аномальних зміщень (рис. 3-б).

Результати статистичного аналізу виділених полігонів (табл. 1) свідчать про значну просторову варіативність вертикальних переміщень земної поверхні. Найбільша за площею аномальна зона (ID 1) охоплює $\approx 1\,500\,000\text{ м}^2$ і характеризується мінімальним зміщенням $-0,12\text{ м}$, максимальним $-0,06\text{ м}$, середнім $-0,08\text{ м}$, діапазоном $0,06\text{ м}$ і стандартним відхиленням $0,011\text{ м}$. Переважання від'ємних значень свідчить про процеси просідання. Подібні характеристики зафіксовано для полігонів ID 2 ($\approx 165\,000\text{ м}^2$; середнє $-0,065\text{ м}$; діапазон $0,06\text{ м}$; $\sigma = 0,012\text{ м}$) та ID 4 ($\approx 129\,000\text{ м}^2$; середнє $-0,065\text{ м}$; діапазон $0,05\text{ м}$; $\sigma = 0,012\text{ м}$), що підтверджує наявність зон активного субсидування поверхні.

Під час статистико-просторового аналізу встановлено, що полігони, де фіксуються від'ємні зміщення, зазвичай мають більшу площу та вищі абсолютні значення деформацій.

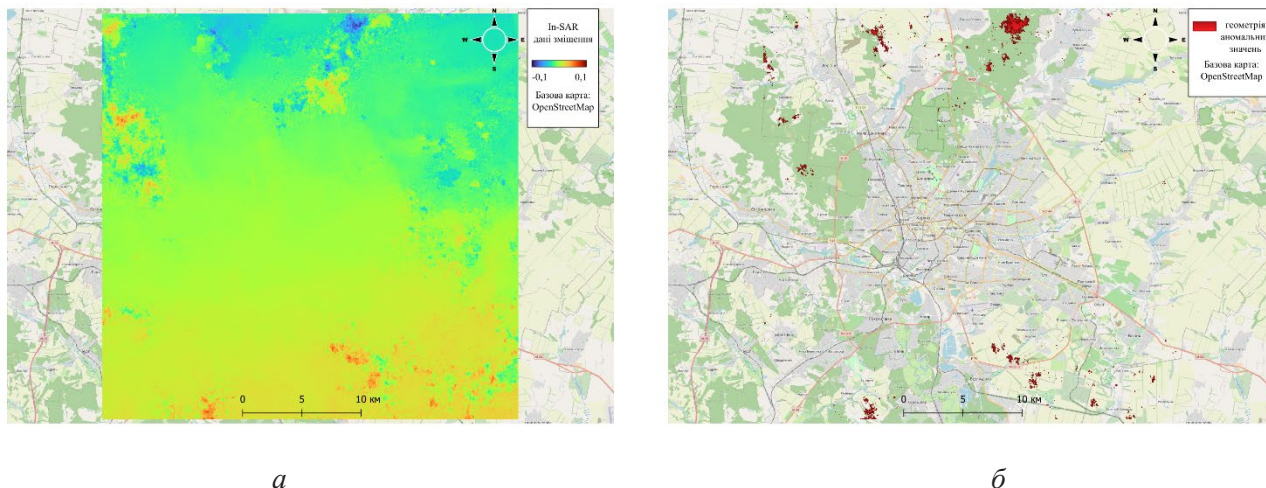


Рис. 3: а) вхідне зображення, сформоване за результатами обробки методом D-InSAR;
б) виділені аномальні зони вертикальних зміщень на зображенні

Наприклад, полігон ID 7 ($\approx 61\,500\text{ м}^2$) демонструє середнє зміщення $-0,075\text{ м}$ за діапазону $0,06\text{ м}$ і $\sigma = 0,012\text{ м}$, тоді як полігон ID 6 ($\approx 68\,000\text{ м}^2$) характеризується середнім $-0,065\text{ м}$ і діапазоном $0,05\text{ м}$. Сукупність цих показників вказує на домінування негативних вертикальних деформацій у межах досліджуваної території, що відображає регіональну тенденцію до просідання, імовірно, унаслідок антропогенного навантаження або геодинамічних процесів.

Натомість позитивні значення вертикальних зміщень свідчать про підняття поверхні, яке також виявляється у просторовій структурі полігонів. Так, полігон ID 3 ($\approx 149\,500\text{ м}^2$) демонструє мінімальне підняття $0,04\text{ м}$, максимальне $0,08\text{ м}$, середнє $0,055\text{ м}$, діапазон $0,04\text{ м}$ і $\sigma = 0,009\text{ м}$. Схожі параметри зафіксовано для полігонів ID 5 ($\approx 96\,000\text{ м}^2$; середнє $0,06\text{ м}$; діапазон $0,05\text{ м}$) та ID 8 ($\approx 58\,900\text{ м}^2$; середнє $0,065\text{ м}$; діапазон $0,05\text{ м}$). Такий розподіл вказує на локальні підйомні процеси, які можуть бути зумовлені техногенними впливами або неотектонічною активністю.

Усі виділені полігони характеризуються низькими значеннями стандартного відхилення ($0,005\text{--}0,012\text{ м}$), що свідчить про відносну рівномірність зміщень у межах кожної зони. Для більшості полігонів амплітуда варіацій становить $0,04\text{--}0,06\text{ м}$, що підтверджує локальний характер деформацій. Найбільші діапазони ($0,06\text{ м}$) спостерігаються в полігонів ID 1, 2 і 7, що може свідчити про складніші або триваліші геодинамічні процеси в цих ділянках.

Отримані статистичні характеристики забезпечують кількісну оцінку масштабів вертикальних змін земної поверхні та дають підстави ідентифікувати зони з підвищеним ризиком подальшої трансформації геоінженерного стану. Такі ділянки доцільно включити до пріоритетних об'єктів моніторингу для подальшого спостереження і аналізу.

Таблиця 1

**Отримані геометричні та статистичні параметри аномальних полігонів
за даними вертикальних зміщень**

ID полігона	Площа, м ²	Значення вертикальних зміщень, м				
		мін.	макс.	середнє	ст. відхилення	діапазон
1	1 501 324	-0,12	-0,06	-0,08	0,011	0,06
2	164 968	-0,10	-0,04	-0,065	0,012	0,06
3	149 525	0,04	0,08	0,055	0,009	0,04
4	129 190	-0,09	-0,04	-0,065	0,012	0,05
5	96 250	0,04	0,09	0,06	0,011	0,05
6	68 001	-0,09	-0,04	-0,065	0,011	0,05
7	61 587	-0,10	-0,04	-0,075	0,012	0,06
8	58 971	0,04	0,09	0,065	0,012	0,05
9	50 214	-0,09	-0,04	-0,065	0,005	0,05
10	43 089	0,04	0,08	0,065	0,010	0,04
11	41 806	-0,09	-0,04	-0,065	0,005	0,05
12	40 313	-0,09	-0,04	-0,065	0,005	0,05

Автоматизоване опрацювання даних D-InSAR у середовищі QGIS істотно підвищує ефективність моніторингу деформацій земної поверхні, забезпечує об'єктивний, відтворюваний і масштабований підхід до оцінювання геодинамічних процесів у різних регіонах. Такий методологічний підхід сприяє своєчасному виявленню потенційно небезпечних ділянок, що має особливу важливість для територій із високою щільністю забудови або ускладненими інженерно-геологічними умовами.

Висновки. Розроблення ефективних методів аналізу супутникових знімків залишається одним із ключових завдань моніторингу природних і техногенних змін довкілля. Запропонований у дослідженні підхід до автоматизованого виявлення аномальних зон ґрунтується на застосуванні статистичних методів, що забезпечують високу точність, відтворюваність і швидкість обробки даних.

Створений плагін для QGIS автоматизує процес аналізу супутникових зображень та спрощує ідентифікацію ділянок з аномальними геопросторовими характеристиками. Його функціональні можливості передбачають використання порогового та статистичного аналізу для виявлення змін у геоданих, що підвищує об'єктивність оцінки й уніфікує результати. Інтуїтивний графічний інтерфейс забезпечує користувачеві можливість швидко налаштовувати параметри обробки й отримувати результати у форматі векторних даних, придатних для подальшого аналізу й картографування.

У процесі тестування плагіна визначено перспективні напрями його вдосконалення, зокрема впровадження роздільного аналізу позитивних і негативних зміщень. Такий підхід враховує різну природу фізичних процесів, що зумовлюють аномалії протилежного знака – наприклад, просідання ґрунту або підняття поверхні під впливом природних чи техногенних чинників. Розмежування цих процесів підвищує точність інтерпретації результатів і сприяє ефективнішому ухваленню рішень у системах просторового моніторингу.

Отже, розроблений плагін є дієвим інструментом для досліджень у галузі дистанційного зондування Землі. Його використання дає змогу зменшити часові витрати на обробку супутникових даних, підвищити точність оцінки деформацій і стандартизувати підходи до геоінформаційного аналізу. Інтеграція плагіна в середовищі ГІС відкриває нові можливості для моніторингу природних і техногенних процесів різного масштабу.

Новизна дослідження. Наукова новизна дослідження полягає у створенні спеціалізованого інструменту для QGIS, який забезпечує автоматизовану ідентифікацію геопросторових аномалій на основі статистичного аналізу супутникових даних із можливістю диференційованого оцінювання змін. Це підвищує точність інтерпретації результатів і розширює аналітичний потенціал геоінформаційних систем у контексті моніторингу геодинамічних процесів.

Список використаних джерел:

1. Folini A., Lenzi E., Biraghi, C. A. Cluster analysis: A comprehensive and versatile QGIS plugin for pattern recognition in geospatial data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022. XLVIII-4/W1-2022. P. 151–157. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W1-2022-151-2022
2. Gavade A. B., Rajpurohit V. S. Systematic analysis of satellite image-based land cover classification techniques: literature review and challenges. *International Journal of Computers and Applications*. 2021. Vol. 43 (6). P. 514–523. DOI: 10.1080/1206212X.2019.1573946
3. Hudak V., Kril T., Zatserkovnyi V. Remote monitoring of vertical ground displacements as indicators of underground structure deformation. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2025. Vol. 1 (108). P. 94–102. DOI: 10.17721/1728-2713.108.13
4. Hudak V., Kril T. Gaussian Process Regression for D-InSAR Analysis of Vertical Surface Displacements Above Underground Structures. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. European Association of Geoscientists & Engineers. 2025. № 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2025510054
5. Hytla P. C., Hardie R. C., Eismann M. T., Meola J. Anomaly detection in hyperspectral imagery: Comparison of methods using diurnal and seasonal data. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2009. Vol. 3 (1). P. 033546.
6. Janz A., Jakimow B., van der Linden S., Thiel F., Dierkes H. AVHYAS: A free and open-source QGIS plugin for advanced hyperspectral image analysis. *2021 International Conference on Emerging Techniques in Computational Intelligence (ICETCI)*. IEEE. 2021. DOI: 10.1109/ICETCI51973.2021.9574057
7. Jain A., Duin R., Mao J. Statistical pattern recognition: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. Vol. 22 (1). P. 4–37. DOI: 10.1109/34.824819
8. Коцюбівська К. І., Тимошенко В. В. Математичні методи обробки зображень. *Цифрова платформа інформаційних технологій у соціокультурній сфері*. 2019. № 2 (1). С. 41–54. DOI: 10.31866/2617-796x.2.1.2019.175653
9. Kruglov O., Hudak V., Kruhlov B. Exploring D-InSAR Technology for Monitoring Soil Erosion: Case Study in Kharkiv Region. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. European Association of Geoscientists & Engineers. 2025. № 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2025510037
10. MASAI Project. (n.d.). MASAI: Pioneering damage assessment through AI and satellite technology. URL: <https://masai-project.eu/masai-pioneering-damage-assessment-through-ai-and-satellite-technology/> (дата звернення: 08.04.2025).
11. Minh D. H. T., Hanssen R., Rocca F. Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12 (9). P. 1364. DOI: 10.3390/rs12091364
12. QGIS Project. Fetching plugins. QGIS Documentation. URL: https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/training_manual/qgis_plugins/fetching_plugins (дата звернення: 08.04.2025).
13. Tempa K., Aryal K. R. Semi-automatic classification for rapid delineation of the geohazard-prone areas using Sentinel-2 satellite imagery. *SN Applied Sciences*. 2022. № 4 (1). P. 141. DOI: 10.1007/s42452-022-05028-6
14. Жуков М. М. Математична статистика та обробка геологічних даних. Київ : Вища школа, 2008.

References:

1. Folini, A., Lenzi, E., & Biraghi, C. A. (2022). Cluster analysis: A comprehensive and versatile QGIS plugin for pattern recognition in geospatial data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W1-2022, 151–157. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W1-2022-151-2022>
2. Gavade, A. B., & Rajpurohit, V. S. (2021). Systematic analysis of satellite image-based land cover classification techniques: literature review and challenges. *International Journal of Computers and Applications*, 43 (6), 514–523. <https://doi.org/10.1080/1206212X.2019.1573946>
3. Hudak, V., Kril, T., & Zatserkovnyi, V. (2025). Remote monitoring of vertical ground displacements as indicators of underground structure deformation. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (108), 94–102. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13>
4. Hudak, V., & Kril, T. (2025) Gaussian Process Regression for D-InSAR Analysis of Vertical Surface Displacements Above Underground Structures. *18th International Conference Monitoring of Geological*

- Processes and Ecological Condition of the Environment*, European Association of Geoscientists & Engineers, 1, 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510054>
5. Hytla, P. C., Hardie, R. C., Eismann, M. T., & Meola, J. (2009). Anomaly detection in hyperspectral imagery: Comparison of methods using diurnal and seasonal data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3 (1), 033546.
 6. Janz, A., Jakimow, B., van der Linden, S., Thiel, F., & Dierkes, H. (2021). AVHYAS: A free and open-source QGIS plugin for advanced hyperspectral image analysis. *2021 International Conference on Emerging Techniques in Computational Intelligence (ICETCI)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICETCI51973.2021.9574057>
 7. Jain, A., Duin, R., & Mao, J. (2000). Statistical pattern recognition: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22 (1), 4–37. <https://doi.org/10.1109/34.824819>
 8. Kotsiubivska, K., & Tymoshenko, V. (2019). Mathematical methods of image processing. *Digital Platform Information Technologies in Sociocultural Sphere*, 2 (1), 41–54. <https://doi.org/10.31866/2617-796x.2.1.2019.175653> [in Ukrainian].
 9. Kruglov, O., Hudak, V., & Kruhlov, B. (2025, April). Exploring D-InSAR Technology for Monitoring Soil Erosion: Case Study in Kharkiv Region. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. European Association of Geoscientists & Engineers, 1, 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510037>
 10. MASAI Project. (n.d.). MASAI: Pioneering damage assessment through AI and satellite technology. Retrieved 08.04.2025 from <https://masai-project.eu/masai-pioneering-damage-assessment-through-ai-and-satellite-technology/>
 11. Minh, D. H. T., Hanssen, R., & Rocca, F. (2020). Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, 12 (9), 1364. <https://doi.org/10.3390/rs12091364>.
 12. QGIS Project. (2024). Fetching plugins. QGIS Documentation. Retrieved 08.04.2025 from https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/training_manual/qgis_plugins/fetching_plugins.html
 13. Tempa, K., & Aryal, K. R. (2022). Semi-automatic classification for rapid delineation of the geohazard-prone areas using Sentinel-2 satellite imagery. *SN Applied Sciences*, 4 (1), 141. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05028-6>.
 14. Zhukov, M. N. (2008). Mathematical statistics and processing of geological data. K.: *Vyshcha Shkola* [in Ukrainian].



Дата надходження статті: 21.12.2025

Дата прийняття статті: 10.08.2025

Опубліковано: 30.12.2025