МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГУДАК ВАСИЛЬ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 528.9:551.3:004.8

ДИСЕРТАЦІЯ

МОНІТОРИНГ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ТЕРИТОРІЇ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ ЗАСОБАМИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Спеціальність 103 – «Науки про Землю»
Галузь знань 10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Василь ГУДАК

Науковий керівник: Зацерковний Віталій Іванович, доктор технічних наук, професор

Київ - 2026

АНОТАЦІЯ

Гудак В. М. Моніторинг екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 103 «Науки про Землю». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено розробленню методичного та геоінформаційного забезпечення комплексного моніторингу екзогенних геологічних процесів території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» на основі інтегрування різнорідних даних, автоматизованого виявлення геопросторових аномалій за супутниковими зображеннями та нейромережевого моделювання геологічної нестійкості.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю збереження об’єктів історико-культурної спадщини, розташованих у складних інженерно-геологічних умовах. Територія Києво-Печерської лаври характеризується розчленованим рельєфом, поширенням лесових і піщаних ґрунтів, наявністю печерних комплексів, історичної забудови та розгалуженої інженерної інфраструктури. Поєднання зазначених особливостей зі змінами гідрогеологічного режиму, перезволоженням, суфозійно-просадковими явищами, схиловими процесами та деформаціями нерухомих пам’яток визначає потребу в систематичному контролі стану геологічного середовища.

Наявні матеріали моніторингу представлені різними за просторовим охопленням, часовою періодичністю та формою подання гідрогеологічними, геодезичними, геофізичними, інженерно-геологічними й дистанційними даними. Це ускладнює їх комплексне використання та визначає необхідність формування єдиної геоінформаційної основи. Традиційні інтегральні балові методи забезпечують узагальнення природних і техногенних факторів, однак не повною мірою враховують нелінійні просторові залежності та взаємодію суміжних ділянок геологічного середовища.

Геологічну нестійкість розглянуто як інтегральну просторово-часову характеристику стану геологічного середовища, що відображає схильність території до розвитку екзогенних геологічних процесів під сукупним впливом природних і техногенних чинників. На відміну від ризику, її оцінювання не охоплює експозицію, вразливість об’єктів і можливі втрати.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об’єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про зв’язок роботи з науковими програмами й проєктами, особистий внесок здобувача, апробацію та публікації за темою дисертації.

Метою роботи є розроблення методичного та геоінформаційного забезпечення комплексного моніторингу екзогенних геологічних процесів території Києво-Печерської лаври на основі інтегрування різнорідних геопросторових даних, автоматизованого виявлення аномальних зон за супутниковими зображеннями та нейромережевого моделювання геологічної нестійкості.

Об’єктом дослідження є геологічне середовище території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів. Предметом дослідження є методи геоінформаційного інтегрування даних моніторингу, автоматизованого виявлення геопросторових аномалій і нейромережевого моделювання просторового розподілу геологічної нестійкості території.

У роботі застосовано методи інженерно-геологічного аналізу, математичної статистики, багатовимірного аналізу даних, багатокритеріального оцінювання, дистанційного зондування Землі, цифрового опрацювання зображень, супутникової радарної інтерферометрії, геоінформаційного аналізу, машинного та глибокого навчання. Програмну реалізацію виконано мовою Python із використанням бібліотек NumPy, SciPy, GDAL і PyTorch. Авторський інструмент реалізовано як плагін для QGIS, а підготовку частини супутникових матеріалів здійснено в середовищі Google Earth Engine.

У *першому розділі* узагальнено теоретико-методологічні засади дослідження екзогенних геологічних процесів та їх впливу на урбанізовані території. Проаналізовано генетичну класифікацію процесів, механізми розвитку схилових деформацій, структурно-геологічні умови, швидкість і характер активності процесів, а також співвідношення природних і техногенних чинників.

Обґрунтовано необхідність інтегрування класифікаційних ознак у геоінформаційному середовищі. Геологічну нестійкість представлено як узагальнювальну категорію, що поєднує характеристики геологічної будови, рельєфу, гідрогеологічного режиму, техногенного навантаження та сучасних проявів змін стану території. Визначено групи відносно сталих, динамічних і тригерних чинників, що формують просторово-часову неоднорідність геологічного середовища.

У *другому розділі* систематизовано методи моніторингу екзогенних геологічних процесів та оцінювання геологічної нестійкості урбанізованих територій. Розглянуто польові й інженерно-геологічні, геодезичні, геофізичні, гідрогеологічні та дистанційні методи. Визначено їх інформаційні можливості, просторові масштаби та обмеження.

Проаналізовано геоінформаційні методи організації, інтегрування та просторового аналізу даних моніторингу, методи автоматизованого виявлення геопросторових аномалій, а також детерміновані, статистичні, багатокритеріальні й нейромережеві підходи до моделювання. Обґрунтовано комплексний методичний підхід, що поєднує наземні, дистанційні й геоінформаційні дані та передбачає використання гібридної згортково-трансформерної моделі для просторового уточнення інтегральної оцінки геологічної нестійкості.

У *третьому розділі* охарактеризовано природні й техногенні умови території Києво-Печерської лаври. Розглянуто геологічну та інженерно-геологічну будову, геоморфологічні й гідрогеологічні умови, поширення підземних споруд, особливості історичної забудови та вплив інженерної інфраструктури. Систематизовано задокументовані прояви підтоплення,

перезволоження, суфозійно-просадкових і схилових процесів, провалів та деформацій нерухомих пам’яток.

Узагальнено накопичені матеріали режимних, геодезичних, геофізичних і дистанційних спостережень. На основі вибірки з геоінформаційної бази «LAVRA-GEO» сформовано уніфіковану просторову основу дослідження з розміром елементарної просторової одиниці 5 × 5 м. До складу інформаційної основи включено 17 природних і техногенних факторів, характеристики рівнів ґрунтових вод, показник деформаційного стану та ознаку геопросторової аномалії.

Виконано статистичне обґрунтування складу ознак із використанням кореляційного аналізу, методу головних компонент і факторного аналізу. Установлено, що збереження вихідних факторів забезпечує їх фізичну інтерпретованість і можливість співвіднесення результатів моделювання з конкретними геологічними, гідрогеологічними й техногенними умовами.

У *четвертому розділі* розроблено та апробовано авторський геоінформаційний плагін для автоматизованого виявлення аномальних зон у растрових даних. Інструмент реалізовано в середовищі QGIS і призначено для статистичного аналізу розподілу значень растра, виділення аномальних ділянок, їх автоматизованої векторизації та формування атрибутивно наповненого просторового шару.

Алгоритм ґрунтується на нормованому визначенні відхилень від фонового рівня, що забезпечує його застосування до даних із різними одиницями вимірювання та фізичною природою. Плагін апробовано на багатоспектральних, теплових та інтерферометричних супутникових матеріалах. Отримані результати підтвердили інваріантність математичної основи алгоритму щодо типу вхідних растрових даних.

Застосування інструмента для багаторічного моніторингу території Києво-Печерської лаври дало змогу виявити зони зміненого зволоження, оцінити їх просторово-часову динаміку та зіставити з результатами наземних спостережень. Установлено приуроченість стійких аномалій до окремих частин

саду над Ближніми печерами, схилових ділянок і територій із порушеним водообміном. Виявлені аномалії використано як окрему просторову ознаку під час формування вхідних даних нейромережевої моделі.

У *п'ятому розділі* сформовано цільову оцінку геологічної нестійкості на основі зваженого агрегування природних і техногенних факторів методики «LAVRA-GEO». Додаткові характеристики гідрогеологічної динаміки, деформаційного стану та геопросторових аномалій використано як самостійні вхідні ознаки, що не входять до безпосереднього розрахунку цільового індексу.

Підготовлено багатоканальний просторово-часовий масив ознак. Часові ряди рівнів ґрунтових вод представлено середнім значенням, коефіцієнтом лінійного тренду й амплітудою коливань. Для відновлення пропущених спостережень застосовано ітеративну імпутацію на основі випадкового лісу.

Обґрунтовано використання гібридної архітектури U-Net–Transformer, що поєднує виділення локальних і багатомасштабних просторових ознак із урахуванням ширшого просторового контексту. Для зменшення впливу просторової автокореляції застосовано блоковий поділ даних на навчальну й валідаційну підмножини. Дисбаланс цільових класів ураховано за допомогою зваженої функції втрат.

Загальна точність класифікації на просторово відокремленій валідаційній підмножині перевищила 0,85, F1-міра для небезпечного класу становила близько 0,83, а макроусереднене значення ROC-AUC перевищило 0,90.

За результатами моделювання побудовано карту з виділенням відносно стійкого, незадовільного й небезпечного рівнів геологічної нестійкості. Ділянки небезпечного рівня приурочені переважно до Ближніх і Дальніх печер, схилів Ближньопечерного та Дальньопечерного пагорбів, бортів і тальвегу Лаврського яру, а також окремих об'єктів історичної забудови й інженерної інфраструктури.

Внутрішню узгодженість результатів установлено шляхом зіставлення нейромережевої карти з вихідною інтегральною оцінкою. Змістову обґрунтованість просторового розподілу нестійкості підтверджено задокументованими провалами, просіданнями й деформаціями земної поверхні,

даними PS-InSAR та результатами геофізичних досліджень. Узгодженість різних за фізичною природою джерел підтвердила відповідність виділених ділянок особливостям деформаційного й гідрогеологічного стану території.

Результати нейромережевого моделювання запропоновано інтегрувати до системи комплексного моніторингу як узагальнювальний просторовий шар. Періодична актуалізація карти за новими режимними, деформаційними та дистанційними даними забезпечує зіставлення стану території за різні періоди, виявлення несприятливої динаміки та обґрунтування деталізованих досліджень. Перспективи розвитку підходу пов’язані з прогнозуванням часових рядів рівнів ґрунтових вод і вертикальних зміщень земної поверхні.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні понятійних і методичних засад геоінформаційного оцінювання геологічної нестійкості урбанізованих територій; розробленні QGIS-плагіна для автоматизованого статистичного виявлення та векторизації геопросторових аномалій; обґрунтуванні й реалізації гібридної моделі U-Net–Transformer для нелінійного просторового уточнення інтегральної оцінки нестійкості території історико-культурної спадщини; створенні й верифікації карти геологічної нестійкості Києво-Печерської лаври та обґрунтуванні процедури її актуалізації за результатами нових спостережень.

Практичне значення результатів полягає у створенні геоінформаційного забезпечення для комплексного аналізу стану геологічного середовища Києво-Печерської лаври. Отримана карта може використовуватися для зіставлення різночасових моніторингових даних, виявлення несприятливої динаміки та обґрунтування деталізованих інженерно-геологічних спостережень. Розроблений QGIS-плагін має самостійне практичне значення та може застосовуватися для автоматизованого аналізу різнотипних растрових даних.

Основні наукові результати дисертації опубліковано у 6 статтях, 4 з яких включено до міжнародної наукометричної бази Scopus. Результати дослідження апробовано на всеукраїнських і міжнародних наукових конференціях у галузі

наук про Землю, геоінформатики, моніторингу геологічних процесів, дистанційного зондування та моделювання геонебезпек.

Ключові слова: екзогенні геологічні процеси, геологічна нестійкість, інженерно-геологічний моніторинг, геоінформаційні системи, дистанційне зондування Землі, геопросторові аномалії, супутникова радарна інтерферометрія, нейромережеве моделювання, U-Net, Transformer, QGIS, Києво-Печерська лавра, історико-культурна спадщина.

ABSTRACT

Hudak, V. M. Monitoring of Exogenous Geological Processes within the Territory of the Kyiv-Pechersk Lavra Using Geographic Information Systems. Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 10 “Natural Sciences”, speciality 103 “Earth Sciences”. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of the methodological and geoinformation support for the integrated monitoring of exogenous geological processes on the territory of the National Reserve “Kyiv-Pechersk Lavra”, based on the integration of heterogeneous data, the automated detection of geospatial anomalies from satellite imagery, and the neural-network modelling of geological instability.

The relevance of the study stems from the need to preserve objects of historical and cultural heritage located under complex engineering-geological conditions. The territory of the Kyiv-Pechersk Lavra is characterised by dissected relief, the widespread occurrence of loess and sandy soils, the presence of cave complexes, historical development, and an extensive engineering infrastructure. The combination of these features with changes in the hydrogeological regime, waterlogging, suffosion-subsidence phenomena, slope processes, and deformations of immovable monuments determines the need for the systematic control of the state of the geological environment.

The available monitoring materials are represented by hydrogeological, geodetic, geophysical, engineering-geological, and remote-sensing data that differ in spatial coverage, temporal frequency, and form of presentation. This complicates their integrated use and determines the need to establish a unified geoinformation basis. Traditional integral scoring methods provide a generalisation of natural and anthropogenic factors; however, they do not fully account for nonlinear spatial dependencies and the interaction of adjacent parts of the geological environment.

Geological instability is regarded as an integral spatio-temporal characteristic of the state of the geological environment, reflecting the susceptibility of the territory to

the development of exogenous geological processes under the combined influence of natural and anthropogenic factors. Unlike risk, its assessment does not encompass exposure, the vulnerability of objects, or potential losses.

The introduction substantiates the relevance of the topic, defines the aim, objectives, object, subject, and methods of the study, and formulates the scientific novelty and the practical significance of the results obtained. Information is provided on the connection of the work with scientific programmes and projects, the personal contribution of the author, the approbation, and the publications on the topic of the dissertation.

The aim of the work is to develop the methodological and geoinformation support for the integrated monitoring of exogenous geological processes on the territory of the Kyiv-Pechersk Lavra, based on the integration of heterogeneous geospatial data, the automated detection of anomalous zones from satellite imagery, and the neural-network modelling of geological instability.

The object of the study is the geological environment of the territory of the National Reserve “Kyiv-Pechersk Lavra” under conditions of the development of hazardous exogenous geological processes. The subject of the study comprises methods for the geoinformation integration of monitoring data, the automated detection of geospatial anomalies, and the neural-network modelling of the spatial distribution of the geological instability of the territory.

The work employs methods of engineering-geological analysis, mathematical statistics, multivariate data analysis, multi-criteria assessment, remote sensing of the Earth, digital image processing, satellite radar interferometry, geoinformation analysis, and machine and deep learning. The software implementation was carried out in the Python language using the NumPy, SciPy, GDAL, and PyTorch libraries. The author's tool was implemented as a plugin for QGIS, and part of the satellite materials was prepared in the Google Earth Engine environment.

The first chapter generalises the theoretical and methodological foundations of the study of exogenous geological processes and their impact on urbanised territories. The genetic classification of the processes, the mechanisms of the development of

slope deformations, structural-geological conditions, the rate and character of process activity, and the relationship between natural and anthropogenic factors are analysed.

The need to integrate classification features within a geoinformation environment is substantiated. Geological instability is presented as a generalising category that combines the characteristics of the geological structure, relief, hydrogeological regime, anthropogenic loading, and contemporary manifestations of changes in the state of the territory. Groups of relatively stable, dynamic, and trigger factors that form the spatio-temporal heterogeneity of the geological environment are identified.

The second chapter systematises the methods for monitoring exogenous geological processes and assessing the geological instability of urbanised territories. Field and engineering-geological, geodetic, geophysical, hydrogeological, and remote-sensing methods are considered. Their information capabilities, spatial scales, and limitations are determined.

Geoinformation methods for the organisation, integration, and spatial analysis of monitoring data, methods for the automated detection of geospatial anomalies, as well as deterministic, statistical, multi-criteria, and neural-network approaches to modelling are analysed. An integrated methodological approach is substantiated that combines ground-based, remote-sensing, and geoinformation data and envisages the use of a hybrid convolutional–transformer model for the spatial refinement of the integral assessment of geological instability.

The third chapter characterises the natural and anthropogenic conditions of the territory of the Kyiv-Pechersk Lavra. The geological and engineering-geological structure, geomorphological and hydrogeological conditions, the distribution of underground structures, the features of the historical development, and the impact of the engineering infrastructure are considered. Documented manifestations of underflooding, waterlogging, suffosion-subsidence and slope processes, sinkholes, and deformations of immovable monuments are systematised.

The accumulated materials of regime, geodetic, geophysical, and remote-sensing observations are generalised. On the basis of a sample from the “LAVRA-GEO”

geoinformation database, a unified spatial framework of the study was formed with an elementary spatial unit of 5 × 5 m. The information framework includes 17 natural and anthropogenic factors, characteristics of groundwater levels, an indicator of the deformation state, and a geospatial anomaly attribute.

A statistical substantiation of the composition of the features was performed using correlation analysis, principal component analysis, and factor analysis. It was established that retaining the original factors ensures their physical interpretability and the possibility of relating the modelling results to specific geological, hydrogeological, and anthropogenic conditions.

The fourth chapter presents the development and testing of the author's geoinformation plugin for the automated detection of anomalous zones in raster data. The tool was implemented in the QGIS environment and is intended for the statistical analysis of the distribution of raster values, the delineation of anomalous areas, their automated vectorisation, and the generation of an attribute-populated spatial layer.

The algorithm is based on the normalised determination of deviations from the background level, which ensures its applicability to data with different units of measurement and physical nature. The plugin was tested on multispectral, thermal, and interferometric satellite materials. The results obtained confirmed the invariance of the mathematical basis of the algorithm with respect to the type of input raster data.

The application of the tool for the long-term monitoring of the territory of the Kyiv-Pechersk Lavra made it possible to identify zones of altered moistening, to assess their spatio-temporal dynamics, and to compare them with the results of ground-based observations. It was established that stable anomalies are confined to particular parts of the garden above the Near Caves, slope areas, and territories with disturbed water exchange. The identified anomalies were used as a separate spatial feature in the formation of the input data for the neural-network model.

The fifth chapter presents the target assessment of geological instability formed on the basis of the weighted aggregation of natural and anthropogenic factors according to the “LAVRA-GEO” methodology. Additional characteristics of hydrogeological

dynamics, the deformation state, and geospatial anomalies were used as independent input features that are not included in the direct calculation of the target index.

A multi-channel spatio-temporal array of features was prepared. The time series of groundwater levels were represented by the mean value, the coefficient of the linear trend, and the amplitude of fluctuations. Iterative imputation based on a random forest was applied to recover missing observations.

The use of a hybrid U-Net–Transformer architecture is substantiated, which combines the extraction of local and multi-scale spatial features with the consideration of a broader spatial context. To reduce the influence of spatial autocorrelation, a block-based partitioning of the data into training and validation subsets was applied. The imbalance of the target classes was accounted for by means of a weighted loss function.

The overall classification accuracy on the spatially separated validation subset exceeded 0.85, the F1-score for the hazardous class was approximately 0.83, and the macro-averaged ROC-AUC value exceeded 0.90.

Based on the modelling results, a map was produced delineating relatively stable, unsatisfactory, and hazardous levels of geological instability. The areas of the hazardous level are confined mainly to the Near and Far Caves, the slopes of the Near-Cave and Far-Cave hills, the sides and thalweg of the Lavra ravine, as well as to individual objects of the historical development and the engineering infrastructure.

The internal consistency of the results was established by comparing the neural-network map with the original integral assessment. The substantive validity of the spatial distribution of instability was confirmed by documented sinkholes, subsidence, and deformations of the ground surface, by PS-InSAR data, and by the results of geophysical investigations. The agreement of sources of different physical nature confirmed the correspondence of the delineated areas to the features of the deformation and hydrogeological state of the territory.

It is proposed that the results of the neural-network modelling be integrated into the system of integrated monitoring as a generalising spatial layer. The periodic updating of the map with new regime, deformation, and remote-sensing data ensures the comparison of the state of the territory over different periods, the detection of

unfavourable dynamics, and the substantiation of detailed investigations. The prospects for the development of the approach are associated with the forecasting of time series of groundwater levels and vertical displacements of the ground surface.

The scientific novelty of the results obtained lies in the improvement of the conceptual and methodological foundations of the geoinformation assessment of the geological instability of urbanised territories; in the development of a QGIS plugin for the automated statistical detection and vectorisation of geospatial anomalies; in the substantiation and implementation of a hybrid U-Net–Transformer model for the nonlinear spatial refinement of the integral assessment of the instability of a territory of historical and cultural heritage; and in the creation and verification of a map of the geological instability of the Kyiv-Pechersk Lavra and the substantiation of the procedure for its updating on the basis of new observations.

The practical significance of the results lies in the creation of geoinformation support for the integrated analysis of the state of the geological environment of the Kyiv-Pechersk Lavra. The resulting map can be used to compare monitoring data from different periods, to detect unfavourable dynamics, and to substantiate detailed engineering-geological observations. The developed QGIS plugin has independent practical significance and can be applied to the automated analysis of raster data of various types.

The main scientific results of the dissertation have been published in 6 articles, 4 of which are indexed in the international scientometric database Scopus. The results of the study have been presented at national and international scientific conferences in the fields of Earth sciences, geoinformatics, the monitoring of geological processes, remote sensing, and the modelling of geohazards.

Keywords: exogenous geological processes, geological instability, engineering-geological monitoring, geographic information systems, remote sensing of the Earth, geospatial anomalies, satellite radar interferometry, neural-network modelling, U-Net, Transformer, QGIS, Kyiv-Pechersk Lavra, historical and cultural heritage.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації (6, у т.ч. 4 включені до міжнародної наукометричної бази Scopus):

1. Черевко, І., Зацерковний, В., Трофименко, П., Пампуха, І., Попков, Б., & **Гудак, В.** (2022). Застосування бази геоданих режимних спостережень за гідрогеологічними умовами території Києво-Печерської лаври та її аналіз. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(98), 92-103. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.12 (Стаття включена до міжнародної наукометричної бази Web of Science).

Особистий внесок: автором розроблено методологію дослідження, сфомовано геоінфомраційну базу дослідження, виконано написання основного тексту, сформовано висновки дослідження.

2. **Hudak, V.**, Kril, T., & Zatserkovnyi, V. (2025). Remote Sensing Analysis of Vertical Surface Displacements as an Indicator of Underground Structure Deformations. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 94-102. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13 (Стаття включена до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором виконано написання основного тексту та його редагування, розроблено методологію дослідження, виконано написання програмного коду, сформовано висновки дослідження.

3. **Hudak, V.**, Marhes S., Zatserkovnyi, V., & De Donatis, M. (2025) Methodology for the Automated Detection of Anomalous Geospatial Zones in Satellite Imagery Using Statistical Analysis and a Custom QGIS Plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (110), 117-125. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.110.13 (Стаття включена до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором виконано написання основного тексту, розробленого методологію дослідження, проведено тестування вхідних даних, проаналізовано результати та сформовано висновки.

4. **Гудак, В.**, Маргес С., & Зацерковний, В. (2025). Розробка інтерактивного засобу виявлення та аналізу геопросторових аномалій у QGIS на основі супутникових даних. *Географічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*, 6(6). DOI: https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2025.6.13 (Видання категорії Б)

Особистий внесок: автором опрацьовано супутникові знімки, проведено валідацію вхідних даних, сформовано результати дослідження.

5. Marhes S., **Hudak, V.**, Zatserkovnyi, V., Filipovych, V., & De Donatis, M. (2026). Detection of Soil Degradation Processes in River Basins Using Satellite Indices and a Custom QGIS Plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (112). DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.112.14 (Стаття включена до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором виконано написання основного тексту, розробленого методологію дослідження, проведено тестування вхідних даних, проаналізовано результати та сформовано висновки.

6. **Hudak, V.**, & Zatserkovnyi, V. (2026). Data-Driven Assessment of Geological Environment Instability in Urban Heritage Areas: A Case Study of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Географічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*, 7(7). DOI: https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2026.7.14

Особистий внесок: автором виконано написання основного тексту, розробленого методологію дослідження, проведено тестування вхідних даних, проаналізовано результати та сформовано висновки.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (15, у т.ч. 8 включені до міжнародної наукометричної бази Scopus):

1. **Hudak, V.**, Cherevko, I., Zatserkovnyi, V., Ostroukh, V., & Ilchenko, A. (2020). Determining of the effects of groundwater regime on the status of architectural monuments of Kyiv-Pechersk Lavra. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 2020. Volume 2020, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo009 (Тези включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором розроблено методологію та сформовано базу даних, проведено дослідження, сформовано висновки.

2. **Hudak, V.**, Cherevko, I., Zatserkovnyi, V., Nikolaienko, O., & Lazorenko-Hevel, N. (2021). Geoinformation modeling of exogenous geological processes on the territory of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 2021. Volume 2021, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521048 (Тези включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором розроблено методологію дослідження, виконано написання основного тексту.

3. **Hudak, V.**, Zatserkovnyi, V., Cherevko, I., Ilchenko, A., & Ilyin, L. (2021). Monitoring of monuments of the Kyiv-Pechersk Lavra in the conditions of flooding processes development. *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Jan 2021, Volume 2021, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2074 (Тези включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором сформовано методологію дослідження, виконання написання основного тексту та висновків.

4. **Hudak, V.** (2024). Enhancing the Quality of Surface Displacement Maps Obtained via the D-InSAR Method Using Linear Filters. Авторська редакція збірника тез *III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів "Сучасні виклики геологічної освіти і науки"*, Львів 7-8 листопада 2024. URI: https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/10/Stud.konf.2024.pdf

5. **Гудак, В.**, & Маргес С. (2025). Автоматизований аналіз супутникових знімків в QGIS: розробка плагіна для ідентифікації аномальних зон. Авторська редакція збірника тез *XV Всеукраїнської молодіжної наукової конференції - школи «Сучасні проблеми наук про Землю»*, Київ, 10-11 квітня 2025. URI: www.geol.univ.kiev.ua/docs/conf/2025/conf_univ_apr_2025.pdf

Особистий внесок: автором розроблено модулі програмного коду, опрацьовано матеріали супутникових знімків, сформовано висновки.

6. Kruglov, O., **Hudak, V.**, & Kruhlov, B. (2025). 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*, Apr 2025, Volume 2025, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510037 (Тези включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором проведено обробку даних дистанційного зондування Землі, сформовано висновки дослідження.

7. **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*, Apr 2025, Volume 2025, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510054 (Тези включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором розроблено методологію та програмний код, проведено дослідження, сформовано висновки.

8. **Hudak, V.**, Semeniaka V., Zatserkovnyi V., Stakhiv I., Ilyin L., & Pastushenko T. (2025). Integrative Landslide Prediction Model in Transcarpathia. *Fifth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*. Sep 2025, Volume 2025, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520016 (Тези включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором виконано аналіз вихідних матеріалів моделі, розроблено методологію дослідження, сформовано висновки.

9. **Hudak, V.**, & Kril, T. (2025). Automated Reconstruction of Missing Geospatial Data at the Pre-Modeling Stage of Exogenous Geological Processes. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025"*. Oct 2025, Volume 2025, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552081 (Тези включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором проаналізовано вихідні дані, розроблено програмний код, проведено аналіз отриманих даних та сформовано висновки.

10. Marhes S., & **Hudak, V.** (2025). A GIS-based open-source tool for experimental detection of geospatial anomalies in geoecology. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2025*: тези доповідей XX Міжнарод. конф. (м. Чернігів, 10–12 листопада 2025 р.). – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – 107 с. URI: https://ir.stu.cn.ua/items/d8944c66-6730-4d00-8c7a-7e88e033d44b

Особистий внесок: автором розроблено концепцію дослідження, створено алгоритмічну структуру та програмну реалізацію, проведено експериментальні випробування на супутникових даних, сформовано висновки.

11. **Hudak, V.** (2025). Data-Driven Neural Network Approach to Geohazard Classification and Risk Evaluation. Авторська редакція збірника тез *XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Молодь: наука та інновації»*, Дніпро, 12–14 листопада 2025 (у 3-х томах) (Т. 1, с. 289-290). URI: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2025/molod-2025-vol1.pdf

12. **Гудак, В.** (2025). Нейромережеве прогнозування геологічних ризиків історико-культурних об'єктів. Авторська редакція збірника тез *XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Об'єднані наукою: перспективи міждисциплінарних досліджень»*, Київ, 20-21 листопада 2025.

13. **Гудак, В.**, & Богуш-Задніпряна А. (2026). Оцінювання просторової нестійкості геологічного середовища урбанізованих територій на основі комплексного аналізу геоданих. Авторська редакція збірника тез *XVI Всеукраїнської молодіжної наукової конференції - школи «Сучасні проблеми наук про Землю»*, Київ, 9-10 квітня 2026. URI: https://geology.knu.ua/static/docs/conf/2026/conf_univ_young_2026.pdf

Особистий внесок: автором виконано аналіз вихідних матеріалів моделі, розроблено методологію дослідження, сформовано висновки.

14. Zatserkovnyi V., **Hudak, V.**, Bohush-Zadnipriana, A. (2026). Data-Driven Assessment of Geological Environment Instability in Urban Heritage Areas Using

a Hybrid U-Net–Transformer Neural Network. *19th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Apr 2026, Volume 2026, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.202655070 (Тези включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особистий внесок: автором виконано аналіз вихідних матеріалів моделі, розроблено методологію дослідження, сформовано висновки.

Інші наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

15. Участь у виконанні держбюджетної теми № 25БП049-01(М) «Комплексні моделі та прогнозування геонебезпек природного та військового характеру та оцінки їх впливу на об’єкти критичної інфраструктури». НДЛ «Теоретичної та прикладної геофізики», Київ.

16. Участь у виконанні проєкту A Horizon Europe MSCA Staff Exchanges Project – “Localization in Geophysics, Geohazards and Geoengineering” (LOC3G – 101129729) MARIE SKLODOWSKA-CURIE ACTIONS (MSCA).

ЗМІСТ

ВСТУП..... 26

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ТЕХНОГЕННИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА УРБАНІЗОВАНІ ТЕРИТОРІЇ. 33

1.1. Загальна характеристика впливу екзогенних геологічних процесів і техногенних навантажень на урбанізовані території 33

1.2. Теоретичні засади класифікації екзогенних геологічних процесів 36

1.2.1. Генетична класифікація екзогенних геологічних процесів 37

1.2.2. Класифікація схилових процесів за механізмом розвитку та типом переміщуваного матеріалу 39

1.2.3. Структурно-геологічна класифікація екзогенних геологічних процесів 41

1.2.4. Класифікація екзогенних геологічних процесів за швидкістю розвитку та характером активності 43

1.2.5. Класифікація екзогенних геологічних процесів за співвідношенням природних і техногенних чинників 44

1.2.6. Інтеграція класифікаційних ознак екзогенних геологічних процесів як основа геоінформаційного моделювання 46

1.3. Геологічна нестійкість як інтегральна категорія геоінформаційного оцінювання екзогенних геологічних процесів 47

1.3.1. Нормативно-правові та методичні передумови формування інтегрального поняття геологічної нестійкості 48

1.3.2. Концептуальні засади оцінювання геологічної нестійкості 53

Висновки до розділу 1 57

Список використаних джерел до розділу 1 58

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОЦІНЮВАННЯ ГЕОЛОГІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ..... 64

2.1. Загальна характеристика методів моніторингу екзогенних геологічних процесів 64
2.1.1. Польові та інженерно-геологічні методи 65
2.1.2. Геодезичні методи спостережень 67
2.1.3. Геофізичні та гідрогеологічні методи 68
2.1.4. Методи дистанційного зондування Землі 71
2.2. Геоінформаційні методи інтегрування та просторового аналізу даних 75
2.2.1. Інтегрування та підготовка геопросторових даних 75
2.2.2. Автоматизоване виявлення геопросторових аномалій 78
2.3. Методи моделювання та прогнозування екзогенних геологічних процесів 80
2.3.1. Детерміновані, статистичні та багатокритеріальні підходи 81
2.3.2 Машинне, глибоке та гібридне навчання 83
2.4. Обґрунтування комплексного методичного підходу дослідження 86
2.4.1. Формування комплексного підходу до оцінювання геологічної нестійкості 87
2.4.2. Загальна методична схема дослідження 89
Висновки до розділу 2 91
Список використаних джерел до розділу 2 92
РОЗДІЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРИТОРІЇ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ ТА ФОРМУВАННЯ ГЕОПРОСТОРОВОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ 99
3.1. Природні та техногенні умови формування геологічної нестійкості території 99
3.1.1. Геологічна та інженерно-геологічна будова 101
3.1.2. Геоморфологічні та гідрогеологічні умови 105
3.1.3. Підземні споруди, історична забудова та техногенне навантаження 108
3.2. Прояви екзогенних геологічних процесів та система моніторингу території 110

3.2.1 Прояви процесів та чинники їх розвитку 110
3.2.2. Мережа наземних спостережень і моніторингові дані 112
3.2.3. Супутникові дані та результати дистанційних спостережень ... 115
3.3. Формування геопросторової інформаційної основи дослідження 119
3.3.1. Геоінформаційна база «LAVRA-GEO» та додаткові джерела даних..... 120
3.3.2. Просторово-часове узгодження та формування набору ознак... 123
3.3.3. Статистична характеристика сформованого набору даних..... 128
Висновки до розділу 3 135
Список використаних джерел до розділу 3 136
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО ПЛАГІНА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛЬНИХ ЗОН..... 142
4.1. Концептуальні засади автоматизованого виявлення геопросторових аномалій 142
4.1.1. Методичні принципи автоматизованого виявлення геопросторових аномалій 143
4.1.2. Просторова розрізненність та інформаційні можливості супутникових даних..... 144
4.1.3. Місце результатів автоматизованого виявлення аномалій у системі геоінформаційного моніторингу 146
4.2. Розроблення та програмна реалізація плагіна «Anomalies to Contours» 147
4.2.1. Програмна архітектура та функціональні модулі плагіна..... 148
4.2.2. Алгоритм статистичного виявлення аномальних значень 150
4.2.3. Полігонізація та просторова фільтрація аномальних зон 153
4.2.4 Формування та атрибутивне наповнення вихідного шару 155
4.3. Апробація плагіна на різнотипних супутникових даних 156
4.3.1. Методика та критерії апробації плагіна 156
4.3.2. Апробація плагіна на різнотипних супутникових даних..... 157

4.4. Застосування плагіна для виявлення аномалій стану території Києво-Печерської лаври 160
4.4.1. Виявлення аномалій стану земної поверхні за спектральними індексами 160
4.4.2. Аналіз просторово-часової динаміки та верифікація виявлених аномалій 164
4.5. Інтеграція результатів виявлення аномалій у систему оцінювання геологічної нестійкості 168
Висновки до розділу 4 171
Список використаних джерел до розділу 4 172
РОЗДІЛ 5. НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОЛОГІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ ТЕРИТОРІЇ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ 176
5.1. Формування цільової оцінки та ознакового простору моделі 176
5.1.1. Склад і функціональне призначення вхідних ознак 177
5.1.2. Підготовка багатоканального просторово-часового масиву ознак 179
5.1.3. Формування інтегрального індексу геологічної нестійкості 183
5.1.4. Формування цільових класів геологічної нестійкості 185
5.2. Гібридна нейромережева модель U-Net–Transformer 187
5.2.1. Формування модельної вибірки та просторовий поділ даних 188
5.2.2. Обґрунтування вибору та архітектура гібридної моделі 190
5.2.3. Навчання та вибір оптимального стану моделі 195
5.2.4. Оцінювання якості моделі 197
5.3. Результати просторово-часового моделювання геологічної нестійкості території 200
5.3.1. Формування різночасових карт геологічної нестійкості 201
5.3.2. Просторово-часова диференціація класів геологічної нестійкості 202
5.3.3. Геологічна інтерпретація ділянок небезпечного класу 204
5.4. Верифікація результатів просторово-часового моделювання 206

5.4.1. Внутрішня узгодженість модельної та інтегральної оцінок..... 207
5.4.2. Верифікація за незалежними деформаційними, радарними та геофізичними даними 210
5.5. Практичне застосування результатів у системі моніторингу Києво-Печерської лаври 213
Висновки до розділу 5 218
Список використаних джерел до розділу 5 220
ВИСНОВКИ 226
ДОДАТКИ 228

ВСТУП

Актуальність теми. Збереження об’єктів історико-культурної спадщини, розташованих у складних інженерно-геологічних умовах, потребує систематичного контролю стану геологічного середовища та своєчасного виявлення ознак розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів. Особливої актуальності ця проблема набуває для території Києво-Печерської лаври, де розчленований рельєф, поширення лесових і піщаних ґрунтів, наявність підземних споруд, історичної забудови та інженерної інфраструктури поєднуються зі змінами гідрогеологічного режиму, перезволоженням, суфозійно-просадковими й схиловими процесами та деформаціями нерухомих пам’яток.

Теоретичні засади вивчення екзогенних геологічних процесів розроблено у працях Дранникова А. М., Ємельянової Є. П., Varnes D. J., Hungr O., Fell R. Питання інженерно-геологічного оцінювання та моніторингу урбанізованих територій досліджували Демчишин М. Г., Іванік О. М., Кошляков О. Є. Методи багатокритеріального просторового оцінювання природних небезпек розвинуто в роботах Reichenbach P., Merghadi A., Highland L., Wu W., Bobrowsky P., а застосування машинного та глибокого навчання до аналізу геологічних небезпек представлено у працях Ma Z., Mei G., Noroozi M., Riahi M. Інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови Києво-Печерської лаври і прояви небезпечних процесів на її території висвітлено у працях Демчишина М. Г., Черевко І. А., Кріль Т. В., Шехунової С. Б., Рибіна В.Ф., Скальського О. С., Піщаного Ю. М., Корчагіна І. М. та інших дослідників.

Накопичені матеріали моніторингу представлені різними за просторовим охопленням, періодичністю та формою подання режимними, геодезичними, геофізичними й дистанційними даними, що ускладнює їх комплексне використання. Інтегральні балові методи забезпечують узагальнення природних і техногенних факторів, однак недостатньо враховують нелінійні просторові залежності та взаємодію суміжних ділянок геологічного середовища.

Геологічну нестійкість у роботі визначено як інтегральну просторово-часову характеристику стану геологічного середовища, що відображає схильність території до розвитку екзогенних геологічних процесів внаслідок взаємодії природних і техногенних чинників.

На відміну від ризику, її оцінювання не охоплює експозицію, вразливість об’єктів і можливі втрати, а ґрунтується на поєднанні відносно сталих факторів, динамічних характеристик гідрогеологічного і деформаційного стану та дистанційно виявлених змін поверхні. Це зумовлює актуальність розроблення комплексного геоінформаційного підходу, що забезпечує інтегрування різнорідних даних моніторингу, автоматизоване виявлення геопросторових аномалій, просторове уточнення інтегральної оцінки геологічної нестійкості та актуалізацію результатів за надходження нових спостережень.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в рамках наукових досліджень ННІ «Інститут геології» в межах молодіжної держбюджетної теми №25БП049-01(М) «Комплексні моделі та прогнозування геонебезпек природного та військового характеру та оцінки їх впливу на об’єкти критичної інфраструктури» (державний реєстраційний номер 0125U001125). Окремі дослідження виконано в межах проєкту Horizon Europe «Localization in Geophysics, Geohazards and Geoengineering» (LOC3G, грантова угода № 101129729) за програмою Marie Skłodowska-Curie Actions Staff Exchanges.

Мета роботи полягає в розробленні й науковому обґрунтуванні методичного та геоінформаційного забезпечення комплексного моніторингу стану геологічного середовища та проявів екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври шляхом інтегрування різнорідних геопросторових даних, автоматизованого виявлення аномальних зон за супутниковими зображеннями та нейромережевого моделювання геологічної нестійкості.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Проаналізувати теоретико-методологічні засади дослідження екзогенних геологічних процесів на урбанізованих територіях, узагальнити підходи до їх класифікації та обґрунтувати поняття геологічної нестійкості як інтегральної категорії геоінформаційного моделювання.

2. Систематизувати сучасні наземні, дистанційні, геоінформаційні та модельні методи дослідження екзогенних геологічних процесів і обґрунтувати комплексний методичний підхід до моніторингу території.

3. Проаналізувати природні й техногенні умови Києво-Печерської лаври, систематизувати задокументовані прояви процесів і накопичені матеріали спостережень, сформувати уніфіковану геопросторову інформаційну основу та обґрунтувати склад інформативних ознак.

4. Розробити геоінформаційний інструмент для автоматизованого статистичного виявлення та атрибутивного опису аномальних зон у растрових даних, апробувати його на різнотипних супутникових матеріалах і застосувати для моніторингу території Заповідника.

5. Сформувати інтегральну цільову оцінку геологічної нестійкості, обґрунтувати архітектуру та адаптувати нейромережеву модель для її нелінійного просторового уточнення з врахуванням природних, техногенних і динамічних характеристик території.

6. Виконати картографування геологічної нестійкості, оцінити якість моделювання, верифікувати результати за фактичними проявами процесів, даними супутникової радарної інтерферометрії та геофізичних досліджень, а також обґрунтувати інтеграцію отриманої карти до системи комплексного моніторингу досліджуваної території.

Об’єкт дослідження: геологічне середовище території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів.

Предмет дослідження: методи геоінформаційного інтегрування даних моніторингу, автоматизованого виявлення геопросторових аномалій і

нейромережевого моделювання просторового розподілу геологічної нестійкості території.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи інженерно-геологічного аналізу, математичної статистики й багатовимірного аналізу даних, зокрема кореляційний аналіз, метод головних компонент і факторний аналіз; методи багатокритеріального оцінювання та аналізу ієрархій; методи дистанційного зондування Землі, цифрового опрацювання зображень і радарної інтерферометрії; геоінформаційні методи інтегрування, просторового аналізу, растеризації, інтерполяції та картографічного моделювання; методи машинного й глибокого навчання, включаючи випадковий ліс, згорткові нейронні мережі та трансформерні архітектури. Програмну реалізацію виконано мовою Python із використанням бібліотек NumPy, SciPy, GDAL і PyTorch. Авторський інструмент реалізовано як плагін QGIS, а підготовку частини супутникових матеріалів виконано із застосуванням Google Earth Engine.

Наукова новизна одержаних результатів.

Удосконалено:

- понятійні засади оцінювання геологічної нестійкості урбанізованих територій шляхом її представлення як інтегральної просторово-часової характеристики стану геологічного середовища, зумовленої сукупним впливом природних і техногенних чинників;
- методичні засади формування геоінформаційної основи комплексного моніторингу шляхом просторового узгодження факторних, режимних, деформаційних і дистанційних даних та обґрунтування складу інформативних ознак.

Уперше:

- для задач комплексного моніторингу геологічного середовища урбанізованих територій розроблено та апробовано QGIS-плагін, що реалізує єдину процедуру статистичного виявлення, просторового об’єднання, векторизації й атрибутивного опису аномальних зон у різнотипних растрових даних;

- для території Києво-Печерської лаври обґрунтовано й реалізовано гібридну модель U-Net–Transformer для просторового моделювання класів інтегральної оцінки геологічної нестійкості з урахуванням гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних ознак;
- отримано карту геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври з виділенням відносно стійкого, незадовільного та небезпечного рівнів, верифіковану за фактичними проявами процесів, даними PS-InSAR і результатами геофізичних досліджень;
- обґрунтовано процедуру актуалізації карти за результатами нових режимних, деформаційних і дистанційних спостережень у системі комплексного моніторингу.

Набули подальшого розвитку:

- методи автоматизованого аналізу багаторічних супутникових даних для виявлення просторово-часових змін зон зволоження та порушеного стану поверхні;
- підходи до верифікації геопросторових оцінок стану геологічного середовища шляхом поєднання задокументованих проявів процесів, радарних зміщень і геофізичних даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні геоінформаційного забезпечення для комплексного аналізу й періодичного оцінювання стану геологічного середовища Києво-Печерської лаври. Отримана карта може використовуватися як узагальнювальний просторовий шар у системі моніторингу для зіставлення різночасових режимних, деформаційних, геофізичних і дистанційних даних, виявлення несприятливої динаміки та обґрунтування деталізованих спостережень. Розроблений QGIS-плагін має самостійне практичне значення як відкритий інструмент автоматизованого аналізу різнотипних растрових даних. Результати дослідження можуть використовуватися установами, відповідальними за моніторинг і збереження об’єктів культурної спадщини, а також у підготовці фахівців з інженерної геології, геоінформатики та дистанційного зондування Землі.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення, методичні розробки та практичні результати дисертації отримано здобувачем особисто. Автором сформульовано завдання дослідження, виконано збирання, систематизацію та просторове опрацювання вихідних даних, статистичне обґрунтування ознакового простору, розроблено алгоритм і програмну реалізацію QGIS-плагіна, проведено його апробацію на супутникових даних, побудовано й навчено гібридну нейромережеву модель, виконано картографування, верифікацію та геологічну інтерпретацію результатів. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать концепція та методична схема окремих досліджень, підготовка й аналіз даних, програмна реалізація, інтерпретація результатів і формулювання висновків.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертації опубліковано у 6 статтях, з яких 4 включено до міжнародної наукометричної бази Scopus. Апробацію положень і результатів роботи здійснено на всеукраїнських і міжнародних наукових конференціях, зокрема Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, GeoTerrace, «Сучасні проблеми наук про Землю», «Сучасні виклики геологічної освіти і науки», «Молодь: наука та інновації», «Об’єднані наукою» та МОДС. За наданим переліком результати апробовано в 14 конференційних публікаціях, 8 із яких включено до Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі обґрунтовано теоретико-методологічні засади оцінювання геологічної нестійкості; у другому систематизовано методи моніторингу й моделювання екзогенних геологічних процесів; у третьому охарактеризовано територію дослідження та сформовано вихідну інформаційну основу; у четвертому розроблено й апробовано авторський QGIS-плагін; у п’ятому побудовано нейромережеву модель, виконано картографування, верифікацію та обґрунтовано інтеграцію результатів до системи комплексного моніторингу.

Основний текст викладено на 171 сторінках, дисертація містить 60 рисунків і 15 таблиць. Список використаних джерел налічує 204 найменувань.

Ключові слова: екзогенні геологічні процеси, геологічна нестійкість, інженерно-геологічний моніторинг, геоінформаційні системи, дистанційне зондування Землі, геопросторові аномалії, супутникова радарна інтерферометрія, нейромережеве моделювання, U-Net, Transformer, QGIS, Києво-Печерська лавра, історико-культурна спадщина.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ТЕХНОГЕННИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА УРБАНІЗОВАНІ ТЕРИТОРІЇ

В умовах інтенсивної урбанізації та зростання антропогенного навантаження проблема прогнозування впливу небезпечних екзогенних геологічних процесів на функціонування міських територій і об'єктів інфраструктури набуває особливої актуальності. Активізація таких процесів створює передумови для виникнення надзвичайних ситуацій, зумовлює значні економічні втрати та соціальні ризики, а також негативно впливає на стан історико-культурного середовища. У зв'язку з цим оцінювання та прогнозування потенційних геологічних небезпек є одним із пріоритетних напрямів сучасних досліджень у сфері управління природними ризиками та запобігання катастрофам.

1.1. Загальна характеристика впливу екзогенних геологічних процесів і техногенних навантажень на урбанізовані території

Урбанізовані території є складними природно-техногенними геосистемами, стан яких визначається взаємодією геологічної будови, рельєфу, гідрогеологічного режиму та інженерного освоєння. Планувальні й будівельні роботи змінюють природний рельєф, умови поверхневого та підземного стоку, інтенсивність інфільтрації й розподіл навантажень у ґрунтовому масиві. Додатковий вплив створюють підземне будівництво, інженерні комунікації, порушення дренування та аварійні витоки з водонесучих мереж. Унаслідок цього природні процеси можуть активізуватися або набувати просторово неоднорідного й прискореного характеру (Kril, 2017; Hudak, Kril, & Zatserkovnyi, 2025).

У ДБН В.1.1-24:2009 небезпечні геологічні процеси визначено як «*процеси, що негативно впливають на території, будівлі, споруди та життєдіяльність людей*». До них віднесено ерозію, абразію, затоплення, підтоплення, зсуви,

обвали, карст, селеві потоки та інші процеси, врахування яких є необхідним під час проєктування інженерного захисту територій (Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009). Закон України «Про державну геологічну службу України» пов’язує небезпечні геологічні явища з дією процесів, що виникають під впливом природних або техногенних чинників чи їх спільної дії (Закон України «Про державну геологічну службу України», 1999). Тобто, небезпечність процесу визначається не лише його походженням і механізмом, а й можливими наслідками для геологічного середовища, забудови, інфраструктури та населення.

Особливого значення дослідження екзогенних геологічних процесів набуває на територіях культурної спадщини (WP/WLI, 1993). Тривалий період освоєння, щільна історична забудова, поширення підземних споруд і застарілих інженерних мереж змінюють природні умови дренування та водообміну. Конструктивні особливості пам’яток і обмежені можливості проведення масштабних інженерно-захисних заходів зумовлюють необхідність систематичного контролю та своєчасного виявлення несприятливих змін геологічного середовища (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Приклади проявів екзогенних геологічних процесів та їх наслідків в урбанізованому середовищі м. Києва: *а – просідання земної поверхні на ділянці метро між станціями «Деміївська» та «Либідська», 2023 р. (фото: Колодій*

В./Суспільне Київ); б – аварійні роботи з ліквідації пошкодження тепломережі на території Києво-Печерської лаври (фото: Черевко І..); в, г – провали та деформації земної поверхні на території Києво-Печерської лаври, 2022–2023 рр. (фото: Черевко І.)

Теоретичні засади дослідження екзогенних геологічних процесів сформовано у працях А. Дранніков, Є. Ємельянової, М. Демчишина та інших дослідників, які розвинули уявлення про умови виникнення, механізми й закономірності поширення небезпечних процесів (Дранніков, 1956; Ємельянова, 1981; Демчишин, 1982, 1991). Подальший розвиток методів інженерно-геологічного оцінювання, моніторингу й прогнозування пов'язаний із працями Г. Лисиченка, І. Багрія, Є. Яковлєва, Г. Рудька, Е. Кузьменка, О. Іванік, О. Кошлякова, Т. Кріль та інших українських учених (Лисиченко та ін., 2008; Іванік, 2010; Кошляков, 2011; Кузьменко та ін., 2016). Сучасні міжнародні підходи до оцінювання просторової схильності територій і моделювання небезпечних геологічних процесів представлено в роботах O. Hungr, J. Corominas, C. J. van Westen, F. Guzzetti, P. Reichenbach, L. M. Highland, P. Bobrowsky та інших дослідників (Hungr et al., 2014; Corominas et al., 2014; Wu, 2015; Highland & Bobrowsky, 2018).

Розвиток екзогенних геологічних процесів в урбанізованому середовищі має багатофакторний характер. Окремі процеси можуть мати спільні передумови, просторово взаємодіяти та посилювати наслідки один одного. Зокрема, порушення водовідведення й аварійні витоки спричиняють перезволоження ґрунтів, що може супроводжуватися зниженням їх міцності, суфозійним винесенням матеріалу, просіданням і активізацією схилових деформацій. Тому ізольоване оцінювання зсувів, підтоплення, суфозії, просідання або ерозії не завжди забезпечує повну характеристику стану природно-техногенної системи.

Науково обґрунтоване оцінювання екзогенних геологічних процесів потребує їх систематизації. Інтегрування цих класифікаційних ознак створює основу для формування системи показників, придатної для геоінформаційного

аналізу, просторового моделювання та моніторингу стану геологічного середовища.

1.2. Теоретичні засади класифікації екзогенних геологічних процесів

Різноманітність походження, механізмів, умов розвитку, просторових масштабів і форм прояву екзогенних геологічних процесів зумовила формування численних підходів до їх класифікації. Запропоновані в межах геології, геоморфології, інженерної геології та геоекології класифікаційні системи відображають окремі властивості процесів відповідно до фундаментальних або прикладних завдань дослідженнь.

Класифікація екзогенних геологічних процесів є не лише засобом упорядкування відомостей про їх різновиди, а й складовою методології дослідження. Вибір класифікаційних ознак визначає принципи ідентифікації процесів, способи організації спостережень, структуру вихідних даних та підходи до просторового оцінювання і прогнозування (Іванік та ін., 2022а). Аналіз класифікацій екзогенних геологічних процесів у межах даного дослідження має методичне значення, адже дає змогу визначити основні характеристики, що відображають походження, механізми, умови розвитку та часову мінливість процесів.

У науковій літературі представлено значну кількість класифікаційних схем, однак жодна з них не охоплює всі характеристики екзогенних геологічних процесів. Це зумовлено їх багатофакторною природою та відмінностями в меті класифікування. Одні системи ґрунтуються на генезисі процесів, інші враховують механізм переміщення матеріалу, структурно-геологічні умови, швидкість розвитку, характер активності або співвідношення природних і техногенних чинників. Унаслідок цього окремий процес може одночасно належати до кількох класифікаційних категорій, кожна з яких характеризує певний аспект його розвитку.

Застосування геоінформаційних технологій, дистанційного зондування Землі та методів математичного моделювання розширило функціональне

призначення класифікаційних систем. Класифікаційні ознаки використовують для формалізації характеристик геологічного середовища, побудови тематичних шарів, формування наборів факторів та оцінювання просторової схильності території до розвитку небезпечних процесів (Ado et al., 2022; Іванік та ін., 2022b).

Для геоінформаційного моделювання найбільше значення мають класифікаційні ознаки, які можуть бути кількісно або категорійно представлені в межах просторових одиниць. Їх поєднання забезпечує перехід від описової систематизації процесів до формування просторово-часових параметрів, придатних для аналізу стану геологічного середовища.

У дисертаційному дослідженні класифікаційні підходи проаналізовано з позиції формалізації їхніх ознак у геоінформаційному середовищі. Такий аналіз забезпечує перехід від геологічного змісту процесів до структурованого набору просторових і часових показників, необхідних для моніторингу та моделювання (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Роль класифікації у методології дисертаційного дослідження

1.2.1. Генетична класифікація екзогенних геологічних процесів

Генетична класифікація є базовим підходом до систематизації екзогенних геологічних процесів за їх походженням і провідними механізмами формування. Відповідно до домінуючих процесоутворювальних чинників виділяють гравітаційні, водно-гравітаційні, ерозійні, карстові, суфозійні, просадкові,

абразійні, еолові (рис. 1.3) та інші групи процесів (Varnes, 1978; Hungr et al., 2014).



Рис. 1.3. Узагальнена класифікація екзогенних геологічних процесів за генетичною ознакою

У вітчизняній інженерній геології гравітаційні процеси поділяють на власне гравітаційні, до яких належать обвали, осипи й каменепади, водно-гравітаційні, представлені переважно зсувами, та гравітаційно-водні, до яких відносять селеві явища. Такий поділ відображає різний ступінь участі сили тяжіння й води у формуванні та переміщенні ґрунтових і породних мас (Шевчук та Іванік, 2011).

Водночас віднесення процесу до певної генетичної групи має умовний характер, оскільки його розвиток зазвичай визначається сукупною дією геологічних, геоморфологічних, гідрогеологічних, кліматичних і техногенних чинників. Наприклад, зсувне переміщення формується під дією сили тяжіння, але його активізація може бути пов’язана з перезволоженням, підрізанням схилу, додатковим навантаженням або порушенням дренування. Тому генетична класифікація характеризує передусім провідний механізм формування процесу, не охоплюючи повністю умов його виникнення та подальшого розвитку.

Генетична належність процесу визначає склад характеристик, необхідних для його просторового оцінювання. Для схилових процесів інформативними є морфометричні показники рельєфу, літологічна будова, фізико-механічні властивості ґрунтів, гідрогеологічні умови й техногенна зміна схилів. Аналіз карстових і суфозійних процесів потребує врахування поширення розчинних або легкорозмивних порід, фільтраційних властивостей геологічного середовища, рівня та режиму підземних вод. Для просадкових процесів визначальними є поширення лесових ґрунтів, їх вологість, потужність і деформаційні властивості.

Коректний вибір таких характеристик має принципове значення для просторового моделювання, оскільки складність математичного алгоритму не компенсує недостатньої фізичної обґрунтованості вихідних ознак. Найбільш інформативними є фактори, що відображають механізм розвитку конкретного процесу та закономірності його просторової приуроченості (Іванік, 2010; Кузьменко, 2016; Lu et al., 2024).

Генетична класифікація забезпечує визначення походження та провідного механізму процесу, проте не відображає повною мірою характер переміщення матеріалу, швидкість розвитку, просторовий масштаб і сучасний стан активності. Тому комплексна характеристика екзогенних геологічних процесів потребує поєднання генетичних ознак із кінематичними, структурно-геологічними та просторово-часовими характеристиками.

1.2.2. Класифікація схилових процесів за механізмом розвитку та типом переміщуваного матеріалу

Класифікація за механізмом розвитку характеризує спосіб переміщення породних мас і властивості матеріалу, залученого до деформації. Основою сучасної систематизації схилових процесів є класифікація D. Varnes, відповідно до якої виділяють падіння, перекидання, ковзання, бічне розтікання та потоки. Тип процесу визначають у поєднанні з характеристикою переміщуваного матеріалу, представленого скельними породами, уламковими відкладами або ґрунтами (рис. 1.4). У природних умовах процеси нерідко мають складний

характер і можуть послідовно змінювати механізм упродовж розвитку деформації (Varnes, 1978; Hungr et al., 2014).

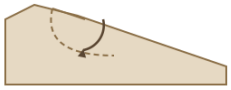
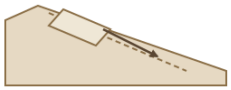
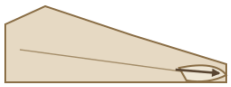
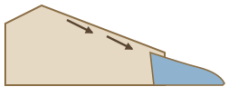
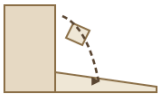
Механізм	Різновид процесу	Тип матеріалу			Швидкість
		Скельні породи	Крупноуламкові ґрунти	Дисперсні ґрунти	
Ковзання	 Обертальні (ротаційні)	з обертанням скельних порід	з обертанням уламкового матеріалу	з обертанням ґрунтової маси	повільний (від днів до тисяч років)
Ковзання	 Трансляційні	зміщення блоків скельних порід	зміщення уламкового матеріалу по площині ковзання	зміщення ґрунтової маси по площині ковзання	від дуже повільного до виключно швидкого
Течії	 Видавлювання (пластичні течії)	зміщення скельних порід по менш міцних породах	зміщення уламкового матеріалу по менш міцному матеріалу	зміщення ґрунтової маси	дуже швидкий (хвилини)
Течії	 Потоки (флюїдні течії)	потік скельних мас з частковою руйнацією	потік уламкового матеріалу (каменепадні, селеві тощо)	потік ґрунтової маси (брудні, глинисті тощо)	дуже повільний (місяці) – дуже швидкий (секунди)
Обвали	 Падіння	обвал скельних порід	обвал уламкового матеріалу	обвал ґрунтових мас	виключно швидкий (секунди)

Рис. 1.4. Класифікація схилових процесів за механізмом руху та типом матеріалу (Varnes, 1978; Іванік та ін., 2022b)

Важливим термінологічним аспектом є тлумачення поняття «*landslide*», яке в англомовній літературі охоплює широкий спектр гравітаційних переміщень породних і ґрунтових мас. Тому цей термін не в усіх випадках є повним відповідником поняття «зсув» у його традиційному інженерно-геологічному розумінні. Конкретний механізм схилового процесу визначається геометрією поверхні зміщення, складом і фізико-механічними властивостями порід, ступенем їх обводнення, морфометрією схилу та характером зовнішнього впливу

(Демчишин, 1994; Іванік, 2010; Кошляков, 2011; Кошляков, Диняк, & Кошлякова, 2012).

Для просторового аналізу механізм руху характеризує спосіб реалізації процесу в межах схилового масиву. Він визначає конфігурацію деформаційної зони, напрям і характер зміщень, форму поверхні ковзання та можливі напрями подальшого поширення деформації. Такі характеристики необхідні для інтерпретації результатів геодезичних вимірювань, дистанційного зондування Землі та інструментального контролю стану схилів.

Достовірне встановлення механізму процесу часто можливе лише після формування характерних морфологічних ознак або реєстрації зміщень. Для виявлення повільних деформацій до появи виражених поверхневих проявів застосовують GNSS-спостереження, супутникову радарну інтерферометрію та аналіз різночасових матеріалів дистанційного зондування Землі (Minh et al., 2020; Ivanik, Kravchenko & Hadiatska, 2024; Hudak, Kril, & Zatserkovnyi, 2025). Інструментальні дані доповнюють класифікацію кількісними характеристиками величини, напряму та швидкості зміщень, однак їх геологічна інтерпретація потребує врахування будови схилу й властивостей порід. Класифікація за механізмом розвитку деталізує кінематику схилових процесів, однак не охоплює повністю геологічні умови формування поверхонь зміщення, часову динаміку та ступінь техногенної зумовленості.

1.2.3. Структурно-геологічна класифікація екзогенних геологічних процесів

Структурно-геологічний принцип класифікації ґрунтується на характеристиках геологічного середовища, у межах якого формуються екзогенні геологічні процеси. Основними класифікаційними ознаками є літологічний склад і потужність шарів, умови їх залягання, орієнтація шаруватості відносно схилу, ступінь тріщинуватості та вивітрювання порід, наявність тектонічних порушень, зон дроблення, поверхонь ослаблення і водотривких горизонтів (Cruden & Varnes, 1996). Сукупність цих характеристик визначає просторову

локалізацію деформацій, можливе положення поверхні зміщення та умови фільтрації підземних вод (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Структурно-геологічні умови розвитку схилових процесів

Важливе значення має взаємне положення геологічних структур і рельєфу. За співвідношенням поверхні зміщення із шаруватістю та іншими структурними елементами виділяють консеквентні, інсеквентні, асеквентні та секвентні зсуви (Шевчук та Іванік, 2011). Такий поділ дає змогу встановити, чи контролюється розвиток процесу поверхнями нашарування, літологічними контактами, системами тріщин або новоутвореною поверхнею руйнування.

Поєднання тріщинуватих порід, ослаблених прошарків, зон тектонічних порушень та інтенсивної фільтрації підземних вод може суттєво знижувати стійкість схилового масиву навіть за відсутності виражених поверхневих деформацій. Водночас структурно-геологічні передумови не визначають однозначно сучасну активність процесу, оскільки його розвиток залежить також від зволоження, зміни напруженого стану, зовнішнього навантаження та інших динамічних впливів (Highland & Bobrowsky, 2018; Dissanayaka et al., 2024).

Структурно-геологічні характеристики належать переважно до відносно сталих властивостей території, тому можуть бути представлені у вигляді тематичних геопросторових шарів. До них належать літологія, потужність і

умови залягання відкладів, тектонічні порушення, тріщинуватість, ступінь вивітрювання та поширення ослаблених горизонтів. Їх використання забезпечує геологічно обґрунтоване оцінювання просторових передумов розвитку екзогенних процесів (Machay et al., 2023).

Комплексне оцінювання території потребує спільного врахування відносно сталих структурно-геологічних умов і динамічних характеристик, які відображають зміни гідрогеологічного, деформаційного та техногенного стану території.

1.2.4. Класифікація екзогенних геологічних процесів за швидкістю розвитку та характером активності

Динаміка екзогенних геологічних процесів характеризується швидкістю їх розвитку та зміною активності в часі. Процеси з однаковим походженням і механізмом можуть суттєво відрізнятися за інтенсивністю, тривалістю та характером прояву. Тому часові характеристики мають самостійне значення для оцінювання сучасного стану геологічного середовища, вибору періодичності спостережень і визначення можливостей своєчасного виявлення небезпечних змін (Cruden & Varnes, 1996; Hungr et al., 2014; Highland & Bobrowsky, 2018).

За швидкістю розвитку екзогенні геологічні процеси охоплюють широкий діапазон, від повільних багаторічних зміщень до раптових обвалів, провалів і потокових переміщень. Повільні деформації можуть тривалий час не мати виражених морфологічних проявів, тоді як швидкі процеси характеризуються коротким періодом розвитку та значними наслідками. Швидкість процесу визначає вимоги до методів спостереження: повільні зміщення потребують тривалих високоточних інструментальних вимірювань, а раптові прояви систематичного контролю передумов їх виникнення.

Характер активності відображає стан процесу на момент спостереження та його зміни протягом визначеного періоду. Відповідно до міжнародних підходів розрізняють активні, повторно активізовані, тимчасово неактивні, стабілізовані та реліктові процеси (UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1993;

Hungr et al., 2014). Відсутність сучасних поверхневих деформацій не завжди свідчить про стійкий стан геологічного середовища, оскільки повторна активізація може відбутися внаслідок перезволоження, зміни гідрогеологічного режиму, додаткового навантаження або порушення дренування.

Визначення активності потребує використання різночасових даних, що характеризують зміни положення земної поверхні, рівнів підземних вод, стану схилів та інженерних споруд. Часові ряди геодезичних вимірювань, супутникової радарної інтерферометрії та інших дистанційних спостережень дають змогу виявляти повільні зміщення й установлювати тенденції їх розвитку до формування виражених морфологічних ознак (Hussain et al., 2023; Liu et al., 2023).

Класифікація за швидкістю розвитку та характером активності доповнює генетичні, кінематичні й структурно-геологічні характеристики часовою складовою. Її використання забезпечує розмежування відносно сталих передумов розвитку процесів і динамічних змін, що характеризують сучасний стан геологічного середовища.

1.2.5. Класифікація екзогенних геологічних процесів за співвідношенням природних і техногенних чинників

В умовах урбанізованих територій важливим критерієм класифікації екзогенних геологічних процесів є співвідношення природних і техногенних чинників їх розвитку. Господарська діяльність змінює рельєф, гідрогеологічний режим, умови поверхневого й підземного стоку та напружений стан ґрунтового масиву. Підрізання й забудова схилів, спорудження підземних об’єктів, порушення дренування та аварійні витоки з інженерних мереж можуть спричиняти виникнення або активізацію процесів, передумови яких сформовані природними умовами території (Лисиченко та ін., 2008; Іванік та ін, 2022б; Орленко, 2024).

Залежно від співвідношення визначальних чинників виділяють природні, природно-техногенні та техногенно активізовані процеси (табл. 1.1). Природні

процеси розвиваються переважно під впливом геологічної будови, рельєфу, кліматичних і гідрогеологічних умов. У природно-техногенних процесах господарська діяльність змінює інтенсивність, швидкість або просторове поширення процесів, сформованих за наявності природних передумов. Техногенно активізовані процеси виникають або істотно посилюються внаслідок безпосереднього інженерного впливу на геологічне середовище.

Таблиця 1.1 – Характеристика екзогенних геологічних процесів за співвідношенням природних і техногенних чинників

Тип процесу	**Визначальні чинники розвитку**	**Характерні особливості**	**Типові приклади**	**Значення для геоінформаційного моделювання**
Природні	Геологічна будова, рельєф, кліматичні та гідрогеологічні умови	Розвиваються переважно під впливом природних чинників без істотного техногенного втручання	Ерозія, карст, природні зсуви, обвали	Характеризують природні передумови розвитку екзогенних геологічних процесів
Природно-техногенні	Поєднання природних передумов і господарської діяльності	Техногенний вплив змінює інтенсивність, швидкість або просторове поширення природно зумовлених процесів	Зсуви внаслідок забудови схилів, підтоплення за порушення дренування, суфозія поблизу інженерних споруд	Потребують одночасного врахування природних умов і техногенного навантаження
Техногенно активізовані	Переважальний вплив інженерної або господарської діяльності	Виникають або істотно активізуються внаслідок безпосередньої зміни геологічного середовища	Осідання внаслідок аварійних витоків, деформації після підземного будівництва, активізація зсувів через підрізання схилів	Відображають просторовий вплив забудови, інженерної інфраструктури та порушення водного режиму

Розмежування природних і техногенних складових має методологічне значення для оцінювання стану геологічного середовища. Природні чинники характеризують відносно сталі просторові передумови розвитку процесів, тоді як техногенні впливи можуть змінювати умови їх реалізації, інтенсивність і

часову динаміку. Водночас межа між природно-техногенними й техногенно активізованими процесами не завжди є однозначною, оскільки роль окремих чинників може змінюватися в часі та на різних етапах розвитку процесу.

Спільне врахування природних і техногенних чинників забезпечує комплексне представлення передумов і механізмів розвитку екзогенних геологічних процесів та формування відповідних груп просторових показників для просторового моделювання.

1.2.6. Інтеграція класифікаційних ознак екзогенних геологічних процесів як основа геоінформаційного моделювання

Розглянуті класифікаційні підходи не є взаємовиключними, оскільки характеризують різні властивості екзогенних геологічних процесів. Один процес може одночасно описуватися за декількома класифікаційними підходами. Його комплексна характеристика формується сукупністю взаємопов'язаних ознак, кожна з яких відображає окремий аспект розвитку процесу (Highland & Bobrowsky, 2018; Іванік та ін., 2024). Інформативність геоінформаційної моделі визначається не лише складністю застосованого алгоритму, а насамперед повнотою, якістю та фізичною обґрунтованістю вхідних факторів (рис. 1.6). Їх добір має відповідати механізмам розвитку досліджуваних процесів, просторовій деталізації вихідних матеріалів і часовому характеру змін геологічного середовища (Noroozi & Riahi, 2025).

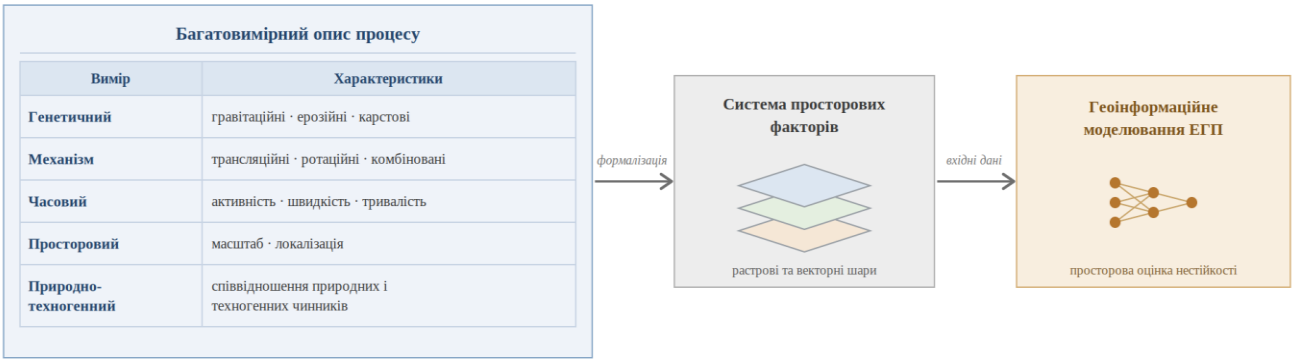


Рис. 1.6. Концептуальна схема багатовимірного опису екзогенних геологічних процесів та формування системи просторових факторів для геоінформаційного моделювання

Особливе значення багатовимірний підхід має для урбанізованих територій, де окремі процеси формуються та розвиваються в умовах спільної дії природних і техногенних чинників. На початкових стадіях несприятливі зміни можуть не мати виражених морфологічних проявів і виявлятися через поєднання гідрогеологічних, деформаційних, геоморфологічних та інфраструктурних ознак. Тому об’єктом комплексного оцінювання є не лише окремий процес, а й стан геологічного середовища, у межах якого формуються передумови його виникнення або активізації (Shekhunova & Kril, 2022; Kril et al., 2025).

Відповідно до вищезазначеного, інтегрування генетичних, кінематичних, структурно-геологічних, часових і природно-техногенних характеристик створює методологічну основу для комплексного оцінювання геологічного середовища. Класифікація процесів сама по собі не забезпечує кількісної характеристики ступеня порушення його рівноваги. Для цього необхідна інтегральна категорія, яка поєднує відносно сталі передумови, сучасні динамічні зміни та просторові прояви нестійкого стану. Тому в даній роботі класифікаційні ознаки використано як основу для переходу від опису окремих процесів до інтегрального оцінювання стану геологічного середовища.

1.3. Геологічна нестійкість як інтегральна категорія геоінформаційного оцінювання екзогенних геологічних процесів

Узагальнення вітчизняних і міжнародних підходів до класифікації екзогенних геологічних процесів засвідчує, що наявний термінологічний апарат орієнтований переважно на опис окремих видів процесів, механізмів їх розвитку, рівнів небезпечності або спеціалізованих аспектів просторового прогнозування. Комплексний моніторинг потребує категорії, яка характеризує інтегральний просторово-часовий стан геологічного середовища.

Українська нормативно-правова база використовує поняття «*геологічне середовище*», «*моніторинг геологічного середовища*», «*екзогенні геологічні процеси*» та «*небезпечні геологічні процеси*», однак не містить узагальнювального терміна для характеристики стану середовища за

одночасного впливу кількох взаємопов’язаних процесів і чинників. Для усунення цієї методологічної прогалини в роботі сформульовано поняття *«геологічна нестійкість*».

Застосування інтегральної категорії є обґрунтованим для територій культурної спадщини, де стан геологічного середовища залежить від взаємодії геологічної будови, рельєфу, гідрогеологічного режиму, підземних споруд, історичної забудови та інженерної інфраструктури. За таких умов оцінювання окремих проявів не забезпечує повної характеристики природно-техногенної системи, необхідної для моніторингу та збереження цілісності історичного комплексу.

1.3.1. Нормативно-правові та методичні передумови формування інтегрального поняття геологічної нестійкості

Українське законодавство не містить прямого визначення терміну «*геологічна нестійкість*», проте регламентує основні складові її оцінювання. Закон України «Про державну геологічну службу України» визначає моніторинг геологічного середовища як «с*истему спостереження, аналізу та прогнозування його стану*». Постановою Кабінету Міністрів України № 685 від 13 червня 2024 р. екзогенні геологічні процеси віднесено до об’єктів державного моніторингу та визначено засади інформаційної взаємодії між його суб’єктами (Закон України «Про державну геологічну службу України», 1999; Постанова Кабінету Міністрів України № 685, 2024).

Кодекс України про надра передбачає запобігання затопленню, обводненню та іншим несприятливим змінам геологічного середовища, а Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» встановлює засади спостереження, аналізу й інформаційного забезпечення управлінських рішень (Кодекс України про надра, 1994; Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», 1991). Ці положення дають підстави розглядати геологічну нестійкість як спеціалізовану аналітичну характеристику,

що інтегрує відомості про стан геологічного середовища відповідно до завдань дослідження.

Геоінформаційну реалізацію такого підходу забезпечують положення Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» і технічні вимоги до специфікацій геопросторових даних, гармонізовані з INSPIRE та ISO 19131. Вони визначають засади створення, інтегрування та обміну геопросторовими даними, необхідними для поєднання геологічної, морфометричної, гідрогеологічної, інженерної та пам'яткоохоронної інформації (INSPIRE, 2007; International Organization for Standardization, 2022).

Для територій культурної спадщини важливими є також вимоги законодавства щодо охорони пам'яток, проведення інженерних вишукувань та експлуатації споруд інженерного захисту (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Нормативно-правові передумови застосування поняття «геологічна нестійкість»

№	Документ	Релевантне положення	Значення для дисертаційного дослідження
1	Закон України «Про державну геологічну службу України»	Визначає моніторинг геологічного середовища як систему спостережень, аналізу та прогнозування його стану	Дає підстави трактувати нестійкість як стан геологічного середовища, а не лише як перелік процесів
2	Постанова КМУ № 685 від 13.06.2024	Включає екзогенні геологічні процеси до предмета державного моніторингу; визначає об'єкти, суб'єктів та інформаційний обмін	Створює нормативну основу для поєднання даних про окремі процеси в єдиній моніторинговій системі
3	Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»	Визначає державний моніторинг як систему збирання, аналізу і прогнозування інформації	Формує загальноекологічну основу для інтеграції геологічного компонента
4	Кодекс України про надра, ст. 56	Передбачає охорону надр і запобігання шкідливому впливу природних та техногенних чинників	Підтримує превентивне розуміння нестійкості як стану потенційної дестабілізації
5	Закон України «Про національну інфраструктуру	Регламентує створення, інтегрування та обмін геопросторовими даними	Є нормативною основою для формування тематичних шарів,

	геопросторових даних»		геобази даних і ГІС-інструментарію моніторингу
6	Технічні вимоги до специфікацій геопросторових даних НІГД	Гармонізовані з INSPIRE та ISO 19131	Обґрунтовують стандартизовану структуру вхідних даних інтегральної моделі
7	Закон України «Про охорону культурної спадщини», ст. 32	Пов’язує режими використання зон охорони з результатами спеціальних досліджень	Підтверджує необхідність просторового оцінювання стану території Києво-Печерської лаври
8	Правила експлуатації споруд інженерного захисту від зсувів та обвалів	Передбачають обстеження й оцінювання технічного стану захисних споруд	Поєднують моніторинг геологічного середовища з оцінюванням інженерного захисту
9	ДБН А.2.1-1:2014	Регламентує проведення інженерних вишукувань	Визначає джерела первинних інженерно-геологічних даних

Наведені нормативні положення не встановлюють окремої категорії геологічної нестійкості, проте створюють передумови для її наукової операціоналізації. У роботі цей термін не замінює нормативних понять, а використовується для інтегрованого оцінювання стану геологічного середовища засобами геоінформаційного аналізу.

У міжнародній практиці також немає єдиного поняття, повністю тотожного геологічній нестійкості. Найближчими за змістом є «*ground instability*», «*land stability*», «*geohazard*» і «*landslide susceptibility*». Вони відрізняються за об’єктом оцінювання, просторовим охопленням та врахуванням можливих наслідків.

У практиці Британської геологічної служби поняття «*ground instability*» охоплює процеси, здатні спричиняти переміщення, просідання або деформування земної основи, зокрема зсуви, розчинення порід, стисливі ґрунти, набухання й усадку глин та рухомі піски. Наприклад, геоінформаційний продукт BGS GeoSure відображає просторову схильність до відповідних процесів, але не оцінює ризик із урахуванням експозиції, вразливості та можливих втрат (European Parliament and Council of the European Union, 2007; Foster et al., 2012; British Geological Survey, 2025).

У межах європейського проєкту PanGeo сформовано «*Ground Stability Layer*» для 52 міст Європи. У ньому розмежовано інструментально зафіксовані

переміщення земної поверхні та території з потенційними передумовами деформування. Такий поділ відповідає розмежуванню проявлених змін і потенційно нестійкого стану геологічного середовища (PanGeo Project, 2014) (рис. 1.7).

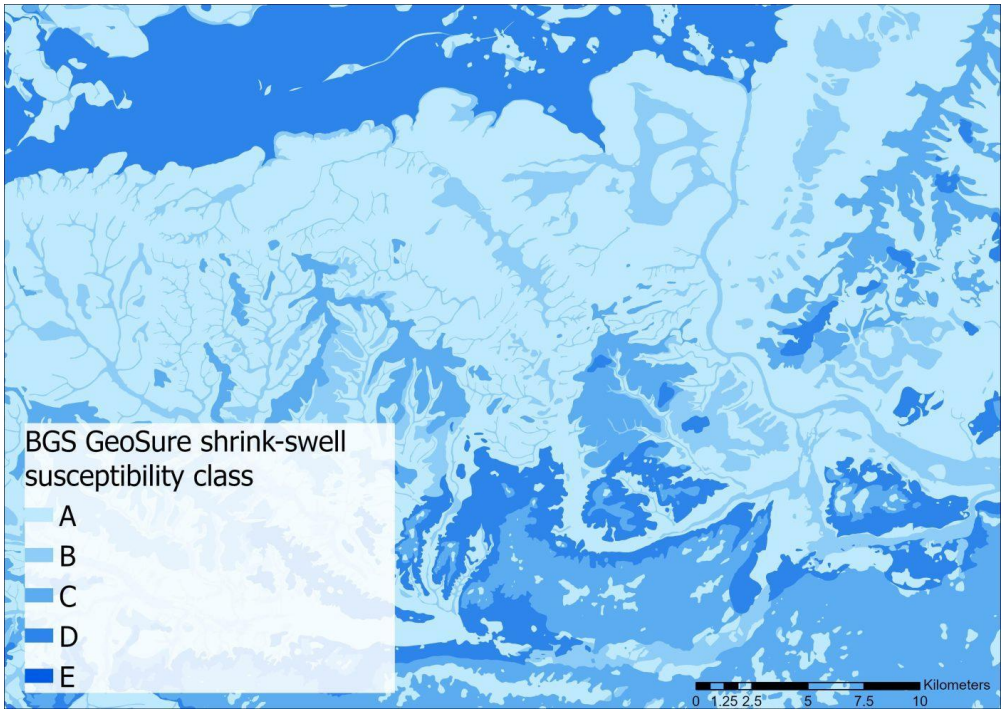


Рис. 1.7. Приклади картографічного представлення геологічної нестійкості (ground instability) та схильності до розвитку небезпечних геологічних процесів у продуктах BGS GeoSure і PanGeo

Поняття «*geohazard*», що використовується в міжнародних стандартах і науковій літературі, характеризує широку сукупність геологічних небезпек та може охоплювати процеси, які не належать до екзогенної геодинаміки (International Organization for Standardization, 2019). Термін «*landslide susceptibility*» має вужчий зміст і характеризує просторову схильність території до виникнення зсувів без визначення часу реалізації процесу та можливих втрат (табл. 1.3).

Порівнювані терміни належать до різних логічних рівнів. *Екзогенні геологічні процеси* є класифікаційною категорією, *susceptibility* характеризує просторові передумови виникнення певного процесу, *geohazard* відображає геологічну небезпеку, а *risk* (*геологічний ризик*) додатково враховує експозицію,

вразливість і можливі втрати. *Геологічна нестійкість* натомість характеризує інтегральний стан геологічного середовища, сформований взаємодією природних і техногенних чинників.

Таблиця 1.3 – Порівняння понять, що використовуються для характеристики екзогенних процесів і стану геологічного середовища

Термін	**Що характеризує**	**Основне обмеження**	**Статус у дисертаційному дослідженні**
Екзогенні геологічні процеси	Окремі процеси зовнішньої геодинаміки	Не характеризує інтегральний стан території	Базова класифікаційна категорія
Небезпечні геологічні процеси	Процеси, розвиток яких створює загрозу	Має пороговий характер і недостатньо відображає ранню стадію дестабілізації	Допоміжний нормативний термін
Гравітаційні переміщення породних і ґрунтових мас	Гравітаційні переміщення поверхневих мас	Не охоплює підтоплення, суфозію, карст та інші процеси	Аналог для окремої групи схилових процесів
Landslide susceptibility	Просторову схильність до виникнення зсувів	Обмежений одним типом процесу	Використовується для спеціалізованих зсувних моделей
Risk (геологічний ризик)	Імовірність негативних наслідків небезпечних геологічних процесів з урахуванням експозиції, вразливості та можливих збитків	Орієнтований на оцінювання наслідків, а не інтегрального стану геологічного середовища	Використовується як окрема категорія оцінювання небезпеки
Geohazard	Широку групу геологічних небезпек	Може охоплювати сейсмічні та інші неекзогенні процеси	Міжнародний узагальнюючий термін
Land stability / ground instability	Стан земної основи щодо можливості переміщення, просідання або деформування	Не має повністю усталеного прямого українського відповідника	Основний міжнародний операційний аналог
Геологічна нестійкість	Інтегральний просторово-часовий стан геологічного середовища, сформований взаємодією природних і техногенних чинників	Потребує формалізації через систему показників та операціоналізації в межах геоінформаційної моделі	Основне поняття дисертаційного дослідження

У дисертаційному дослідженні запропоновано таке визначення:

геологічна нестійкість *є інтегральною просторово-часовою характеристикою стану геологічного середовища, що відображає порушення або тенденцію до порушення його морфологічної, механічної та гідрогеологічної рівноваги під сукупним впливом природних і техногенних чинників та проявляється у формуванні умов для виникнення, активізації або повторної активізації екзогенних геологічних процесів*.

Поняття охоплює як зафіксовані прояви процесів, так і сукупність умов, що визначають можливість їх виникнення або активізації. Воно не є тотожним геологічному ризику, оскільки не передбачає оцінювання об'єктів та очікуваних втрат. В англомовному викладі термін *geological instability* використовується як відповідник запропонованої інтегральної категорії. Поняття «*ground instability»* розглядається як найближчий прикладний аналог, поширений у практиці інженерної геології, геологічних служб і просторового планування.

1.3.2. Концептуальні засади оцінювання геологічної нестійкості

Оцінювання геологічної нестійкості потребує визначення системи показників, які характеризують природні передумови, сучасний стан і часову мінливість геологічного середовища. Її оцінювання ґрунтується на поєднанні різнорідних просторових і часових даних відповідно до принципів багатокритеріального геопросторового аналізу (Reichenbach et al., 2018; Merghadi et al., 2020; Noroozi & Riahi, 2025).

За характером часової мінливості та функцією в системі оцінювання показники геологічної нестійкості доцільно об'єднати у три взаємодоповнювальні групи: відносно сталі, динамічні та тригерні.

Відносно сталі показники характеризують базові просторові передумови розвитку екзогенних геологічних процесів. До них належать морфометричні характеристики рельєфу, геологічна та інженерно-геологічна будова, літологічний склад, фізико-механічні властивості ґрунтів, тектонічні порушення та поширення підземних споруд. Значення цих показників змінюються повільно

або можуть умовно вважатися незмінними протягом періоду моніторингового оцінювання.

Динамічні показники відображають сучасний стан і спрямованість змін геологічного середовища. Вони охоплюють рівні та режим підземних вод, зволоження ґрунтів, зміщення земної поверхні й інженерних споруд, стан дренажних систем, зміни техногенного навантаження та дистанційно виявлені аномалії. Їх значення потребують періодичного оновлення за результатами наземних, інструментальних і супутникових спостережень.

Тригерні показники характеризують короткочасні впливи, здатні порушити рівноважний стан геологічного середовища або прискорити розвиток процесу. До них належать інтенсивні атмосферні опади, цикли замерзання та відтавання, аварійні витоки з водонесучих мереж, порушення роботи дренажу, будівельні роботи й локальні динамічні навантаження. Тригер не обов'язково формує нестійкість самостійно, але може спричинити її прояв за наявності несприятливих природних або техногенних передумов.

Для кількісного представлення геологічної нестійкості використовується інтегральна оцінка, що поєднує тематичні показники в межах єдиної геоінформаційної моделі (табл. 1.4). Наведена структура має концептуальний характер і визначає склад основних інформаційних блоків та їх функції в інтегральному оцінюванні. Вона не встановлює наперед фіксованої значущості окремих показників, оскільки їх внесок залежить від особливостей території, якості вихідних даних, просторового масштабу й методики оцінювання. Кількісне поєднання показників може здійснюватися за допомогою багатокритеріальних, статистичних або машинних методів із подальшою перевіркою отриманого просторового результату (Saaty, 1980; Reichenbach et al., 2018; Merghadi et al., 2020).

Таблиця 1.4 – Концептуальна структура оцінювання геологічної нестійкості

Блок даних	Приклади показників	Функція в оцінюванні
Морфометричний	Кут нахилу, кривизна, відносна висота, експозиція, розчленованість рельєфу	Характеризує рельєфні передумови розвитку схилових, ерозійних та інших процесів
Літолого-інженерно-геологічний	Літологія, лесові, глинисті й делювіальні відклади, тріщинуватість, контакти шарів, фізико-механічні властивості ґрунтів	Відображає будову, неоднорідність і чутливість ґрунтового та породного масиву до зовнішніх впливів
Гідрогеологічний	Рівні підземних вод, їх тренд і амплітуда коливань, зволоження, умови дренування, витоки, концентрація стоку	Характеризує поточний водний режим і його вплив на зміну властивостей ґрунтів
Деформаційний	Просідання, провали, тріщини, зміщення земної поверхні та споруд, дані польових і інструментальних спостережень	Відображає зафіксовані зміни стану геологічного середовища та інженерних об’єктів
Техногенний	Забудова, підземні споруди, інженерні мережі, земляні роботи, водонепроникні покриття	Характеризує зміну природних умов унаслідок інженерного освоєння території
Інженерний захист	Дренажні системи, підпірні стіни, протизсувні споруди та їх технічний стан	Відображає вплив захисних споруд на водний режим і стійкість геологічного середовища

Запропонована концепція забезпечує поєднання відносно сталих передумов, динамічних характеристик і короткочасних тригерних впливів у межах єдиної просторово-часової системи (рис. 1.8). Інтегральна оцінка при цьому не замінює аналізу окремих екзогенних геологічних процесів, а узагальнює різні складові стану геологічного середовища та створює основу для його картографування, моніторингу й періодичного переоцінювання.

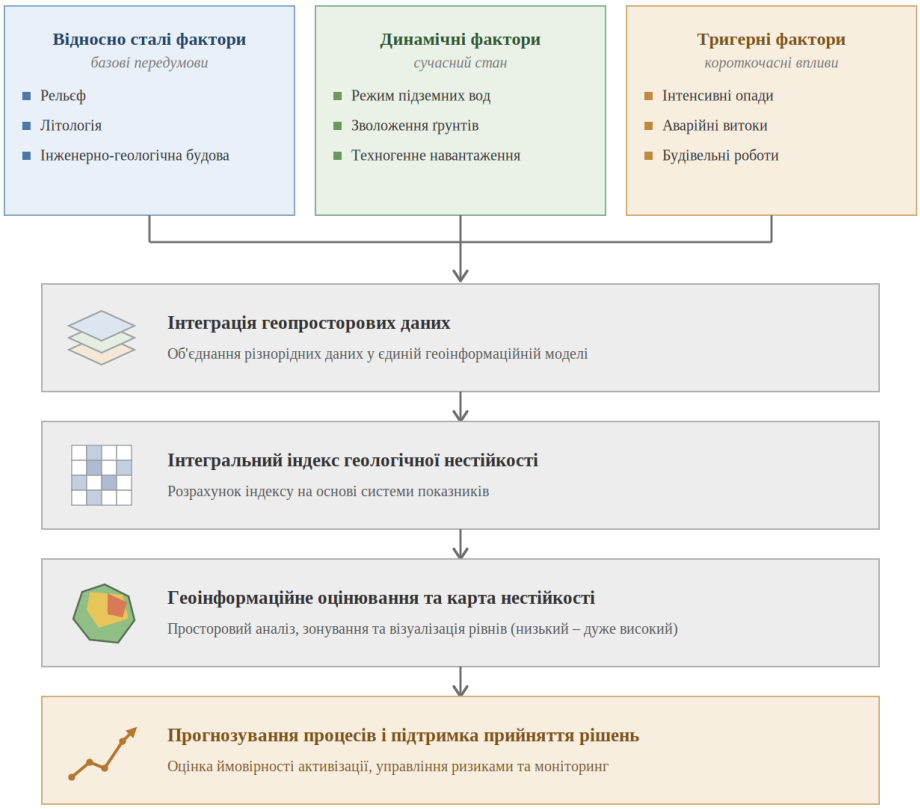


Рис. 1.8. Концептуальна схема оцінювання геологічної нестійкості

Висновки до розділу 1

У розділі узагальнено теоретичні та методологічні підходи до дослідження екзогенних геологічних процесів в умовах урбанізованих територій та сформовано засади оцінювання геологічної нестійкості.

1. Обґрунтовано комплексний принцип оцінювання стану геологічного середовища, що передбачає спільне врахування природних передумов, техногенних впливів і динамічних характеристик розвитку екзогенних геологічних процесів.

2. Визначено взаємодоповнювальний характер генетичної, кінематичної, структурно-геологічної, часової та природно-техногенної класифікацій екзогенних геологічних процесів. Інтегрування відповідних ознак забезпечує перехід від описової систематизації процесів до формування просторових і часових показників, придатних для геоінформаційного аналізу.

3. На основі нормативно-правових положень, міжнародних підходів і сучасних наукових уявлень обґрунтовано використання поняття «геологічної нестійкості» як інтегральної просторово-часової характеристики стану геологічного середовища. Геологічну нестійкість розмежовано з геологічним ризиком.

4. Сформовано концептуальні засади оцінювання геологічної нестійкості та встановлено їх методичний зв’язок із класифікацією екзогенних геологічних процесів. Виділені класифікаційні характеристики забезпечили фізичне обґрунтування факторів моделювання.. Поєднання цих показників у єдиній геоінформаційній системі створило основу для переходу від аналізу окремих процесів до інтегрального оцінювання, картографування та моніторингу геологічної нестійкості.

Список використаних джерел до розділу 1:

Демчишин, М. Г. (1982). Прогноз и предупреждение оползневых явлений на территории Украины (Препринт № 82). Інститут геологічних наук НАН України.

Демчишин, М. Г. (1991). Геологическая среда Киева. *Геологический журнал*, 2, 3–15.

Демчишин, М. Г. (1994). Сучасна динаміка схилів на території України (інженерно-геологічні та екологічні аспекти) (Автореферат дисертації доктора технічних наук). Івано-Франківськ.

Дранников А. М. (1956) Оползни: типы, причины образования, меры борьбы. — К.: *Укргипросельстрой*, 102 с.

Ємельянова, Е. П. (1981). Современное состояние прогноза оползней и основные дискуссионные вопросы. Современные методы прогноза оползневого процесса. *Наука*.

Закон України «Про державну геологічну службу України», № 1216-XIV (1999). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1216-14

Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». (1991). Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12

Іванік, О. М. (2010). Моделювання впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування транспортних природно-техногенних систем (Дисертація доктора геологічних наук). Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Іванік, О. М., Меньшов, О., Кравченко, Д., Бондар, К., Гадяцька, К., Тустановська, Л., та Хоменко, Р. (2022a). Методичні аспекти оцінки зсувної небезпеки в межах урбанізованих територій (на прикладі модельної ділянки Лиса гора, Київ). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(96), 27–33. https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.04

Іванік, О., Кравченко, Д., Шевчук, В., Вижва, С., Меньшов, О., Бондар, К., та ін. (2022b). Прогнозування зсувної небезпеки регіонального та локального

рівня та оцінка впливу на суспільство: звіт про науково-дослідну роботу (остаточний), № 21БП049-02. Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННІ «Інститут геології».

Кабінет Міністрів України. (2024). Про затвердження *Порядку здійснення моніторингу геологічного середовища* (Постанова № 685 від 13 червня 2024 р.). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/685-2024-%D0%BF

Кодекс України про надра. (1994). Кодекс України від 27.07.1994 № 132/94-ВР. https://zakon.rada.gov.ua/go/132/94-%D0%B2%D1%80

Кошляков, О. Є. (2011). Моніторинг гідрогеодинамічної складової геологічного середовища урбанізованих територій (на основі ГІС) (Автореферат дисертації доктора геологічних наук). Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Кузьменко, Е.Д. (Ред.) (2016). Прогнозування зсувів: монографія. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ.

Лисиченко, Г. В., Забулонов, Ю. Л., & Хміль, Г. А. (2008). Природний, техногенний та екологічний ризики: Аналіз, оцінка, управління. *Наукова думка*.

Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. (2009). ДБН В.1.1-24:2009. *Захист від небезпечних геологічних процесів*. Основні положення проектування. https://zakon.rada.gov.ua/go/v0566661-09

Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2017). ДБН Б.1.1-22:2017. *Склад та зміст плану зонування території*. https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/b_1_1_12/1-1-0-1806

Орленко, Т. А. (2024). Методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів на прикладі правобережжя Канівського водосховища (Дисертація доктора філософії). Інститут геологічних наук НАН України.

Шевчук, В., & Іванік, О. (2011). Умови формування структурних зсувів та їх класифікація для цілей моделювання зсувної небезпеки. *Вісник Київського*

національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 52, 17–20. https://geology.bulletin.knu.ua/article/view/2173

Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., & Jasiński, M. (2022). Landslide susceptibility mapping using machine learning: A literature survey. *Remote Sensing*, 14(13), 3029. https://doi.org/10.3390/rs14133029

British Geological Survey. (2025). GeoSure: Ground stability susceptibility datasets. https://www.bgs.ac.uk/geosure/

Corominas, J., van Westen, C. J., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., et al. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), Landslides: Investigation and mitigation (Transportation Research Board Special Report No. 247, pp. 36–75). National Academy Press.

Dissanayaka, D., Weerasinghe, A., Jayakody, S., Asano, S., & Bandara, K. (2024). Assessment of the structural geological, hydrogeological, and geomorphological relationships of the Athwelthota landslide, Sri Lanka. In Progress in *Landslide Research and Technology* (Vol. 3, Issue 1, pp. 307–315). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55120-8_21

European Parliament and Council of the European Union. (2007). Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). *Official Journal of the European Union*, L108, 1–14. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/2/oj

Foster, C., Culshaw, M., Lawrie, K., & Banks, V. (2012). GeoSure: A geological hazard susceptibility mapping tool for Great Britain. British Geological Survey.

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2018). The landslide handbook: A guide to understanding landslides (2nd ed.). U.S. Geological Survey Circular 1325. https://doi.org/10.3133/cir1325

Hudak, V., Kril, T., & Zatserkovnyi, V. (2025). Remote sensing analysis of vertical surface displacements as an indicator of underground structure deformations. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 94-102. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types: An update. *Landslides*, 11(2), 167–194. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y

Hussain, S., Pan, B., Afzal, Z., Ali, M., Zhang X., Shi, X. et al. (2023). Landslide detection and inventory updating using the time-series InSAR approach along the Karakoram Highway, Northern Pakistan. *Scientific Reports*, 13, Article 7485. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34030-0

International Organization for Standardization. (2019). ISO 14689:2017+Amd 1:2019. Geotechnical investigation and testing – Identification, description and classification of rock. https://www.iso.org/

International Organization for Standardization. (2022). ISO 19131:2022. Geographic information – Data product specifications. https://www.iso.org/standard/75147.html

Ivanik, O., Lavé, J., Hadiatska, K., Kravchenko, D., & Petrushenko, E. (2024). Susceptibility modelling of landslides in Central Nepal. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(107), 5-12. https://doi.org/10.17721/1728-2713.107.01

Kril, T. (2017). Causes of some hazardous engineering-geological processes on urban territories. *E3S Web of Conferences*, 24, 01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172401009

Liu, M., Yang, W., Yang, Y., Guo, L., et al. (2023). Identify landslide precursors from time series InSAR results. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14, 963–978. https://doi.org/10.1007/s13753-023-00532-8

Lu, Z., Liu, G., Song, Z., Sun, K., Li, M., Chen, Y., Zhao, X., & Zhang, W. (2024). Advancements in technologies and methodologies of machine learning in

landslide susceptibility research: Current trends and future directions. *Applied Sciences*, 14(21), Article 9639. https://doi.org/10.3390/app14219639

Machay, F., El Moussaoui, S., & El Talibi, H. (2023). Insights into large landslide mechanisms in tectonically active Agadir, Morocco: The significance of lithological, geomorphological, and soil characteristics. *Scientific African*, 22, e01901. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01901

Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., Thai Pham, B., Bui, D. T., Avtar, R., & Abderrahmane, B. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, 207, 103225. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225

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

Noroozi, M., & Riahi, M. A. (2025). Using deep learning for facies classification in geological exploration: Feedforward neural network vs. convolutional neural network approaches. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 66(3). https://doi.org/10.4430/bgo00495

PanGeo Project. (2014). PanGeo: Enabling access to geological information in support of GMES. https://cordis.europa.eu/project/id/262824

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001

Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process. McGraw-Hill.

Shekhunova, S., & Kril, T. (2022). Geological and economic risk assessment for territories of hazardous geological and technogenic processes (exemplified by Solotvyno township). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 79–85. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-2/079

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), Landslides: Analysis and control (Transportation Research Board Special Report No. 176, pp. 11–33). National Academy of Sciences.

WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory). (1993). A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 47, 53–57. https://doi.org/10.1007/BF02639593

Wu, W. (Ed.). (2015). Recent advances in modelling landslides and debris flows. *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11053-0

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОЦІНЮВАННЯ ГЕОЛОГІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Моніторинг екзогенних геологічних процесів є складовою моніторингу геологічного середовища й охоплює систематичне отримання та аналіз інформації про виникнення, поширення й динаміку процесів, а також чинники їх активізації. Відповідно до Порядку здійснення моніторингу геологічного середовища, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 685 від 13 червня 2024 р., він передбачає оцінювання стану геологічного середовища, прогнозування його змін і підготовку науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття управлінських рішень (Порядок здійснення моніторингу геологічного середовища, 2024).

Комплексний моніторинг поєднує інженерно-геологічні, гідрогеологічні, геодезичні, геофізичні та дистанційні спостереження, інтегровані засобами геоінформаційних систем. На території дослідження Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» він передбачає одночасний контроль стану геологічного середовища, земної поверхні, нерухомих пам’яток, підземних споруд та інженерної інфраструктури. Поєднання локальних високоточних вимірювань із методами суцільного просторового охоплення дає змогу виявляти як задокументовані деформації, так і просторово-часові зміни, що не мають виражених поверхневих проявів.

2.1. Загальна характеристика методів моніторингу екзогенних геологічних процесів

Система моніторингу екзогенних геологічних процесів охоплює методи безпосереднього дослідження геологічного середовища, інструментального вимірювання його змін і дистанційного спостереження за земною поверхнею. Вибір методів визначається видом процесу, геологічними й гідрогеологічними умовами, просторовим масштабом дослідження, очікуваною швидкістю змін та

необхідною точністю результатів. Поєднання кількох груп методів дає змогу зіставляти прямі й непрямі ознаки процесів та компенсувати обмеження окремих джерел інформації. Визначені групи характеристик екзогенних геологічних процесів покладено в основу вибору методів комплексного моніторингу. Комплекс методів сформовано відповідно до змісту ознак, необхідних для подальшого просторового моделювання геологічної нестійкості досліджуваної території.

2.1.1. Польові та інженерно-геологічні методи

Польові та інженерно-геологічні методи забезпечують безпосереднє отримання відомостей про геологічну будову, властивості ґрунтів і порід, гідрогеологічні умови та фактичні прояви екзогенних геологічних процесів (Кузьменко та ін., 2016). Їх результати становлять первинну фактологічну основу моніторингу та забезпечують фізичну інтерпретацію даних, отриманих непрямими й дистанційними методами.

До цієї групи належать інженерно-геологічне картування, дані свердловин, опис відслонень і гірничих виробок, відбирання зразків, лабораторне визначення фізичних, водно-фізичних і механічних властивостей ґрунтів, інклінометричні, екстензометричні й тріщинометричні вимірювання, спостереження за вологістю, а також фіксація просідань, провалів, тріщин, уступів та ерозійних форм. Окремий напрям становлять обстеження технічного стану будівель, підземних споруд, захисних конструкцій та інженерних комунікацій (рис. 2.1).

За результатами польових та інженерно-геологічних досліджень визначають потужність і будову деформованої товщі, положення поверхонь ослаблення, рівні підземних вод, вологість, щільність і міцнісні характеристики ґрунтів, а також величину й напрям локальних зміщень. Ці параметри необхідні для встановлення механізмів розвитку процесів та оцінювання стану ґрунтової основи й інженерних об’єктів (Szymczak & Krezalek, 2018; Kril et al., 2025).



Рис. 2.1. Система польових та інженерно-геологічних методів моніторингу геологічного середовища.

На територіях з об’єктами культурної спадщини важливим джерелом інформації є результати регулярних обстежень нерухомих пам’яток. Тріщини, нерівномірні осідання та зміни положення конструктивних елементів можуть відображати реакцію споруди на деформування ґрунтової основи. Також пошкодження водонесучих мереж здатні змінювати локальний гідрогеологічний режим і виступати чинником перезволоження, суфозії та просідання ґрунтів (Kril et al., 2024; Kril et al., 2025).

Польові спостереження мають особливе значення для перевірки результатів дистанційного та геофізичного аналізу. На забудованих або вкритих рослинністю ділянках ознаки деформацій можуть бути замасковані спорудами, елементами благоустрою чи рослинним покривом, а спектральні або радарні відхилення не завжди однозначно пов’язані з певним геологічним процесом. Наземне обстеження дає змогу встановити фізичну природу виявлених змін і зменшити ймовірність їх помилкової інтерпретації (Fulong et al., 2026).

Обмеження польових та інженерно-геологічних методів пов’язані з їх локальним характером, трудомісткістю, потребою у фізичному доступі та неможливістю забезпечити однакову деталізацію на всій території. Тому їх доцільно використовувати як джерело прямих даних і засіб верифікації в

поєднанні з інструментальними та дистанційними спостереженнями ширшого просторового охоплення.

2.1.2. Геодезичні методи спостережень

Геодезичні методи забезпечують кількісне визначення просторових зміщень земної поверхні, ґрунтових масивів, будівель, інженерних споруд і спеціально закладених спостережних знаків. За результатами повторних вимірювань установлюють величину, напрям і швидкість переміщень, а також оцінюють їх зміну в часі (Fell et al., 2008). До основних геодезичних методів належать високоточне геометричне нівелювання, GNSS-спостереження, тахеометричне знімання, автоматизовані вимірювання роботизованими тахеометрами, наземне лазерне сканування та фотограмметрія (рис. 2.2). Вибір методу визначається очікуваним характером деформацій, необхідною точністю, площею досліджуваної ділянки, періодичністю спостережень і доступністю об’єктів контролю (Зацерковний та ін., 2016).

Високоточне нівелювання застосовують для визначення вертикальних зміщень фундаментів, конструктивних елементів споруд, земної поверхні та геодезичних знаків. GNSS-спостереження забезпечують визначення тривимірних переміщень контрольних пунктів, а роботизовані тахеометри дають змогу автоматизувати повторні вимірювання координат і здійснювати тривалий контроль деформацій. Наземне лазерне сканування та фотограмметрія використовуються для створення деталізованих тривимірних моделей схилів і споруд та виявлення змін їх геометрії за результатами різночасових знімань.

Для території Києво-Печерської лаври важливе значення мають високоточне нівелювання та наземне лазерне сканування. Нівелювання забезпечує контроль вертикальних зміщень нерухомих пам’яток і прилеглих ділянок, тоді як лазерне сканування дає змогу фіксувати просторову конфігурацію конструкцій, підземних споруд і схилів та аналізувати її зміни в часі (Cherevko & Kril, 2026).



Рис. 2.2. Сучасні геодезичні прилади, що застосовуються для моніторингу екзогенних геологічних процесів: *а – цифровий нівелір Leica DNA03; б – GNSS-приймач Leica GS18; в – роботизований електронний тахеометр Leica TS16; г – наземний лазерний сканер Leica RTC360 (на основі матеріалів Leica Geosystems AG. URL: https://leica-geosystems.com/products/levels/digital-levels*)

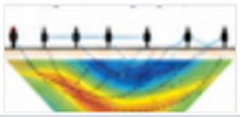
Перевагами геодезичних методів є висока точність, безпосереднє кількісне визначення переміщень і придатність до тривалих режимних спостережень. До основних обмежень належать потреба у стабільній опорній мережі, забезпеченні фізичного доступу до пунктів спостережень і локальний характер отримуваних даних. Крім того, зафіксоване зміщення саме по собі не визначає причину деформації, тому його геологічна інтерпретація потребує зіставлення з інженерно-геологічними, гідрогеологічними та дистанційними матеріалами (Bugai et al., 2023; Ivanik, Kravchenko & Hadiatska, 2024).

2.1.3. Геофізичні та гідрогеологічні методи

Геофізичні методи застосовують для дослідження внутрішньої будови геологічного середовища та просторової неоднорідності його фізичних

властивостей. Вони дають змогу виявляти літологічні межі, водонасичені й розущільнені ділянки, тріщинуваті зони, підземні порожнини та інші неоднорідності, які не завжди мають виражені поверхневі прояви. До основних методів належать електрична томографія, вертикальне електричне зондування, георадарне профілювання, сейсморозвідка заломлених і поверхневих хвиль, методи природного електричного поля та індукованої поляризації (рис. 2.3).

Електричні методи

Метод	Що визначає	Глибинність / деталізація
ЕРТ електротомографія 	■ водонасичення ■ поверхневі ковзання	■ глибина до 50–100 м ■ деталізація висока (1–2 м)
ВЕЗ вертикальне електричне зондування 	■ потужність відкладів ■ опір відкладів ■ рівень підземних вод	■ глибина до 150–300 м ■ деталізація середня
ПЕП природне електричне поле 	■ рух підземних вод ■ тріщинуватість ■ контактні межі	■ глибина до 50–80 м ■ деталізація низька–середня
ВП викликаної поляризації 	■ мінералізація ■ глинистість ■ зони підвищеної вологості	■ глибина до 50–100 м ■ деталізація середня

Хвильові методи

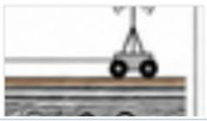
Метод	Що визначає	Глибинність / деталізація
Георадар (GPR) 	■ поверхневі відклади ■ пустоти, тріщини ■ зміни вологості	■ глибина до 10–30 м (до 50 м у сприятл. умовах) ■ деталізація висока
Сейсморозвідка (заломлення і відбиття) 	■ будова розрізу ■ потужність шарів ■ розломи, порушення	■ глибина від 20–30 м до кількох км ■ деталізація середня

Рис. 2.3. Основні геофізичні методи моніторингу екзогенних геологічних процесів

Вибір геофізичного методу визначається геологічною будовою, глибиною дослідження, очікуваним типом неоднорідності та необхідною просторовою деталізацією. Електророзвідувальні методи чутливі до змін вологості, пористості

й літологічного складу ґрунтів; георадарне профілювання використовують для локалізації неглибоких меж, підземних споруд і порожнин; сейсмічні методи забезпечують оцінювання пружних властивостей та ступеня розущільнення ґрунтового й породного масиву. Для досліджуваної території електророзвідувальні та георадарні дослідження застосовуються для виявлення водонасичених і розущільнених зон, ослаблених прошарків, підземних порожнин та ділянок порушеної будови ґрунтового масиву (Черевко, Кріль та Безродний, 2024). Водночас геофізичні аномалії не мають однозначної геологічної інтерпретації, оскільки подібні зміни фізичних полів можуть бути зумовлені різними причинами. Тому результати геофізичних досліджень потребують зіставлення з геологічними, гідрогеологічними та інженерними даними (Бугай та ін., 2023).

Гідрогеологічні методи спрямовані на визначення стану й динаміки підземних вод, які істотно впливають на фізико-механічні властивості ґрунтів та умови розвитку підтоплення, суфозії, просідання і схилових деформацій. Основу гідрогеологічного моніторингу становлять режимні спостереження за рівнем, напором та хімічним складом підземних вод, дослідження напрямів їх руху, умов живлення й розвантаження, а також контроль стану дренажних систем (рис. 2.4).

Особливе значення гідрогеологічних методів полягає в тому, що вони характеризують не лише просторові умови залягання підземних вод, а й часову мінливість геологічного середовища (Кошляков, 2011; Cherevko, Kril, & Saprykin, 2025). Підвищення рівнів ґрунтових вод, сезонні коливання, зміна напрямів фільтрації та локальні витоки з водонесучих комунікацій можуть спричиняти перезволоження, зниження міцності ґрунтів, активізацію суфозійних і просадкових деформацій.

Для досліджуваної території Києво-Печерської лаври гідрогеологічні спостереження мають пріоритетне значення через наявність печерних комплексів, схилів, неоднорідної ґрунтової товщі та розгалуженої інженерної інфраструктури. Багаторічні ряди рівнів ґрунтових вод дають змогу

встановлювати сезонні й довготривалі зміни, виявляти ділянки порушеного водообміну та оцінювати їх зв’язок із деформаційними проявами.

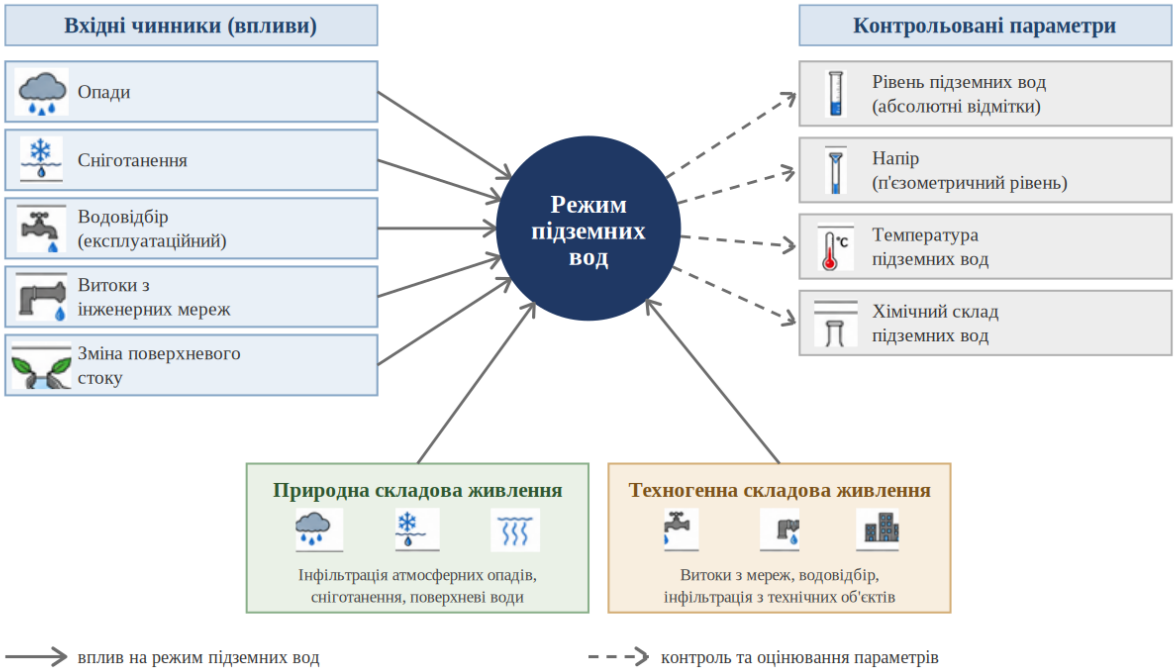


Рис. 2.4. Основні складові гідрогеологічного моніторингу урбанізованих територій

2.1.4. Методи дистанційного зондування Землі

Методи дистанційного зондування Землі забезпечують систематичне отримання просторово неперервної інформації про стан земної поверхні та його зміни. Їх основними перевагами є охоплення значних територій, повторюваність знімань і можливість ретроспективного аналізу архівних матеріалів. Залежно від фізичної природи реєстрованого сигналу використовують оптичні, радарні, теплові та висотні дані, які відрізняються просторовою й часовою роздільною здатністю та характеризують різні складові стану території (Зацерковний, 2014) (рис. 2.5).

Оптичні супутникові зображення застосовують для дешифрування зсувних тіл, ерозійних форм, змін земного покриву й забудови, а також розрахунку спектральних індексів. Зміни індексів рослинності та зволоження можуть відображати перезволоження, трансформацію рослинного покриву або порушення стану поверхні (Plichko et al., 2023; Trofymenko et al., 2023).

Цифрові моделі рельєфу, сформовані за результатами оптичного, радарного або лазерного знімання, використовують для визначення крутизни, експозиції та кривизни схилів, розчленованості рельєфу, напрямів стоку й топографічних індексів. Інтегрування морфометричних параметрів із геологічними, тектонічними та гідрогеологічними матеріалами забезпечує формування просторових факторів, необхідних для оцінювання передумов розвитку екзогенних геологічних процесів (Іванік та ін., 2023; Орленко, 2024).

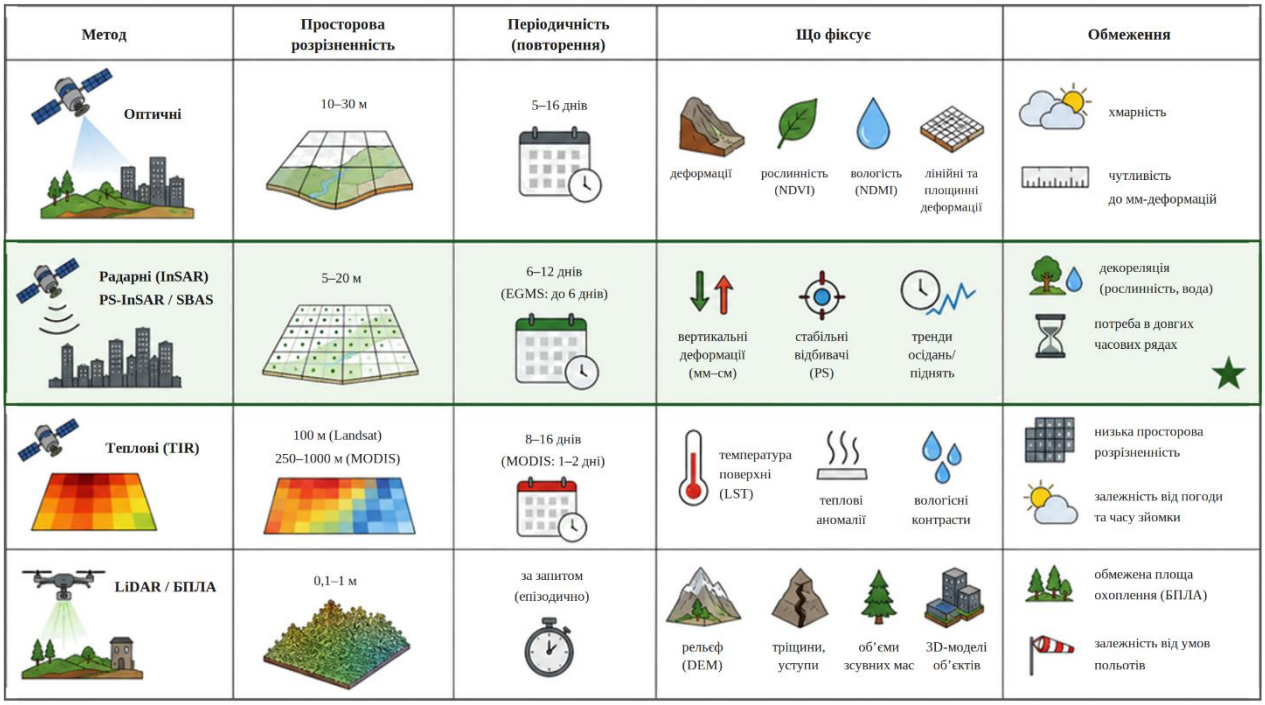


Рис. 2.5. Методи дистанційного зондування Землі в моніторингу екзогенних геологічних процесів та їх просторово-часові характеристики.

Особливе місце серед дистанційних методів посідає супутникова радарна інтерферометрія InSAR, що ґрунтується на аналізі фазових відмінностей радіолокаційного сигналу за повторних знімань. Метод дає змогу визначати зміщення земної поверхні вздовж лінії візування супутника та формувати часові ряди їх змін. Для урбанізованих територій і об'єктів культурної спадщини інформативним є метод постійних розсіювачів PS-InSAR, який використовує стабільні радіолокаційні відбивачі, пов'язані переважно з будівлями та інженерними конструкціями (Tapete & Cigna, 2017; Hudak, Kril & Zatserkovnyi, 2025).

Регіональне застосування багаточасової радарної інтерферометрії забезпечує Європейська служба моніторингу рухів земної поверхні EGMS. Її продукти формуються за даними Sentinel-1 із використанням постійних і розподілених розсіювачів та калібруванням за геодезичними моделями. Результати EGMS придатні для регіонального виявлення ділянок систематичних зміщень і визначення територій, що потребують детальнішого інструментального контролю (Costantini et al., 2021; EGMS Technical Documentation, 2023).

Застосування InSAR обмежується вимірюванням переміщень переважно вздовж лінії візування, декореляцією сигналу на ділянках зі щільною рослинністю, геометричними спотвореннями в умовах складного рельєфу та впливом атмосфери. Радарні дані характеризують величину й динаміку зміщення, але не визначають безпосередньо його геологічну причину. Тому їх інтерпретація потребує зіставлення з результатами нівелювання, GNSS-спостережень, інженерно-геологічних обстежень і даними про гідрогеологічні умови (Kril & Orlenko, 2022).

Для території Києво-Печерської лаври дистанційні методи забезпечують просторове доповнення локальних наземних спостережень. Оптичні зображення використовують для виявлення змін зволоження та стану поверхні, а радарні дані, для оцінювання зміщень нерухомих пам’яток і прилеглих ділянок. На схилах, вкритих рослинністю, і територіях зі складною конфігурацією забудови інформативність супутникових матеріалів може знижуватися.

Розглянуті групи методів характеризують різні складові геологічного середовища: польові й інженерно-геологічні дослідження забезпечують прямі відомості про будову та властивості масиву; геодезичні методи кількісно визначають переміщення; геофізичні дослідження відображають внутрішню неоднорідність; гідрогеологічні спостереження характеризують водний режим; дистанційні методи забезпечують повторюване просторове охоплення. Їхні інформаційні можливості й основні обмеження узагальнено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика методів моніторингу екзогенних геологічних процесів

Група методів	**Тип одержуваної інформації**	**Просторове охоплення та періодичність**	**Основні обмеження**	**Функція в дослідженні**
Польові та інженерно-геологічні	Геологічна будова, властивості ґрунтів і порід, фактичні прояви процесів	Локальне, окремі точки й ділянки; періодична, за програмою обстежень	Трудомісткість, дискретність, потреба у фізичному доступі	Отримання первинних даних, геологічна інтерпретація та верифікація
Геодезичні	Величина, напрям і швидкість переміщень поверхні та споруд	Локальне, мережа пунктів і об’єктів; періодична або безперервна	Потреба у стабільній опорній мережі, обмежене площинне охоплення	Кількісний контроль деформацій земної поверхні й нерухомих пам’яток
Геофізичні	Внутрішня будова масиву, водонасичення, тріщинуватість, зони розущільнення	Локальне або площинно-профільне; епізодична	Неоднозначність інтерпретації, потреба у геологічному обґрунтуванні	Виявлення підземних неоднорідностей і деталізація будови ґрунтового масиву
Гідрогеологічні	Рівень, напір, температура, склад і режим підземних вод	Мережа свердловин, локальне або площинне; режимна, від дискретної до безперервної	Нерівномірність мережі, потреба у тривалих рядах спостережень	Оцінювання стану й часової мінливості гідрогеологічного режиму
Оптичне дистанційне зондування	Земний покрив, морфометричні характеристики, спектральні індекси та зміни поверхні	Регіональне, просторово неперервне; регулярна, з багаторічним архівом	Хмарність, реєстрація переважно поверхневих ознак, неоднозначність спектральних змін	Просторовий скринінг, ретроспективний аналіз і формування тематичних ознак
Радарна інтерферометрія InSAR	Зміщення земної поверхні та об’єктів, часові ряди переміщень	Регіональне, залежне від щільності когерентних розсіювачів; регулярна	Лінія візування, декореляція, рельєфні й атмосферні впливи	Виявлення ділянок систематичних зміщень і аналіз їх динаміки

2.2. Геоінформаційні методи інтегрування та просторового аналізу даних

Геоінформаційні методи забезпечують інтегрування наземних, інструментальних і дистанційних спостережень у єдиній просторово-часовій структурі. Для урбанізованих територій це особливо важливо через неоднорідність геологічних умов, рельєфу, забудови, підземних споруд та інженерної інфраструктури. Поєднання відповідних даних дає змогу простежувати взаємозв'язки між природними передумовами, техногенними впливами та сучасними змінами геологічного середовища (Цюпа та ін., 2023; Кріль та ін., 2025).

У даному дослідженні геоінформаційні методи використано для вирішення трьох основних завдань: просторово-часового узгодження різнорідних матеріалів, формування кількісних ознак геологічної нестійкості та автоматизованого виявлення геопросторових аномалій. Результатом є структурована інформаційна основа для інтегрального та нейромережевого моделювання.

2.2.1. Інтегрування та підготовка геопросторових даних

Геоінформаційне інтегрування передбачає приведення різнорідних результатів спостережень до узгодженої просторової, атрибутивної й часової структури, придатної для спільного аналізу (Зацерковний та ін., 2020). Ця необхідність зумовлена відмінностями у змісті, форматах і способах просторового представлення даних: геологічні межі, будівлі, підземні споруди та інженерні мережі подаються як векторні об'єкти; цифрові моделі рельєфу й супутникові зображення мають растрову структуру; свердловини та пункти спостережень представлені точковими об'єктами; результати режимних вимірювань організовані як часові ряди. Їх об'єднання потребує послідовного узгодження просторового положення, роздільної здатності, атрибутивного складу та часової належності (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Схема геоінформаційного інтегрування різнорідних даних моніторингу в єдину геопросторову структуру.

Основною умовою інтегрування є приведення матеріалів до єдиної системи координат, оскільки невідповідність систем відліку спричиняє зміщення об'єктів і помилки під час зіставлення локальних інженерно-геодезичних матеріалів, архівних карт і супутникових даних. Узгодження просторової деталізації має запобігати необґрунтованому поширенню детальної інформації окремих спостережень на ділянки, для яких відповідна деталізація відсутня. Часове узгодження передбачає врахування дати, тривалості та періодичності спостережень: геологічна будова й морфометричні характеристики умовно сталі протягом періоду оцінювання, тоді як рівні підземних вод, зволоження, деформації та спектральні характеристики поверхні змінюються в часі, тому спільний аналіз потребує зіставлення матеріалів, що характеризують однакові або методично порівнювані періоди (Цюпа та ін., 2023; Кріль та ін., 2025). До основних процедур організації даних належать також перевірка топологічної коректності, усунення дубльованих об'єктів, стандартизація атрибутивних значень і ведення метаданих про походження, дату, систему координат, роздільну здатність і виконані перетворення, що забезпечує відтворюваність результатів.

Результатом інтегрування є геопросторова база даних, яка забезпечує впорядковане зберігання інформації, підтримання її цілісності, виконання просторових запитів і періодичне оновлення. Для оцінювання геологічної нестійкості доцільно поєднувати п'ять основних груп інформації (рис. 2.7):

- природні дані про геологічну будову, четвертинні відклади, рельєф, тектонічні та гідрогеологічні умови;
- інвентаризаційні відомості про задокументовані прояви екзогенних геологічних процесів;
- дані про забудову, підземні споруди, інженерні мережі та інші джерела техногенного впливу;
- результати режимних, геодезичних, гідрогеологічних і метеорологічних спостережень;
- похідні просторові показники, зокрема морфометричні характеристики, спектральні індекси, відстані до впливових об’єктів і параметри зміщень земної поверхні.

За характером змін у часі ці дані поділяються на відносно сталі, повільно змінні та динамічні, що визначає періодичність оновлення відповідних тематичних шарів (Belair et al., 2024; European Space Agency, 2024; USGS, 2024).

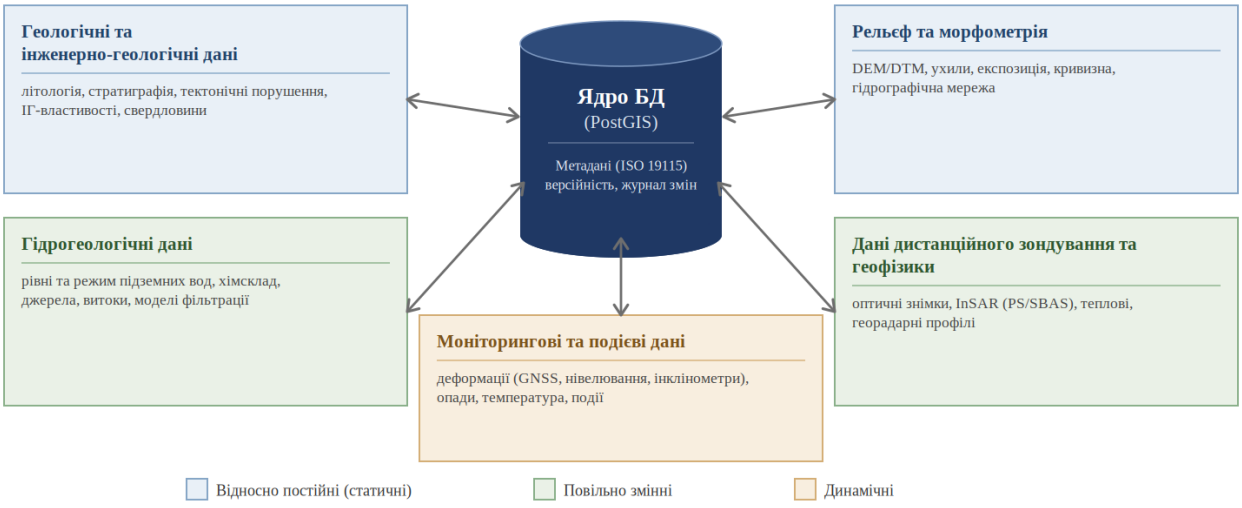


Рис. 2.7. Концептуальна структура геопросторової бази даних для оцінювання геологічної нестійкості

Підготовлена геопросторова база слугує основою для просторового аналізу, що забезпечує зіставлення різнорідних даних і формування кількісних ознак моделі (Semeniaka et al., 2021). Оверлейний аналіз, рекласифікація та зважене накладання використовуються для формування інтегральних оцінок природних і техногенних передумов розвитку процесів (Іванік та ін., 2023; Зацерковний та ін., 2024); буферний аналіз і карти відстаней характеризують вплив просторово наближених об'єктів — водотоків, інженерних мереж, підземних споруд і тектонічних порушень; інтерполяційні методи забезпечують побудову неперервних поверхонь рівнів підземних вод, властивостей ґрунтів і параметрів деформацій; морфометричний аналіз цифрових моделей рельєфу дає змогу визначати характеристики схилів, розчленованість рельєфу та зони акумуляції поверхневого стоку.

Для уніфікованого представлення векторних, растрових і точкових матеріалів використовується регулярна просторова сітка, яка забезпечує формування однакового набору характеристик для кожної комірки й подання даних у вигляді багатоканального просторового масиву; розмір комірки має відповідати точності вихідних матеріалів, масштабу забудови та просторовим розмірам локальних проявів процесів (Blaga & Nedevschi, 2024). Під час перевірки просторових моделей необхідно враховувати автокореляцію, оскільки характеристики сусідніх ділянок взаємопов'язані: випадковий розподіл просторово близьких спостережень між навчальною та валідаційною підмножинами може спричинити витік інформації й завищення показників якості, тому доцільним є територіально відокремлений (блоковий) поділ даних (Hudak & Kril, 2025). Таким чином, просторовий аналіз забезпечує формування узгоджених кількісних ознак і створює інформаційну основу для інтегрального та нейромережевого оцінювання геологічної нестійкості.

2.2.2. Автоматизоване виявлення геопросторових аномалій

Сучасний моніторинг спирається на автоматизовані методи виділення просторових характеристик за даними дистанційного зондування, які дають

змогу опрацьовувати великі обсяги різночасових матеріалів за єдиними, відтворюваними критеріями. До таких методів належать обчислення спектральних і температурних показників, аналіз характеристик радіолокаційного відбиття, визначення параметрів зміщень поверхні та статистичне порівняння значень із їх фоновим розподілом. Спільною рисою цих підходів є перехід від суцільного піксельного масиву до просторово локалізованих ознак, які характеризують стан і зміни земної поверхні й придатні для подальшого спільного аналізу з наземними та інструментальними даними (Pang et al., 2021; Xing et al., 2025).

Одним із таких підходів є автоматизоване виявлення геопросторових аномалій – просторово локалізованих статистично значущих відхилень значень аналізованого показника від його фонового розподілу; після просторового об'єднання та векторизації таких відхилень формуються аномальні зони, що потребують подальшої змістової інтерпретації (Marhes et al., 2026). Аналізованими показниками можуть бути спектральні індекси, температура земної поверхні, характеристики радіолокаційного відбиття або величини зміщень, відхилення яких пов'язані зі змінами зволоження, рослинного покриву, властивостей поверхні чи її просторового положення.

Статистична аномалія не є безпосереднім підтвердженням певного геологічного процесу, оскільки подібне відхилення може бути спричинене різними природними й техногенними чинниками, особливостями земного покриву, сезонними змінами або похибками вихідних даних. Тому автоматизоване виявлення аномалій використовується для попередньої локалізації ділянок, що потребують зіставлення з геологічними, гідрогеологічними, інструментальними та наземними спостереженнями. Необхідність автоматизації зумовлена значним обсягом сучасних даних дистанційного зондування: мультиспектральні зображення Landsat і Sentinel-2, теплові матеріали та продукти радарної інтерферометрії містять великі масиви піксельних значень, ручний аналіз яких трудомісткий і суб'єктивний, тоді як автоматизоване опрацювання забезпечує застосування однакових критеріїв до

всього набору даних і можливість аналізу різночасових матеріалів (Hudak, Marhes, & Zatserkovnyi, 2025).

Залежно від складності задачі для виявлення аномалій застосовують статистичне порогування, кластеризацію та методи машинного й глибокого навчання. Статистичні підходи ґрунтуються на оцінюванні фонового розподілу показника й виділенні значень, що перевищують установлену межу відхилення; методи машинного навчання враховують складніші багатовимірні залежності, але потребують достатнього обсягу навчальних даних і окремої перевірки результатів. Для великих масивів супутникових даних доцільним є поетапний підхід, за якого спочатку автоматично визначають потенційно аномальні ділянки, а потім проводять їх деталізований аналіз, що зосереджує інструментальні або польові дослідження на просторово обмежених територіях (Wang, Zhang, & Wu, 2023; Teixeira et al., 2024; Popescu et al., 2025). Інтерпретація аномалій за мультиспектральними даними може здійснюватися за допомогою системи нормалізованих різницевих індексів (NDVI, NDWI, MNDWI, NDMI), спільний аналіз яких підвищує обґрунтованість висновків, проте не усуває потреби зіставлення з незалежними матеріалами (Marhes et al., 2026).

У дисертаційному дослідженні автоматизоване виявлення геопросторових аномалій застосовано для формування тематичного шару сучасних змін стану земної поверхні. На його основі сформовано ознаку, яку включено до геопросторового набору даних як окрему вхідну характеристику. Вона доповнює відносно сталі природні й техногенні фактори інформацією про просторово локалізовані зміни, але не використовується для безпосереднього визначення виду геологічного процесу.

2.3. Методи моделювання та прогнозування екзогенних геологічних процесів

Моделювання забезпечує кількісне представлення взаємозв'язків між характеристиками геологічного середовища та його просторовим станом. Вибір підходу залежить від мети дослідження, масштабу території, повноти інженерно-

геологічних даних, кількості задокументованих проявів і характеру зв'язків між ознаками.

Для досліджуваної території Києво-Печерської лаври модель має враховувати різнорідні природні й техногенні характеристики, просторову неоднорідність території та обмежену кількість незалежно підтверджених проявів процесів. За характером формалізації використовуються детерміновані, статистичні, багатокритеріальні, машинні, глибокі та гібридні підходи (рис. 2.8). Ці групи відрізняються вимогами до вихідних даних, рівнем фізичної інтерпретованості та здатністю враховувати нелінійні залежності й просторовий контекст, що й визначає межі їх застосування для суцільного оцінювання геологічної нестійкості.

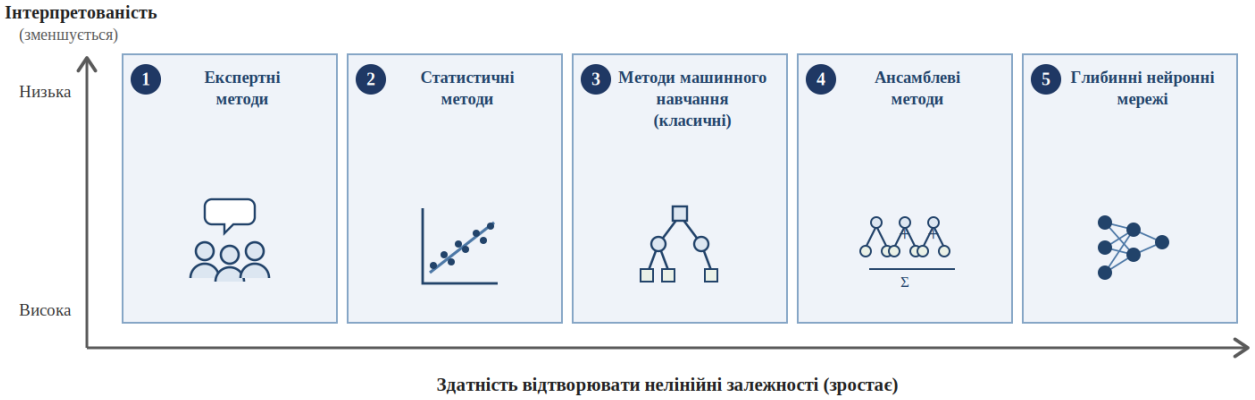


Рис. 2.8. Основні групи методів моделювання та прогнозування екзогенних геологічних процесів за характером формалізації

2.3.1. Детерміновані, статистичні та багатокритеріальні підходи

Детерміновані методи ґрунтуються на фізико-механічних закономірностях рівноваги та деформування геологічного середовища. Методи граничної рівноваги та скінченних елементів дають змогу оцінювати стійкість схилів і напружено-деформований стан ґрунтового масиву за відомих геометричних, гідрогеологічних і фізико-механічних параметрів (Шаповал та ін., 2025). Їх перевагою є фізична інтерпретованість, однак застосування для суцільного оцінювання урбанізованої території обмежується необхідністю детальних даних для кожної розрахункової ділянки. Тому вони найбільш придатні для локального

аналізу окремих схилів, підпірних конструкцій та інженерних споруд (Ivanik et al., 2023).

Статистичні методи встановлюють емпіричні залежності між задокументованими проявами процесів і характеристиками території (Вижва, 2007; Вижва, 2019). Вони мають нижчі вимоги до детального знання властивостей геологічного середовища, однак залежать від повноти й репрезентативності інвентаризаційних матеріалів. Неповне документування проявів, їх просторова кластеризація та задана форма зв'язку між змінними можуть спричиняти зміщення результатів.

Багатокритеріальні методи застосовують для інтегрального оцінювання територій за сукупністю різнорідних природних і техногенних факторів, особливо за обмеженої кількості контрольних подій. Метод аналізу ієрархій AHP передбачає визначення структури критеріїв, їх попарне порівняння, розрахунок вагових коефіцієнтів і перевірку узгодженості експертних суджень (Saaty, 1987). Нечіткі модифікації методу використовують для врахування невизначеності меж між класами (Zighmi et al., 2025).

Для території Києво-Печерської лаври багатокритеріальний підхід застосовувався для поєднання характеристик ґрунтової основи, гідрогеологічного режиму, рельєфу, проявів процесів, підземних споруд, водонесучих мереж, деформацій конструкцій та інженерного захисту (Бугай та ін., 2023; Комплексне дослідження, 2023, рис. 2.9).

Інтегральне оцінювання передбачає градацію факторів, їх нормалізацію та зважене агрегування, за результатами якого просторовим одиницям присвоюються відповідні класи стану (Kril et al., 2025). Його перевагою є фізична інтерпретованість критеріїв, однак результат залежить від прийнятих градацій, ваг і порогів класифікації, а лінійне агрегування не враховує автоматично нелінійні взаємодії та просторове оточенняю



Рис. 2.9. Концептуальна модель ієрархічного аналізу для ранжування геологічних та інженерних факторів стійкості будівель Києво-Печерської лаври, за Бугай та ін. (2023)

Слід зазначити, що потенціал стабільності природно-техногенної системи та геологічна нестійкість характеризують протилежно спрямовані аспекти стану геологічного середовища, однак не є математично взаємно оберненими без спеціально визначеного перетворення. Тому результати багатокритеріального оцінювання використано в дослідженні як методичну основу формування початкової інтегральної характеристики, а не як остаточну оцінку нестійкості. Вона є фізично інтерпретованою основою для формування цільових класів, які надалі уточнюються методами нелінійного просторового аналізу з використанням повного набору факторних і моніторингових ознак.

2.3.2. Методи машинного, глибокого та гібридного навчання

Методи машинного навчання встановлюють залежності між характеристиками геологічного середовища та його просторовим станом без попереднього задання жорсткої математичної форми зв'язку. У задачах просторового оцінювання застосовують метод опорних векторів, дерева рішень, Random Forest та алгоритми градієнтного бустингу, які здатні відтворювати нелінійні взаємодії й порогові ефекти (рис. 2.10) (Blaga & Nedevschi, 2026; Badola et al., 2025).

Результативність таких моделей залежить від повноти навчальних даних, співвідношення класів, просторового поділу й процедури валідації. Показники важливості ознак не слід автоматично трактувати як міру фізичної значущості геологічних чинників; їх інтерпретація потребує аналізу змісту ознак і взаємної корельованості, для чого можуть використовуватися методи на зразок SHAP (Khan et al., 2025).

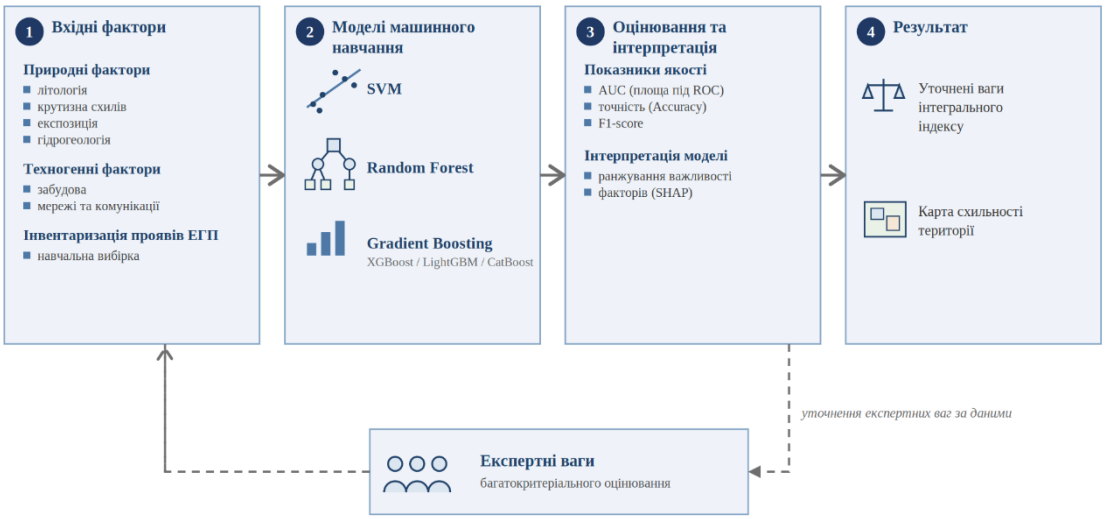


Рис. 2.10. Схема застосування методів машинного навчання для моделювання схильності території до екзогенних геологічних процесів

Табличні алгоритми переважно опрацьовують кожну просторову одиницю як незалежне спостереження, тому просторовий контекст ураховується лише за умови попереднього введення характеристик сусідства, відстаней або локальної щільності до набору ознак (Badola et al., 2025; Hudak & Kril, 2025). Це обмежує їх здатність безпосередньо відтворювати просторово зв'язані зміни – поширення перезволоження, деформацій та вплив лінійної інженерної інфраструктури. Додатковим обмеженням для територій культурної спадщини є недостатня кількість точно локалізованих і незалежно підтверджених проявів процесів та нерівномірна представленість класів стану, що підвищує ризик зміщення результатів у бік переважального класу.

Методи глибокого навчання формують ієрархічні представлення даних і дають змогу виявляти локальні й багатомасштабні закономірності без явного

конструювання всіх взаємодій між ознаками (Zhang & Wang, 2024; Kavya & Saravanan, 2025). Згорткові нейронні мережі аналізують просторову одиницю разом із її оточенням, що важливо для відтворення конфігурації рельєфу, перезволоження, підземних споруд, інженерних мереж і деформаційних проявів (Noroozi & Riahi, 2025; Feng et al., 2025).

Застосування глибокого навчання за обмеженої площі території пов'язане з ризиками перенавчання, просторового витоку інформації та нерівномірної представленості класів. Тому необхідними є просторовий поділ даних, регуляризація, контроль функції втрат та оцінювання результатів за кількома взаємодоповнювальними метриками (Jiang et al., 2026). Статистично високі показники якості також потребують змістової перевірки за фактичними проявами та незалежними інструментальними матеріалами.

Гібридні моделі поєднують різні механізми опрацювання даних, зокрема згорткове виділення локальних і багатомасштабних ознак із механізмами уваги для аналізу ширшого просторового контексту (Xizi et al., 2024; Xu et al., 2026). Для оцінювання геологічної нестійкості доцільним є згортково-трансформерний підхід: згорткові блоки виявляють локальні закономірності в багатоканальних факторних шарах, а механізм самоуваги встановлює залежності між просторово віддаленими ділянками (Blaga & Nedevschi, 2024; Zhao et al., 2024). Таке поєднання відповідає задачі семантичної сегментації, результатом якої є просторово узгоджена карта класів: згорткова частина забезпечує багатомасштабне представлення даних, трансформерний модуль розширює контекст аналізу, а декодер відновлює просторову деталізацію результату (рис. 2.11).

Використання гібридної архітектури не усуває обмежень, пов’язаних із недостатнім обсягом даних, просторовою автокореляцією та нерівномірною представленістю класів (Chen et al., 2021; Ma & Dou, 2023). Поєднання кількох функціональних модулів збільшує кількість параметрів і може підвищувати ризик перенавчання. Тому застосування таких моделей потребує просторового

поділу вибірки, регуляризації, контролю складності архітектури та оцінювання якості за кількома взаємодоповнювальними метриками.

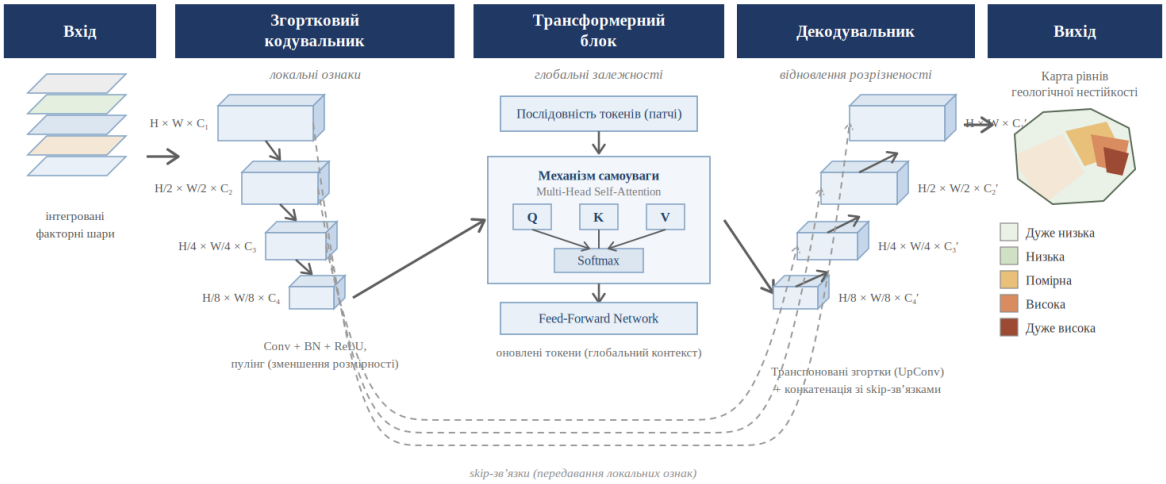


Рис. 2.11. Принципова схема гібридної згортково-трансформерної архітектури для моделювання геологічної нестійкості

Гібридний згортково-трансформерний підхід забезпечує спільне врахування нелінійних залежностей, локальних просторових ознак і ширшого контексту території. Це відповідає задачі моделювання геологічної нестійкості, для якої стан окремої просторової одиниці визначається не лише її власними характеристиками, а й конфігурацією природних і техногенних умов у прилеглому просторі.

2.4. Обґрунтування комплексного методичного підходу дослідження

Окремі групи методів не забезпечують повного розв'язання завдання оцінювання геологічної нестійкості урбанізованої території. Методи спостереження формують первинну інформацію про будову, стан і зміни геологічного середовища; геоінформаційні методи забезпечують просторово-часове узгодження різнорідних матеріалів; методи моделювання формалізують взаємозв'язки між ознаками та забезпечують отримання просторової оцінки. Тому методичною основою дослідження є комплексне поєднання наземних, дистанційних, геоінформаційних і модельних методів відповідно до їх інформаційних можливостей та обмежень.

2.4.1. Формування комплексного підходу до оцінювання геологічної нестійкості

Комплексний методичний підхід ґрунтується на принципах багаторівневості, взаємодоповнюваності, змістової верифікації та геоінформаційного інтегрування даних. Принцип багаторівневості передбачає застосування методів відповідно до просторового масштабу й необхідної деталізації дослідження. Дистанційні спостереження забезпечують суцільне охоплення території та попередню локалізацію ділянок із просторово вираженими змінами. Геодезичні, геофізичні й гідрогеологічні методи використовуються для кількісного контролю деформацій, уточнення внутрішньої будови ґрунтового масиву та оцінювання водного режиму, а польові й інженерно-геологічні дослідження забезпечують визначення властивостей геологічного середовища і перевірку природи виявлених змін (Plichko et al., 2023).

Принцип взаємодоповнюваності полягає у спільному використанні даних, отриманих за різними фізичними принципами. Геодезичні та радарні методи характеризують зміщення земної поверхні й споруд, геофізичні дослідження відображають неоднорідність ґрунтового масиву, гідрогеологічні спостереження характеризують часову мінливість підземних вод, а оптичні супутникові матеріали дають змогу виявляти зміни зволоження та стану поверхні. Узгоджені результати незалежних методів підвищують обґрунтованість інтерпретації, тоді як їх розбіжності є підставою для проведення додаткових досліджень.

Принцип змістової верифікації передбачає перевірку дистанційно й автоматизовано виявлених змін за матеріалами наземних та інструментальних спостережень. Спектральні, температурні, радарні та геофізичні аномалії не розглядаються як самостійне підтвердження розвитку конкретного геологічного процесу. Їх інтерпретація здійснюється з урахуванням геологічної будови, гідрогеологічних умов, техногенного навантаження та фактичних проявів деформацій.

Геоінформаційне інтегрування забезпечує приведення різнорідних матеріалів до єдиної системи координат, узгодженої просторової структури, атрибутивного складу та методично порівнюваних часових періодів. На цій основі формується багатоканальний геопросторовий набір даних, який поєднує відносно сталі природні й техногенні фактори з динамічними показниками водного режиму, деформаційного стану та дистанційно виявлених змін (Іванік та ін., 2023).

Початкову інтегральну характеристику сформовано методом багатокритеріального оцінювання на основі фізично інтерпретованих критеріїв, їх градацій і вагових коефіцієнтів (Бугай та ін., 2024). За результатами класифікації інтегрального показника визначаються цільові класи геологічної нестійкості. Перевагою такого підходу є змістова прозорість оцінки, однак лінійне агрегування не враховує автоматично нелінійні взаємодії факторів і просторовий контекст.

Для нелінійного просторового моделювання використовується гібридна згортково-трансформерна архітектура. Згорткові блоки виділяють локальні й багатомасштабні закономірності в багатоканальних просторових даних, трансформерний модуль ураховує залежності між просторово віддаленими ділянками, а декодувальна частина забезпечує формування просторово узгодженої карти класів геологічної нестійкості (Zhao et al., 2024; Xu et al., 2026).

Нейромережева модель не замінює багатокритеріальний підхід і не переобчислює експертно визначені ваги. Вона навчається відтворювати сформовані цільові класи з урахуванням просторового контексту та додаткових моніторингових ознак, зокрема гідрогеологічної динаміки, деформаційного стану й дистанційно виявлених аномалій. Обґрунтованість результатів оцінюється не лише за відповідністю цільовим міткам, а й шляхом зіставлення сформованої карти із задокументованими проявами процесів та незалежними інструментальними матеріалами.

За обмеженої площі досліджуваної території особливого значення набуває контроль просторового витоку інформації, перенавчання та дисбалансу класів.

Тому передбачено блоковий просторовий поділ даних, регуляризацію, зважування функції втрат і оцінювання результатів за взаємодоповнювальними метриками, що характеризують якість розпізнавання кожного класу.

2.4.2. Загальна методична схема дослідження

Загальна методична схема дослідження охоплює чотири взаємопов'язані етапи (рис. 2.12).

На першому етапі формується вихідна інформаційна основа за результатами інженерно-геологічних, гідрогеологічних, геодезичних, геофізичних і дистанційних спостережень. Отримані матеріали характеризують природні й техногенні умови, водний режим, деформаційний стан та просторові зміни земної поверхні.

Другий етап охоплює геоінформаційне інтегрування даних: приведення матеріалів до єдиної системи координат, узгодження просторової деталізації та часової належності, перевірку топологічної й атрибутивної коректності, а також формування структурованої геопросторової бази. Результатом є багатоканальний набір факторних, динамічних і дистанційних ознак.

На третьому етапі формується інтегральний показник геологічної нестійкості. Природні й техногенні фактори градуюються відповідно до встановлених критеріїв, нормалізуються та агрегуються з урахуванням вагових коефіцієнтів. За значенням інтегрального показника просторовим одиницям присвоюються мітки цільових класів геологічної нестійкості.

Четвертий етап охоплює нейромережеве моделювання, картографування та верифікацію результатів. Гібридна згортково-трансформерна модель навчається відтворювати цільові класи з урахуванням повного набору вхідних ознак і просторового контексту. За результатами моделювання формується карта геологічної нестійкості, яку зіставляють із початковою інтегральною оцінкою, задокументованими проявами процесів, даними радарної інтерферометрії, геофізичних та інших незалежних інструментальних досліджень.

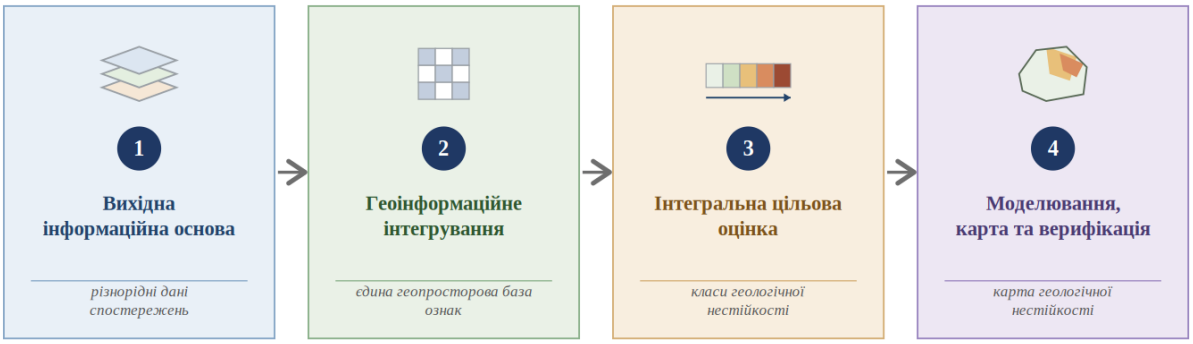


Рис. 2.12. Загальна методична схема оцінювання геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври

Запропонована схема забезпечує послідовний перехід від різнорідних первинних спостережень до просторово узгодженої оцінки стану геологічного середовища. Результатом дослідження є не прогноз конкретної аварійної події, а карта класів геологічної нестійкості, придатна для періодичного оновлення, зіставлення різночасових оцінок і визначення ділянок, що потребують деталізованого моніторингу.

Висновки до розділу 2

У розділі обґрунтовано комплексний методичний підхід до оцінювання геологічної нестійкості урбанізованих територій, що поєднує моніторингові спостереження, геоінформаційне інтегрування даних, багатокритеріальне оцінювання та нейромережеве моделювання.

1. Сформовано багаторівневу систему моніторингу, у якій дистанційні методи забезпечують просторове охоплення території, інструментальні спостереження характеризують кількісні зміни геологічного середовища, а польові дослідження забезпечують їх змістову інтерпретацію та верифікацію.

2. Обґрунтовано просторово-часове узгодження факторних, режимних, деформаційних і дистанційних даних у єдиній геоінформаційній системі. Геопросторову базу визначено як інформаційну основу комплексного аналізу стану геологічного середовища.

3. Визначено взаємодоповнювальні функції багатокритеріального та нейромережевого підходів. Багатокритеріальне оцінювання формує фізично інтерпретовану інтегральну характеристику, а нейромережеве моделювання забезпечує нелінійне просторове відтворення та контекстне коригування цільових класів з урахуванням додаткових моніторингових ознак.

4. Обґрунтовано застосування гібридної згортково-трансформерної архітектури, що поєднує виділення локальних і багатомасштабних ознак з урахуванням ширших просторових залежностей.

5. Розроблено загальну методичну схему, що охоплює формування й інтегрування вихідних даних, побудову цільової оцінки, нейромережеве моделювання, картографування та верифікацію результатів.

Список використаних джерел до розділу 2:

Бугай, Д. О., Щербина, С. В., Кріль, Т. В., Черевко, І. А., & Шехунова, С. Б. (2023). Огляд сучасних технологій «моніторингу структурного здоров'я» історичних будівель у складних інженерно-геологічних умовах: сенсори, методи аналізу даних та перспективи застосування в НЗ «Києво-Печерська лавра». *Збірник наукових праць ІГН НАН України, 16*(2), 76–86. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.293237

Вижва, З. О. (2007). *Математичні моделі в природознавстві*. Київ: ВГЛ «Обрії». 160 с.

Вижва, З. О. (2019). *Статистичне моделювання в геології*. Київ: ВПЦ «Київський університет». 395 с.

Зацерковний, В. І. (2014). Аналіз моделей інтеграції технологій ГІС, ДЗЗ і GPS у задачах моніторингу стану навколишнього середовища. *Математичні машини і системи, 4*, 44–52.

Зацерковний, В. І., Демидов, В. К., Цюпа, І. В., & Малік, Т. М. (2024). *Моделювання в ГІС*. Електронне видання. 420 с.

Зацерковний, В. І., Плічко, Л., Приліпко, О., Ніколаєнко, О., & Мужанова, Т. (2020). Обґрунтування доцільності застосування геоінформаційних систем у ландшафтно-екологічному моніторингу. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 1*(88), 98–105. https://doi.org/10.17721/1728-2713.88.14

Зацерковний, В. І., Тішаєв, І. В., Віршило, І. В., & Демидов, В. К. (2016). *Геоінформаційні системи в науках про Землю*. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя. 510 с.

Іванік, О., Шевчук, В., Кравченко, Д., & Гадяцька, К. (2023). Прогнозування зсувної небезпеки та оцінка впливу на суспільство: головні підходи, принципи, методи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 1*(100), 6–14. https://doi.org/10.17721/1728-2713.100.01

Кабінет Міністрів України. (2024). *Про затвердження Порядку здійснення моніторингу геологічного середовища* (Постанова № 685 від 13 червня 2024 р.). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/685-2024-п

Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій. (2023). Науковий звіт. Київ: Інститут геологічних наук НАН України.

Кошляков, О. Є., Диняк, О. В., & Кошлякова, І. Є. (2012). Техногенна складова інфільтраційного живлення ґрунтових вод як чинник змін гідрогеодинамічних умов на територіях ПМА. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 59*, 48–50.

Кузьменко, Е. Д. (ред.). (2016). *Прогнозування зсувів: монографія*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ.

Орленко, Т. А. (2024). *Методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів на прикладі правобережжя Канівського водосховища* (дисертація доктора філософії). Інститут геологічних наук НАН України.

Цюпа, І. В., Зацерковний, В. І., & Демидов, В. К. (2023). *Системний аналіз. Ч. 1*. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя. 335 с.

Черевко, І. А., Кріль, Т. В., & Безродний, Д. А. (2024). Неруйнівні методи встановлення причинно-наслідкового зв'язку аварій водонесучих мереж та умов збереження архітектурної спадщини. *Геологічний журнал, 3*(388), 11–30. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769

Шаповал, В. Г., Іванова, Г. П., Олішевська, С. О., & Чушкіна, І. В. (2025). Обґрунтування вибору та розрахунок параметрів конструкції, що забезпечує стійкість ґрунтового схилу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 28*, 81–90. https://doi.org/10.15802/bttrp2025/344926

Badola, S., Pandey, M., Mishra, V. N., Parkash, S., & Zhran, M. (2025). Landslide susceptibility mapping in complex topo-climatic Himalayan terrain, India

using machine learning models: A comparative study of XGBoost, RF and ANN. *Geological Journal, 60*(10), 2331–2350. https://doi.org/10.1002/gj.5175

Belair, G. M., Jones, E. S., Slaughter, S. L., & Mirus, B. B. (2024). *U.S. Geological Survey landslide susceptibility data*. U.S. Geological Survey.

Blaga, B.-C., & Nedevschi, S. (2024). Semantic segmentation of remote sensing images with transformer-based U-Net and guided focal-axial attention. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3470316

Chen, J., Lu, Y., Yu, Q., Luo, X., Adeli, E., Wang, Y., Lu, L., Yuille, A. L., & Zhou, Y. (2021). TransUNet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation. *arXiv:2102.04306*. https://arxiv.org/abs/2102.04306

Cherevko, I., & Kril, T. (2026). Factors controlling the stability and preservation of authentic underground galleries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1638*(1), 012051. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1638/1/012051

Cherevko, I., Kril, T., & Saprykin, V. (2025). Hydrogeological monitoring for landslide hazard mitigation: Case study of the Near Caves Hill slope of Kyiv-Pechersk Lavra. *5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520024

Costantini, M., Minati, F., Trillo, F., Ferretti, A., Passera, E., Rucci, A., et al. (2021). EGMS: Europe-wide ground motion monitoring based on full resolution InSAR processing of all Sentinel-1 acquisitions. *IGARSS 2022: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5093–5096. https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553562

European Environment Agency. (2023). *European Ground Motion Service (EGMS): Product specifications and technical documentation*. Copernicus Land Monitoring Service. https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service

European Space Agency. (2024). *Copernicus Sentinel-1C launch and constellation status*. https://www.esa.int/

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology, 102*(3–4), 85–98. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022

Feng, L., Zhang, M., Mao, Y., Liu, H., Yang, C., Dong, Y., & Nanehkaran, Y. (2025). Convolutional neural network-based deep learning for landslide susceptibility mapping in the Bakhtegan watershed. *Scientific Reports, 15*, 13250. https://doi.org/10.1038/s41598-025-96748-3

Fulong, C., Peifeng, M., Siliang, C., Qingwu, H., & Huadong, G. (2026). Remote sensing for cultural heritage: A systematic review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.105039

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*, Kyiv, Ukraine. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510054

Hudak, V., Kril, T., & Zatserkovnyi, V. (2025). Remote sensing analysis of vertical surface displacements as an indicator of underground structure deformations. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 1*(108), 94–102. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13

Ivanik, O., Kravchenko, D., & Hadiatska, K. (2024). *Modelling of geological processes and structures. Part 1*. Taras Shevchenko National University of Kyiv. 94 p.

Jiang, P., Ma, Z., & Mei, G. (2026). Deep learning for potential landslide identification: Data, models, applications, challenges, and opportunities. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 26*, 487–529. https://doi.org/10.5194/nhess-26-487-2026

Kavya, M., & Saravanan, K. (2025). Evaluating hybrid and machine learning models for landslide susceptibility mapping in a high-risk region of the Western Ghats, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 16*(1), 2595694. https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2595694

Khan, D., Akramb, W., & Ullah, S. (2025). Enhancing landslide susceptibility predictions with XGBoost and SHAP: A data-driven explainable AI method. *Geocarto International, 40*(1), 2514725. https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2514725

Kril, T., Cherevko, I., & Shekhunova, S. B. (2024). A ranking analysis of geological and engineering factors of historical monuments' stability response: A case study of Kyiv-Pechersk Lavra, Ukraine. *Buildings, 14*(10), 3152. https://doi.org/10.3390/buildings14103152

Kril, T., Cherevko, I., & Shekhunova, S. B. (2025). Numerical analysis of the large-scale water supply network accident consequences on the engineering and geological conditions of a heritage site. *Innovative Infrastructure Solutions, 10*(2), 89. https://doi.org/10.1007/s41062-024-01859-x

Ma, J., & Dou, J. (2023). Machine learning modeling for spatial-temporal prediction of geohazard. *Sensors, 23*(22), 9262. https://doi.org/10.3390/s23229262

Marhes, S., Hudak, V., Zatserkovnyi, V., Filipovych, V., & De Donatis, M. (2026). Detection of soil degradation processes in river basins using satellite indices and a custom QGIS plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 1*(112), 122–132. https://doi.org/10.17721/1728-2713.112.14

Noroozi, M., & Riahi, M. A. (2025). Using deep learning for facies classification in geological exploration: Feedforward neural network vs. convolutional neural network approaches. *Bulletin of Geophysics and Oceanography*. https://doi.org/10.4430/bgo00495

Pang, G., Shen, C., Cao, L., & van den Hengel, A. (2021). Deep learning for anomaly detection: A review. *ACM Computing Surveys, 54*(2), 1–38. https://doi.org/10.1145/3439950

Plichko, L., Zatserkovnyi, V., Tsiupa, I., Shovkoplias, T., & Polyakova, N. (2023). Use of remote sensing data and methods for regional monitoring of hazardous geological processes. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities 2023*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202350001

Popescu, R., Anantrasirichai, N., & Biggs, J. (2025). Unsupervised anomaly detection for volcanic deformation in InSAR imagery. *Earth and Space Science*. https://doi.org/10.1029/2024EA003892

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process: What it is and how it is used. *Mathematical Modelling, 9*(3–5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

Semeniaka, V. Yu., Zatserkovnyi, V., Ilchenko, A., Yevsieiev-Severyna, I., & Ilyin, L. (2021). Application of geoinformation technologies in simulation of landslide processes. *Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities 2021*, 1–6. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1007

Szymczak, T., & Krezalek, K. (2018). Forecasting model of total runoff and its components from a partially urbanized small lowland catchment. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus, 17*(3), 185–203. https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2018.17.3.185

Tapete, D., & Cigna, F. (2017). InSAR data for geohazard assessment in UNESCO World Heritage sites: State-of-the-art and perspectives in the Copernicus era. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 63*, 24–32. https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.07.007

Teixeira, A. C., Bakon, M., Perissin, D., & Sousa, J. J. (2024). InSAR analysis of partially coherent targets in a subsidence deformation: A case study of Maceió. *Remote Sensing, 16*(20), 3806. https://doi.org/10.3390/rs16203806

Trofymenko, P., Myslyva, T., Stepanenko, D., Mohylko, M., Zatserkovnyi, V., & Trofimenko, N. (2023). Using Sentinel 2A spectral-zone images for qualitative assessment of soils in the Northern Forest-Steppe of Ukraine. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2(3), 51–66. https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230203.06

U.S. Geological Survey. (2024). *U.S. landslide inventory and susceptibility map*. https://www.usgs.gov/tools/us-landslide-inventory-and-susceptibility-map

Wang, T., Zhang, Q., & Wu, Z. (2023). A deep-learning-facilitated, detection-first strategy for operationally monitoring localized deformation with large-scale InSAR. *Remote Sensing, 15*(9), 2310. https://doi.org/10.3390/rs15092310

Xing, Y., Hang, L., Ziyue, C., Rui, P., Jiayi, C., Junxiao, Z., Weihua, D., & Qiao, W. (2025). Real-time remote sensing for sudden surface anomalies: A review of principles and challenges. *Space: Science & Technology*. https://doi.org/10.34133/space.0362

Xizi, Y., Shuang, L., & Yu, Z. (2024). Incorporating convolutional and transformer architectures to enhance semantic segmentation of fine-resolution urban images. *European Journal of Remote Sensing, 57*(1), 2361768. https://doi.org/10.1080/22797254.2024.2361768

Xu, R., Ma, L., Song, B., Cheng, H., Yang, T., Song, Y., & He, Y. (2026). Geohazard risk assessment model based on deep neural network. *Results in Engineering, 29*, 109029. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109029

Zhang, Q., & Wang, T. (2024). Deep learning for exploring landslides with remote sensing and geo-environmental data: Frameworks, progress, challenges, and opportunities. *Remote Sensing, 16*(8), Article 1344. https://doi.org/10.3390/rs16081344

Zhao, Z., Chen, T., Dou, J., Liu, G., Plaza, A., et al. (2024). Landslide susceptibility mapping considering landslide local-global features based on CNN and Transformer. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 17*, 7475–7489. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3379350

Zighmi, K., Zahri, F., Faqeih, K., Amri, A. A., Riheb, H., Alamri, S. M., & Alamery, E. (2025). AHP multi-criteria analysis for landslide susceptibility mapping in the Tellian Atlas chain. *Scientific Reports, 15*. https://doi.org/10.1038/s41598-025-10819-z

РОЗДІЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРИТОРІЇ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ ТА ФОРМУВАННЯ ГЕОПРОСТОРОВОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Достовірність моніторингу та оцінювання геологічної нестійкості значною мірою визначається повнотою вивчення природних і техногенних умов території, а також ступенем інтегрування різнорідних даних у єдину інформаційну основу. Перехід від теоретичних та методичних засад до практичного оцінювання потребує характеристики геологічного середовища, аналізу проявів екзогенних геологічних процесів і чинників їх розвитку, а також формування структурованого набору геопросторових даних, придатного для подальшого аналізу та моделювання.

Об’єктом дослідження є територія Національного заповідника «Києво-Печерська лавра», у межах якої складні інженерно-геологічні й гідрогеологічні умови поєднуються зі значною щільністю історичної забудови, розгалуженою системою підземних споруд та інженерних комунікацій і тривалим техногенним освоєнням. Взаємодія природних передумов і техногенних впливів зумовлює просторову неоднорідність стану геологічного середовища та визначає необхідність комплексного оцінювання його нестійкості.

3.1. Природні та техногенні умови формування геологічної нестійкості території

Національний заповідник «Києво-Печерська лавра» є одним із найбільших історико-культурних комплексів України та складовою об’єкта Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО. Територія Заповідника площею близько 25 га розташована в центральній частині Києва на високому правому березі Дніпра й охоплює понад сто пам’яток архітектури, археології та монументального мистецтва (рис. 3.1).

У структурно-функціональному відношенні територію умовно поділяють на Верхню та Нижню лавру. Верхня лавра розташована в межах піднятої частини

Печерського лесового плато, тоді як Нижня лавра приурочена до нижчих гіпсометричних рівнів і схилів долини Дніпра. Важливими складовими території є Ближні (Антонієві) та Дальні (Феодосієві) печери. Печерні лабіринти створено у слабколітифікованих неогенових відкладах на незначній глибині від денної поверхні, що зумовлює їхню чутливість до змін гідрогеологічного режиму, перезволоження та деформування ґрунтового масиву (Рибін та ін., 2001; Черевко, 2019).



Рис. 3.1. Оглядова карта-схема Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» (за офіційним планом Заповідника)

Просторову неоднорідність інженерно-геологічних умов визначає поєднання розчленованого рельєфу схилів долини Дніпра й Лаврського яру, просадкових лесових ґрунтів, значної крутизни окремих ділянок, підземних споруд, щільної історичної забудови та розгалуженої інженерної інфраструктури. Сукупна дія цих чинників зумовлює високу чутливість геологічного середовища до змін водного режиму й техногенного навантаження.

Територія Києво-Печерської лаври тривалий час є об’єктом інженерно-геологічних, гідрогеологічних, геофізичних і геодезичних досліджень. Отримані результати характеризують геологічну будову, режим підземних вод, стан підземних споруд, деформації нерухомих пам’яток і прояви небезпечних геологічних процесів (Демчишин, 1992; Демчишин, 2004; Бєлов, Дєдов та Бугаєнко, 2016; Черевко, 2019; Kril et al., 2024).

У межах наукових програм і спеціалізованих проєктів досліджено інженерно-геологічний стан території та розроблено заходи з удосконалення її інженерного захисту. За результатами геофізичних досліджень установлено ділянки підвищеного зволоження та переважні напрями міграції підземних вод у саду над Ближніми печерами (Рибін та ін., 2001; Левашов, Піщаний та Корчагін 2005; 2008). Для комплексу Ближніх печер створено автоматизовану систему гідрогеологічного моніторингу, а результати режимних спостережень і контролю деформацій пам’яток узагальнено у працях фахівців Заповідника та Інституту геологічних наук НАН України (Скальський та ін., 2007; Черевко та Куциба, 2011; Kril, Shekhunova, & Cherevko, 2019).

Накопичені матеріали буріння, інженерно-геологічні розрізи, часові ряди рівнів ґрунтових вод, результати геофізичних і геодезичних спостережень, відомості про технічний стан споруд та задокументовані прояви екзогенних геологічних процесів становлять фактологічну основу дослідження. Їх систематизація забезпечує характеристику природних і техногенних умов території та формування геопросторової інформаційної основи оцінювання геологічної нестійкості.

3.1.1. Геологічна та інженерно-геологічна будова

Територія Києво-Печерської лаври розташована в межах тектонічної зони переходу від Українського щита до Дніпровсько-Донецької западини. У геологічній будові виділяють два структурні поверхи: докембрійський кристалічний фундамент і палеозойсько-кайнозойський осадовий комплекс. Кристалічний фундамент, представлений гранітами, мігматитами, діоритами та

іншими метаморфізованими породами, залягає на глибині 120–200 м і безпосередньої участі у формуванні інженерно-геологічних умов приповерхневої частини розрізу не бере.

Основне значення для стану історичної забудови, підземних споруд і розвитку сучасних екзогенних геологічних процесів мають палеогенові, неогенові й четвертинні відклади, перекриті техногенними утвореннями. Стратиграфічне розчленування розрізу ґрунтується на уніфікованих схемах палеогенових і неогенових відкладів України, матеріалах буріння та результатах геофізичних досліджень центральної історичної частини Києва та безпосередньо території Києво-Печерської лаври (Макаренко та ін., 1987; Демчишин та Беспалова, 1987; Барщевский, 1989; Гожик та ін., 2012; Левашов, Піщаний та Корчагін, 2008).

Палеогенова частина розрізу представлена відкладами київської світи (P_2kv), харківської серії (P_3hr) та берекської світи (P_3br). Київська світа складена кварц-глауконітовими пісками й мергельними глинами потужністю до 26 м. Мергельні глини виконують функцію регіонального водотриву та визначають нижню межу зони активного водообміну (Зосимович та Шевченко, 2015). Харківська серія представлена алевритами, дрібнозернистими глауконітовими пісками, пісковиками й алевритовими глинами. Її піщані різновиди формують регіонально поширений водоносний горизонт.

Новопетрівська, або колишня полтавська, світа неогену (N_1pt) представлена піщано-глинистою товщею субконтинентального походження. У її складі виділяють різнозернисті кварцові піски, каоліністі тонко- й дрібнозернисті піски, супіски, вуглисті глини та лінзи пісковиків. Загальна потужність відкладів становить приблизно 24–28 м, а покрівля залягає на абсолютних відмітках 145–147 м. У слабколітифікованих піщаних відкладах цієї світи створено Ближні й Дальні печери. Стійкість підземних виробок залежить від гранулометричного складу, ступеня зцементованості, тріщинуватості та обводнення порід.

Вище залягають строкаті глини (N_1ps) та нерозчленовані неоген-четвертинні бурі й червоно-бурі глини ($N_2–Q_1$). Їх потужність змінюється від 8–10 м на схилах до 20 м на плато, а абсолютні відмітки покрівлі становлять переважно 158–168 м. Глинисті товщі виконують функцію відносного водотриву для верхніх водоносних горизонтів. Нерівність їх покрівлі сприяє формуванню локальних улоговин і латеральних шляхів руху підземних вод у напрямку схилів та печерних комплексів. Тому геометрія поверхні водотривких глин є одним із чинників просторового перерозподілу підземного стоку та утворення локальних зон перезволоження (Черевко та Куциба, 2011).

Четвертинні відклади представлені озерними, флювіогляціальними, моренними, еолово-делювіальними та делювіально-зсувними утвореннями. Найбільше інженерно-геологічне значення мають лесовидні суглинки й супіски, які суцільним покривом залягають на вододільних ділянках і схилах, за винятком зон ерозійного розмиву. У нижній частині лесової товщі поширені переважно непросадкові суглинки, а у верхній, високопористі просадкові супіски. За додаткового замочування вони можуть зазнавати ущільнення, що супроводжується нерівномірними осіданнями фундаментів і деформаціями споруд. Потужність еолово-делювіального комплексу за результатами вишукувань становить 3,0–15,6 м, а в межах території загалом може збільшуватися до 20–24 м. Абсолютні відмітки покрівлі лесових порід змінюються від 176–186 м на плато до 140–150 м на схилах (Барщевский, 1989).

У межах схилів плато й ярів поширені делювіально-зсувні відклади ($Qdc_{3–4}$), представлені сумішшю піщаних і глинистих порід різного генезису. Їх потужність змінюється від 1–2 м поблизу стінок відриву до 9–10 м у зниженнях рельєфу й язикових частинах зсувних накопичень. Ці відклади характеризуються неоднорідним складом і мінливими фізико-механічними властивостями, що ускладнює оцінювання стійкості схилів.

Верхню частину розрізу утворюють техногенні ґрунти (tIV), поширені на значній частині території Заповідника. Вони представлені неоднорідною сумішшю супісків, суглинків, глин і пісків із включеннями будівельних

матеріалів, вміст яких місцями досягає 50 % об'єму. За результатами інженерно-геологічних вишукувань потужність техногенних утворень переважно становить 0,4–3,9 м, але в межах засипаних ярів і ділянок тривалого господарського освоєння може бути значно більшою. Неоднорідність складу, нерівномірне ущільнення та невитриманість за простяганням зумовлюють просторову мінливість деформаційних властивостей техногенної товщі (Кріль, 2017).

За матеріалами інженерно-геологічних вишукувань у приповерхневій частині розрізу виділено шість основних геолого-генетичних комплексів, розділених за складом і станом ґрунтів на чотирнадцять інженерно-геологічних шарів. Просторове положення основних горизонтів та умови їх залягання відображено на інженерно-геологічних розрізах території саду над Ближніми печерами (рис. 3.2). Розрізи демонструють зниження абсолютних відміток покрівлі геологічних шарів і рівнів ґрунтових вод у напрямку Лаврського яру, що відповідає загальній спрямованості підземного стоку (Комплексний моніторинг, 2015).

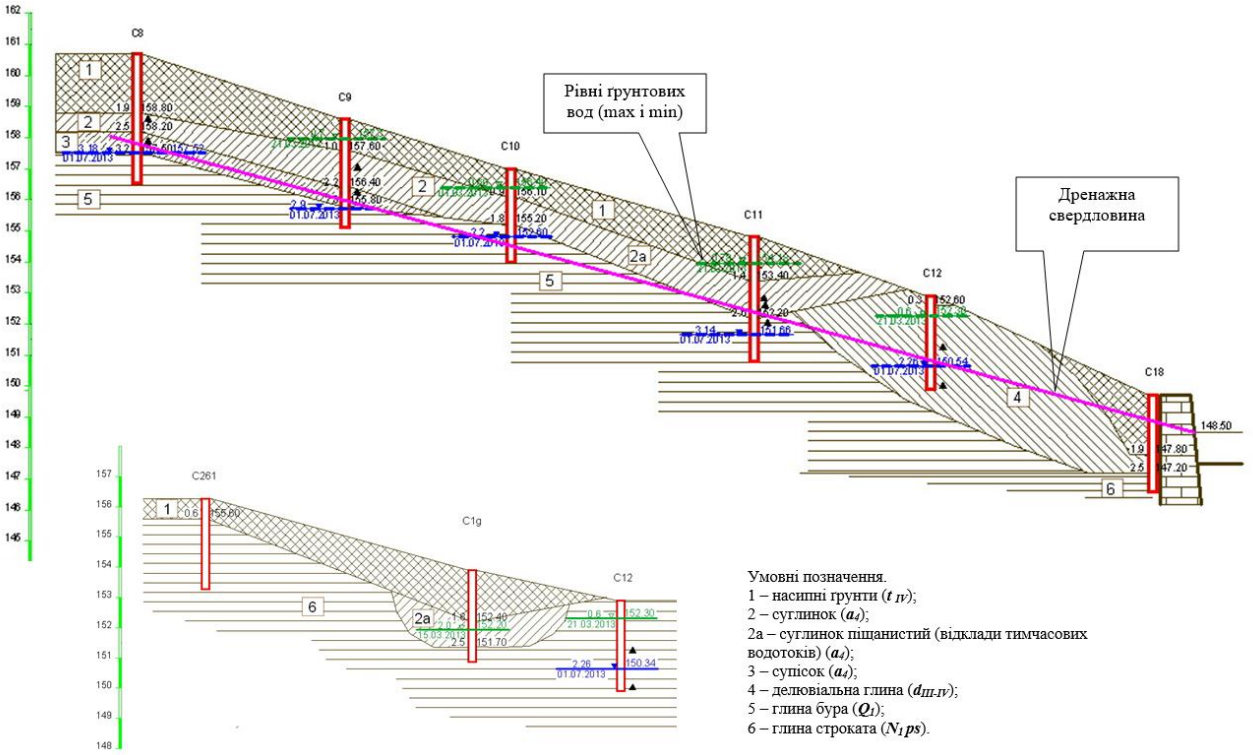


Рис. 3.2. Інженерно-геологічні розрізи території саду Ближніх печер Києво-Печерської лаври (Комплексний моніторинг, 2015)

Основними геологічними передумовами нестійкого стану є поширення просадкових лесових ґрунтів, нерівна поверхня водотривких глин, залягання слабколітифікованих піщаних відкладів із підземними виробками, наявність делювіально-зсувних комплексів і неоднорідних техногенних утворень. Ці характеристики належать до відносно сталих просторових властивостей території та визначають її чутливість до змін гідрогеологічного режиму й техногенного навантаження.

3.1.2. Геоморфологічні та гідрогеологічні умови

У геоморфологічному відношенні територія Заповідника приурочена до підвищеної частини Київського лесового плато, що в структурному плані відповідає Печерському антиклінальному підняттю. Абсолютні відмітки поверхні плато становлять переважно 190–198 м, глибина ерозійного розчленування досягає 80 м, а густота яружно-балкової мережі, 1–2 км/км². Крутизна схилів, орієнтованих до долини Дніпра, на окремих ділянках становить 35–38° (Барщевский, 1989). Такі морфометричні характеристики визначають інтенсивність поверхневого стоку, умови гравітаційного переміщення матеріалу та підвищену чутливість схилів до змін зволоження.

Основним геоморфологічним елементом південно-східної частини території є Лаврський яр, який розділяє Ближньопечерний і Дальньопечерний пагорби. Абсолютні відмітки денної поверхні в його межах змінюються від 116 до 187 м (Черевко, 2016; Черевко, 2019). Значна амплітуда рельєфу зумовлює розташування споруд у різних геоморфологічних та інженерно-геологічних умовах і визначає просторову диференціацію поверхневого й підземного стоку.

У гідрогеологічному відношенні територія розташована в північно-західній частині Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну. У її межах поширені три перші від поверхні водоносні горизонти: у четвертинних еолово-делювіальних, озерно-льодовикових і флювіогляціальних відкладах плато; у делювіально-зсувних відкладах схилів; в олігоценових піщаних відкладах харківської серії. Для сучасного стану території найбільше значення мають

перші два горизонти, які на окремих ділянках мають гідравлічний зв’язок і фактично утворюють єдину систему (Демчишин, Кріль та Анацький, 2014; Черевко, 2019).

Водоносний горизонт четвертинних відкладів приурочений до моренних суглинків і супісків із прошарками водонасичених флювіогляціальних пісків, а місцями також до лесовидних ґрунтів. Його потужність змінюється приблизно від 2–3 до 15–20 м, а абсолютні відмітки рівнів ґрунтових вод становлять 150–180 м. Річна амплітуда природних коливань переважно не перевищує 0,5–1,0 м, проте внаслідок аварійних витоків із водонесучих комунікацій спостерігалися локальні підйоми рівнів на 2–4,5 м (Hudak et al., 2020; Hudak et al., 2021). Водотривкою основою горизонту є товща бурих і строкатих глин, а в місцях її розмиву можливий гідравлічний зв’язок із водоносними горизонтами піщаних палеоген-неогенових відкладів.

Живлення четвертинного горизонту відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів і техногенних надходжень. Розвантаження здійснюється в напрямку схилів, у водоносний горизонт делювіально-зсувних відкладів, а також шляхом перетікання до глибших піщаних горизонтів. Поширення забудови, водонепроникних покриттів, підземних споруд та інженерних мереж істотно змінює природні умови живлення й розвантаження підземних вод (Черевко, 2016).

Водоносний горизонт делювіально-зсувних відкладів поширений уздовж схилів плато в смузі завширшки приблизно 100–300 м. Водовмісними є змішані піщано-глинисті ґрунти потужністю до 5–10 м. Глибина залягання рівня ґрунтових вод змінюється від 1 до 10 м, переважно становлячи 3–5 м, а річна амплітуда коливань, 0,5–1,3 м. На схилах Лаврського яру рівні ґрунтових вод зафіксовано на глибині 0,9–3,2 м від денної поверхні, за амплітуди коливань до 1,2–3,4 м (Hudak et al., 2020).

У верхніх частинах схилів водотривом слугують бурі та строкаті глини, у середніх, глинисті різновиди делювіально-зсувних відкладів, а в нижніх, мергельні глини київської світи. Живлення горизонту здійснюється за рахунок

розвантаження вод плато, атмосферних опадів і техногенних витоків. У нижніх частинах схилів він гідравлічно пов’язаний із водоносним горизонтом харківських пісків (Демчишин, Кріль та Анацький, 2014; Комплексний моніторинг, 2015).

Багаторічні режимні спостереження засвідчили циклічний характер природних коливань рівнів ґрунтових вод і значний вплив техногенних надходжень (рис. 3.3). Основними чинниками порушення водного режиму є концентрація поверхневого стоку, витоки з водонесучих комунікацій, притік із прилеглої міської забудови та зміна умов дренування (Hudak et al., 2021). На території Верхньої лаври найвищі абсолютні відмітки рівнів ґрунтових вод становлять приблизно 178–181 м. Для Нижньої лаври характерні сезонні коливання з максимальними рівнями у весняний період та річною амплітудою переважно 0,4–1,5 м.

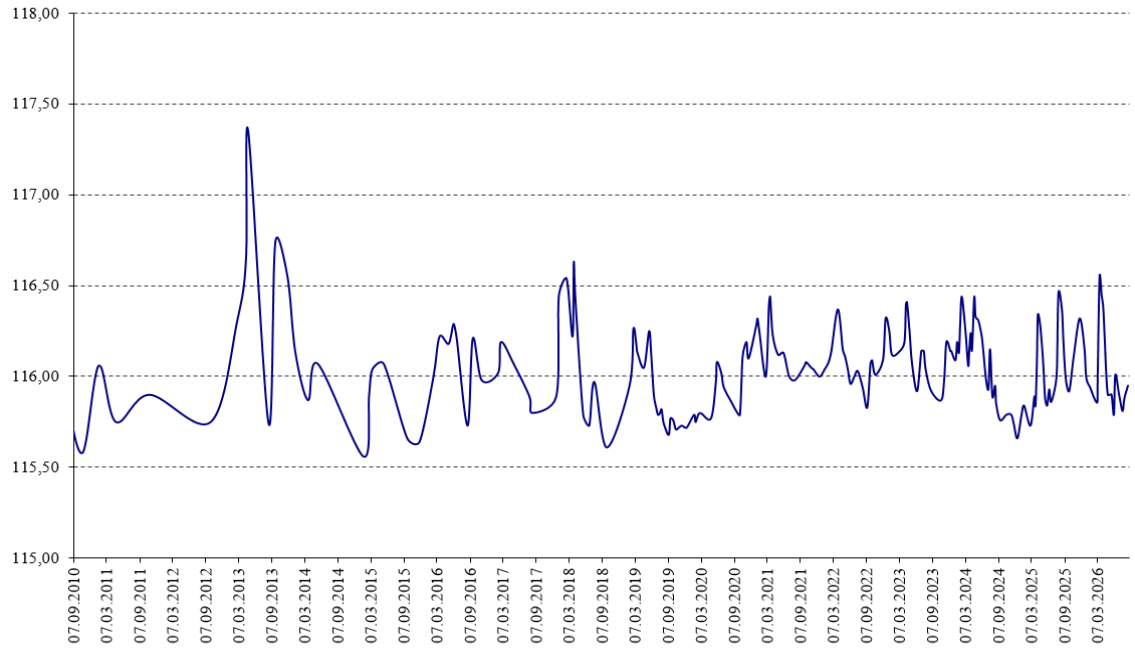


Рис. 3.3. Графік коливань рівня ґрунтових вод у свердловині № 403 за період 2020–2026 рр.

Гідрохімічний склад підземних вод відображає як природні умови водообміну, так і техногенний вплив. Для четвертинного горизонту характерні переважно гідрокарбонатно-кальцієві води з мінералізацією 0,3–2,0 г/л, а для вод делювіально-зсувних відкладів, більш мінливий гідрокарбонатно-сульфатний

кальцієво-магнієвий склад із мінералізацією до 4,0 г/л (Комплексний моніторинг, 2015). Підвищені концентрації нітратів та амонійних сполук на окремих ділянках можуть свідчити про вплив інженерної інфраструктури й господарського освоєння.

Поєднання значних перепадів рельєфу, неглибокого залягання ґрунтових вод на схилах, нерівномірної водопроникності відкладів і техногенного живлення зумовлює складну просторову структуру гідрогеологічного режиму. Локальні підйоми рівнів і формування верховодки створюють умови для перезволоження лесових і делювіально-зсувних ґрунтів, розвитку суфозійно-просадкових явищ та активізації схилових деформацій.

3.1.3. Підземні споруди, історична забудова та техногенне навантаження

Ключовими підземними об’єктами території є Ближні та Дальні печери, лабіринти яких створено у слабколітифікованих неогенових відкладах на глибині переважно 2–8 м від денної поверхні. Неглибоке залягання, неоднорідність піщаних порід і локальне обводнення зумовлюють чутливість підземних виробок до інфільтрації атмосферних опадів, коливань рівнів ґрунтових вод і суфозійного винесення матеріалу. Стан печерних комплексів значною мірою залежить від гідрогеологічного режиму території та умов фільтрації в навколишньому ґрунтовому масиві (Рибін та ін., 2001; Demchyshyn & Kril, 2024).

Важливим елементом історичної забудови є оборонна стіна навколо печер загальною довжиною 1039 м. Її траса проходить ділянками з абсолютними відмітками поверхні від 116 до 187 м, різним складом ґрунтів основи та неоднаковими умовами залягання ґрунтових вод. Просторова неоднорідність інженерно-геологічних умов створює передумови для нерівномірних осідань фундаментів і деформування конструкцій (Cherevko, Kril, & Stanisz, 2026).

Історична забудова Нижньої лаври функціонує у взаємозв’язку із системою підземного водовідведення. Навколо фундаментів окремих будівель у XIX ст. було споруджено цегляні дренажні галереї, призначені для перехоплення

й відведення підземних вод. Їх тривала експлуатація сприяла регулюванню гідрогеологічного режиму та захисту споруд від перезволоження. Водночас часткове порушення історичної дренажної системи внаслідок реконструкцій і перебудов знизило ефективність водовідведення на окремих ділянках (Hudak et al., 2021; Cherevko et al., 2024).

Суттєвий вплив на геологічне середовище чинять водопровідні, каналізаційні й теплові мережі. Аварійні витоки можуть спричиняти локальне підвищення рівнів ґрунтових вод, формування верховодки та перезволоження ґрунтового масиву (рис. 3.4). Підземні споруди, заглиблені фундаменти, підпірні стіни та інші конструкції додатково змінюють природні шляхи фільтрації, утворюючи локальні бар'єри для підземного стоку й ділянки його концентрації. Виникнення баражного ефекту залежить від конфігурації споруд, глибини їх закладання та співвідношення з водоносними й водотривкими горизонтами (Костюченко, 2008; Cherevko et al., 2024).



Рис. 3.4. Основні чинники техногенного навантаження на геологічне середовище території Заповідника та їх наслідки

Додаткову групу техногенних впливів формують динамічні навантаження, пов'язані з воєнними подіями. Починаючи з 2022 р. на території Заповідника

фіксується вплив ударних хвиль і падіння уламків, що зумовлює необхідність посиленого інструментального контролю стану історичних споруд і підземних виробок (Бугай та ін., 2023). Водночас встановлення зв'язку між виявленими деформаціями та такими впливами потребує зіставлення з даними про технічний стан конструкцій, гідрогеологічний режим та попередню динаміку зміщень.

Підземні споруди, історична забудова, інженерні мережі та системи водовідведення формують просторово неоднорідне техногенне навантаження на геологічне середовище. У межах оцінювання геологічної нестійкості ці характеристики представлено показниками навантаження забудови, поширення підземних споруд, наявності та щільності інженерних мереж, а також ефективності й просторового впливу глибоких і мілких дренажних систем.

3.2. Прояви екзогенних геологічних процесів та система моніторингу території

Поєднання природних передумов і техногенних впливів зумовлює розвиток на території Києво-Печерської лаври підтоплення, суфозійно-просадкових явищ, схилових деформацій та пов'язаних із ними пошкоджень наземних і підземних споруд. Характеристику сучасного стану геологічного середовища сформовано за матеріалами багаторічних наземних, інструментальних і дистанційних спостережень.

3.2.1. Прояви екзогенних геологічних процесів та чинники їх розвитку

На території Заповідника задокументовано схилові, суфозійно-просадкові та гідрогеологічні процеси, а також пов'язані з ними деформації земної поверхні, підземних виробок і нерухомих пам'яток. Їх просторове поширення визначається геологічною будовою, рельєфом, гідрогеологічним режимом та особливостями інженерного освоєння території.

Схилові процеси приурочені переважно до схилів долини Дніпра та Лаврського яру. Одним із основних чинників їх активізації є порушення режиму зволоження ґрунтового масиву. Наприклад, після аварій водогону поблизу корпусу № 35 у 1995 і 1998 рр. у саду над Ближніми печерами спостерігався вихід

підземних вод у вигляді джерел, що супроводжувався розвитком зсувів об'ємом до 100 м^3 у кожному випадку (Kril & Cherevko, 2023).

Суфозійно-просадкові процеси проявляються у вигляді локальних провалів і просідань, пов'язаних із винесенням дрібнодисперсного матеріалу, перезволоженням і деформуванням просадкових ґрунтів. Задокументовано численні прояви провалів і деформацій земної поверхні (рис. 3.5). Яскравим прикладом є зафіксований провал об'ємом близько 25 м^3 у тальвезі Лаврського яру поблизу корпусу № 99.



а ***б***

Рис. 3.5. Приклади проявів суфозійно-просадкових процесів: *а, б – провали та деформації земної поверхні на території Києво-Печерської лаври у 2022–2023 рр. (фото Черевко І.)*

Зміни гідрогеологічного режиму на території Заповідника мають сезонне й техногенно зумовлене походження. Природні коливання зазвичай характеризуються весняним підвищенням рівнів ґрунтових вод на 0,5–1,5 м. Значно більші зміни зафіксовано внаслідок аварій на водонесучих комунікаціях. Наприклад, аварія теплової мережі на Економічному подвір'ї Верхньої лаври у 1994 р. спричинила локальне підвищення рівнів ґрунтових вод на 4,6 м, а аварії водопровідних мереж упродовж 1998 – 2008 рр., на 1,5–2,4 м (Cherevko et al., 2024). Найбільш несприятливі гідрогеологічні умови характерні для Ближньопечерного й Дальньопечерного пагорбів, верхів'я Лаврського яру та території Гостинного двору (Demchyshyn, Kril & Cherevko, 2017).

Зміни стану геологічного середовища відображаються в деформаціях підземних і наземних об’єктів. У печерних комплексах зафіксовано обвал вхідної галереї Ближніх печер у 1988 р., вивал ґрунту об’ємом до 10 м^3 у 2005 р. та обрушення склепіння з вивалом 2–3 м^3 поблизу Дальніх печер у 2013 р. (Черевко, 2014). Для наземних споруд характерні нерівномірні осідання фундаментів і тріщини в несучих конструкціях. У корпусі № 5 зафіксовано наскрізну тріщину з розкриттям до 5 см, у галереї до Ближніх печер, тріщини завдовжки до 4–5 м, а на окремих ділянках оборонної стіни, деформації, пов’язані з нерівномірним осіданням основи (Cherevko, Kril, & Stanisz, 2026).

Наведені матеріали свідчать, що оцінювання стану території потребує спільного врахування гідрогеологічних змін, фактичних проявів процесів і деформацій інженерних об’єктів (Demchyshyn & Kril, 2024). Відповідні дані використано для характеристики сучасного стану геологічного середовища та формування моніторингових ознак геологічної нестійкості.

3.2.2. Мережа наземних спостережень і накопичені моніторингові дані

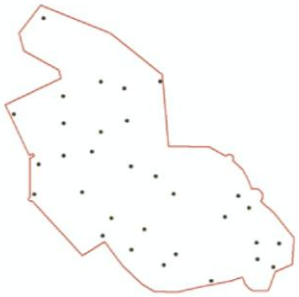
Фактологічну основу оцінювання сучасного стану геологічного середовища становлять результати багаторічних гідрогеологічних, геодезичних, геофізичних та інших інструментальних спостережень. Моніторингові мережі формувалися поетапно з урахуванням просторового поширення проблемних ділянок і необхідності контролю стану нерухомих пам’яток.

Найбільш тривалим джерелом інформації є режимні спостереження за рівнями ґрунтових вод. Мережа охоплює свердловини в межах Верхньої й Нижньої лаври, прилеглих схилів, Гостинного двору та саду над Ближніми печерами (рис. 3.6). Найбільша щільність пунктів спостережень характерна для ділянок із порушеним водним режимом, де також функціонує автоматизована система гідрогеологічного моніторингу (Скальський та ін., 2007; Черевко та ін., 2022).

Для окремих свердловин сформовано часові ряди тривалістю понад тридцять років. Їх повнота залежить від часу спорудження свердловин,

періодичності вимірювань, технічного стану пунктів спостережень і наявності пропусків у даних (Черевко та ін., 2022). Накопичені матеріали відображають сезонні та багаторічні коливання рівнів ґрунтових вод, а також зміни гідрогеологічного режиму, пов’язані з аварійними витоками й порушеннями умов водовідведення. У дослідженні часові ряди використано для характеристики типового гідрогеологічного стану, спрямованості довготривалих змін і діапазону коливань. Для кожного аналізованого періоду визначено середню абсолютну відмітку рівня ґрунтових вод, коефіцієнт лінійного тренду та амплітуду коливань.





Table

points_w

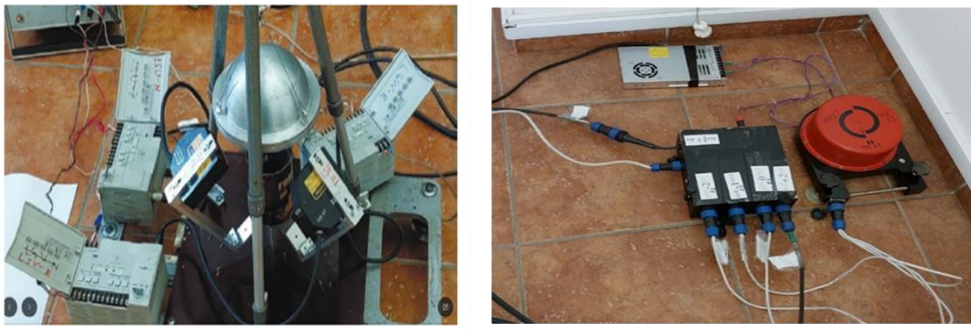
OBJECTID *	Shape *	OBJECTID *	FCName	24#12#1990	23#12#1991	27#12#1992	27#12#1993
1	Point	1	w1	12,68	12,47	12,24	
2	Point	2	w101	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
3	Point	3	w102	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
4	Point	4	w103	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
5	Point	5	w104	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
6	Point	6	w105	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
7	Point	7	w106	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
8	Point	8	w107	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
9	Point	9	w108	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
10	Point	10	w109	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
11	Point	11	w11	2,5	2,08	2,19	
12	Point	12	w12	5,49	5,29	5,62	
13	Point	13	w13	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
14	Point	14	w136a	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
15	Point	15	w14	4,49	4,47	4,41	
16	Point	16	w15	3,14	3,1	3,17	
17	Point	17	w16	4,94	4,72	5,11	
18	Point	18	w19	2,89	2,3	2,56	
19	Point	19	w2	11,81	11,71	11,35	
20	Point	20	w25	<Null>	5,12	5,12	
21	Point	21	w252	4,57	4,14	4,23	
22	Point	22	w257	3,35	3,27	3,31	
23	Point	23	w28	2,75	2,95	5,78	
24	Point	24	w3	16,52	16,75	16,36	
25	Point	25	w4	17,81	17,85	17,71	
26	Point	26	w403	3,59	3,58	3,53	
27	Point	27	w5	13,67	13,57	12,97	
28	Point	28	w6	17,03	17,06	16,82	
29	Point	29	w7	17,64	17,54	17,55	
30	Point	30	w8	3,8	3,77	7,63	
31	Point	31	w9	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>

Рис. 3.6. Мережа режимних спостережень за рівнями ґрунтових вод на території Києво-Печерської лаври: розташування спостережних свердловин та витяг атрибутивної інформації з багаторічними рядами вимірювань

Контроль деформацій наземних споруд здійснюється за результатами високоточного нівелювання реперів, закладених на історичних будівлях, підпірних спорудах і оборонній стіні, а також спостережень за розкриттям тріщин. Отримані матеріали характеризують вертикальні переміщення, нерівномірні осідання та зміни технічного стану конструкцій. Результати інтерпретують з урахуванням коливань рівнів ґрунтових вод, перезволоження

ґрунтової основи та тривалих деформацій глинистих ґрунтів (Cherevko et al., 2024).

Геодезичний контроль доповнено автоматизованими системами моніторингу технічного стану пам’яток (рис. 3.7). До складу таких систем входять нахиломіри, акселерометри, магнітометричні датчики, GNSS-приймачі та сейсмоакустичні сенсори. Обладнання забезпечує реєстрацію нахилів, зміщень конструктивних елементів і реакції споруд на динамічні впливи. За результатами спостережень визначено власні частоти коливань окремих об’єктів та отримано дані для оцінювання змін їхнього технічного стану (Комплексне дослідження, 2023; Бугай та ін., 2024).



а ***б***

Рис. 3.7. Елементи автоматизованої системи моніторингу структурного стану будівель Національного заповідника «Києво-Печерська лавра*»: а – загальна схема 3D лазерного інклінометра; б – розміщення акселерометра у приміщенні будівлі К-3 (за Бугай та ін., 2024)*

Геофізичні дослідження на території Києво-Печерської лаври мають переважно локальний і періодичний характер та виконуються для розв’язання конкретних інженерно-геологічних завдань. Електророзвідувальні методи застосовували для виявлення водонасичених і розущільнених зон, а георадарне профілювання використовували для локалізації неглибоких меж, підземних споруд, порожнин і ділянок порушеної будови ґрунтового масиву. У районі саду над Ближніми печерами за результатами геофізичних досліджень установлено ділянки підвищеного зволоження, ослаблені зони та переважні напрями міграції

підземних вод (Левашов, Піщаний та Корчагін, 2005; 2008; Черевко, Кріль та Безродний, 2024).

Оскільки геофізичні аномалії можуть мати різне походження, їх інтерпретація потребує зіставлення з матеріалами буріння, інженерно-геологічними розрізами, даними гідрогеологічного моніторингу та відомостями про стан водонесучих мереж. Комплексне використання цих матеріалів дає змогу уточнювати внутрішню будову геологічного середовища, просторове положення водонасичених і розущільнених зон та особливості фільтрації підземних вод (Черевко, Кріль та Безродний, 2024).

Гідрогеологічні дані характеризують часову мінливість водного режиму, геодезичні й автоматизовані спостереження відображають деформаційний і технічний стан споруд, а геофізичні дослідження деталізують внутрішню неоднорідність ґрунтового масиву. Сукупність цих матеріалів забезпечує багаторівневу характеристику стану геологічного середовища та формує фактологічну основу його просторового оцінювання. Режимні гідрогеологічні й деформаційні характеристики надалі використано для формування відповідних ознак геопросторового набору даних.

3.2.3. Супутникові дані та результати дистанційних спостережень території

Дистанційні спостереження доповнюють наземний моніторинг просторово неперервною інформацією про стан земної поверхні та її зміни. У дослідженні використано дві групи супутникових матеріалів із різним функціональним призначенням: багатоспектральні зображення Landsat і Sentinel-2 та результати багаточасової супутникової радарної інтерферометрії. Багатоспектральні дані застосовано для виявлення просторових відхилень у характеристиках земної поверхні, тоді як інтерферометричні матеріали використано як незалежне джерело інформації про зміщення земної поверхні та нерухомих об’єктів.

Оптичну складову дослідження сформовано за різночасовими зображеннями Landsat-5, Landsat-8, Landsat-9 і Sentinel-2, характеристики

репрезентативної вибірки яких наведено в табл. 3.1. Архівне зображення Landsat-5 за 1985 р. використано для ретроспективного аналізу стану території, а матеріали Landsat-8, Landsat-9 і Sentinel-2 за 2025 р. для характеристики сучасного стану земної поверхні. Зображення рівня обробки Level-2 містять значення відбиття поверхні після атмосферної корекції. Попереднє опрацювання передбачало маскування хмар, узгодження просторового охоплення та формування композитних зображень у середовищі Google Earth Engine (Орленко, 2024; Hudak, 2024; Marhes et al., 2025).

Таблиця 3.1 – Характеристики репрезентативної вибірки супутникових знімків Landsat і Sentinel-2

Сенсор	**Дата зйомки**	**Характеристика знімка**
Landsat-5	25.08.1985	LT05_181025_19850825 (Collection 2, Level-2)
Landsat-8	06.07.2025	LC08_181025_20250706 (Collection 2, Level-2)
Landsat-9	15.08.2025	LC09_181025_20250815 (Collection 2, Level-2)
Sentinel-2	10–20.08.2025	усереднений композит (Harmonized L2A), частка хмарних пікселів < 2 %

Різночасові зображення використано для аналізу характеристик рослинного покриву, умов зволоження, відкритого ґрунту та інших властивостей земної поверхні. Для цього обчислено спектральні показники, чутливі до стану рослинності й вмісту вологи. Просторово локалізовані нетипові значення цих показників розглядали як потенційні геопросторові аномалії, що можуть бути пов’язані з перезволоженням, трансформацією рослинного покриву або іншими змінами стану поверхні. Приклади використаних супутникових матеріалів, похідних спектральних показників і локалізованих відхилень наведено на рис. 3.8.

З огляду на просторову роздільну здатність Landsat і Sentinel-2 отримані результати характеризують зональні зміни земної поверхні, а не окремі локальні провали, тріщини чи деформації. Просторова деталізація виявлених відхилень визначається фактичною роздільною здатністю відповідного супутникового матеріалу. Тому такі відхилення використовували як індикативні просторові

характеристики, що потребують зіставлення з геологічними, гідрогеологічними та наземними спостереженнями.

Виявлені за багатоспектральними даними відхилення не розглядали як безпосереднє підтвердження конкретного екзогенного геологічного процесу. Їх інтерпретацію здійснювали з урахуванням геологічної будови, гідрогеологічних умов, характеру земного покриву, сезонності знімання та наявних наземних матеріалів. Після статистичного виявлення нетипових значень просторового об'єднання суміжних елементів сформовано тематичний шар геопросторових аномалій земної поверхні.

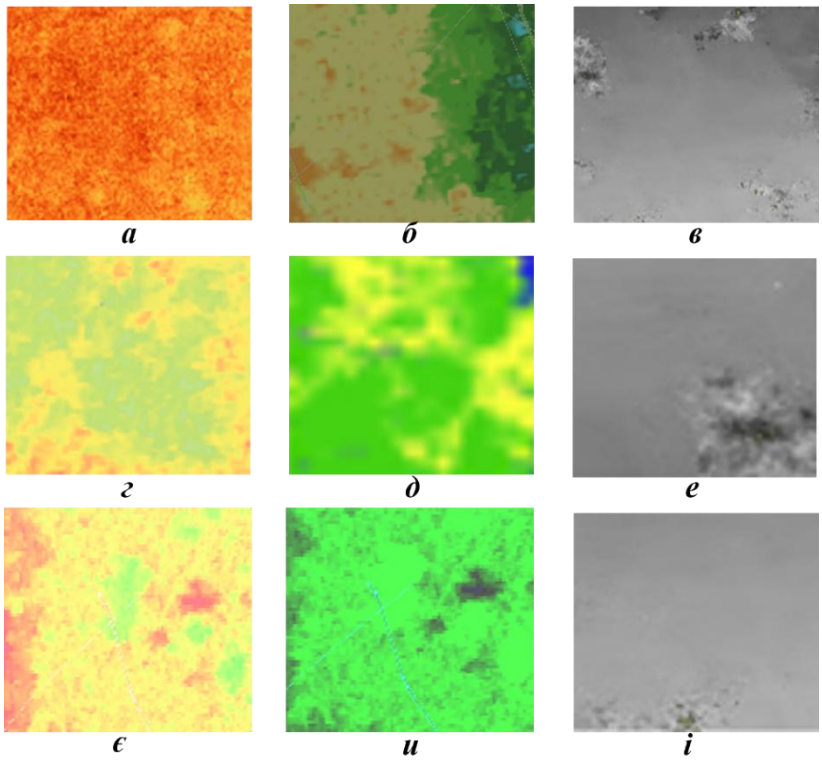


Рис. 3.8. Супутникові матеріали та похідні спектральні показники, використані для формування тематичного шару геопросторових аномалій:
а–в – результати опрацювання знімка Landsat-5 від 25.08.1985;
г–е – результати опрацювання знімка Landsat-8 від 06.07.2025; є–і – результати опрацювання сучасних матеріалів Landsat-9 від 15.08.2025 та усередненого композита Sentinel-2 за 10–20.08.2025; а, г, є – спектральні представлення стану земної поверхні; б, д, и – похідні показники стану рослинного покриву та умов зволоження; в, е, і – просторово локалізовані відхилення, враховані під час виділення аномальних зон

Отриманий тематичний шар надалі приведено до структури геопросторового набору даних і використано для представлення просторово локалізованих дистанційно виявлених змін. При цьому виділені аномальні зони не визначають вид або причину геологічного процесу, а вказують на ділянки, що потребують комплексної змістової інтерпретації (див. підрозділ 3.3.2).

Другу групу дистанційних матеріалів становлять результати диференціальної супутникової радарної інтерферометрії D-InSAR, отримані за парами радіолокаційних знімків Sentinel-1A. Метод D-InSAR ґрунтується на аналізі різниці фаз радіолокаційного сигналу між двома датами знімання та дає змогу визначати зміни положення земної поверхні, що відбулися протягом відповідного часового інтервалу. Вилучення топографічної складової інтерферометричної фази забезпечує формування карт просторового розподілу зміщень земної поверхні (Hudak, 2024).

Для досліджуваних ділянок території м. Києва побудовано карти вертикальної складової зміщень земної поверхні за трьома послідовними часовими інтервалами: березень–жовтень 2022 р., жовтень–грудень 2022 р. та грудень 2022 р. – березень 2023 р. (Hudak, Kril, & Zatserkovnyi, 2025). Використання кількох пар зображень дало змогу зіставити просторовий розподіл зміщень у різні періоди та визначити ділянки з повторюваними або змінними деформаційними проявами. Карти відображають просторову неоднорідність зміщень у межах досліджуваних ділянок і дають змогу локалізувати території, що потребують зіставлення з геологічними, гідрогеологічними та наземними матеріалами (рис. 3.9).

Інтерпретація результатів D-InSAR потребує врахування геометрії радіолокаційного знімання, просторової когерентності поверхні, атмосферного впливу та можливих похибок фазового опрацювання (Hudak, 2024; Hudak, Kril, & Zatserkovnyi, 2025). Визначені зміщення характеризують зміну положення земної поверхні між датами відповідної пари знімків, проте не встановлюють причин деформації. Такі зміни можуть бути зумовлені коливаннями рівнів ґрунтових вод, просіданням або ущільненням ґрунтів, станом підземних споруд,

характером забудови та іншими природними чи техногенними чинниками. Тому результати інтерферометричного аналізу інтерпретували у взаємозв'язку з даними наземних спостережень і характеристиками геологічного середовища.

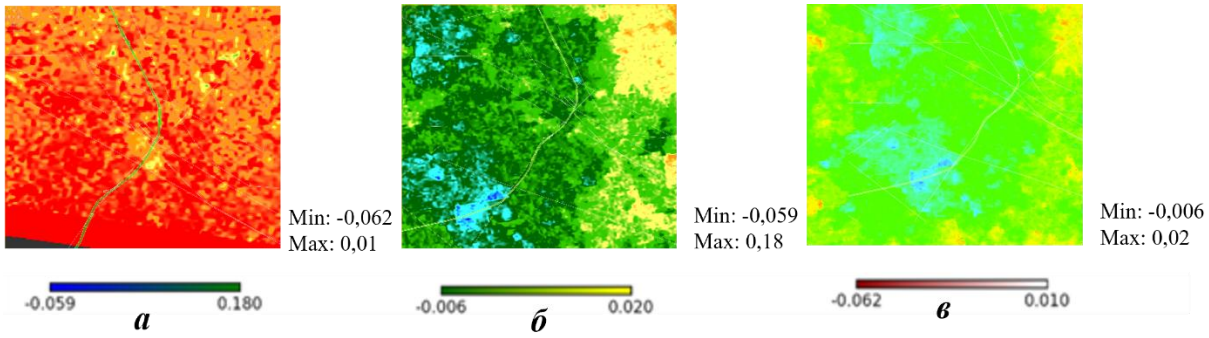


Рис. 3.9. Карти вертикальних зміщень земної поверхні на досліджуваних ділянках території м. Києва, побудовані методом D-InSAR за парами знімків Sentinel-1A (Hudak, Kril & Zatserkovnyi, 2025): *а – березень–жовтень 2022 р.; б – жовтень–грудень 2022 р.; в – грудень 2022 р. – березень 2023 р.*

Результати D-InSAR не включали до набору ознак, використаного для навчання нейромережевої моделі. Їх залучали як незалежне джерело просторової інформації для зіставлення модельних класів геологічної нестійкості з дистанційно визначеними зміщеннями земної поверхні. Просторовий збіг ділянок підвищеної геологічної нестійкості з установленими зміщеннями розглядаэться як додаткове підтвердження узгодженості результатів моделювання з фактичними змінами земної поверхні.

Отже, дві групи супутникових матеріалів виконували різні функції. Багатоспектральні зображення Landsat і Sentinel-2 використовували для формування тематичного шару геопросторових аномалій, представленого у вхідному наборі даних ознакою *Anomaly*. Результати D-InSAR застосовували незалежно від процедури навчання моделі для зіставлення з просторовим розподілом сформованих класів геологічної нестійкості.

3.3. Формування вихідної інформаційної основи дослідження

Оцінювання геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври потребує інтегрування просторових і часових даних про природні й техногенні

умови, гідрогеологічний режим, деформаційний стан і зміни земної поверхні. Інформаційну основу сформовано за матеріалами геоінформаційної бази «LAVRA-GEO», режимних спостережень, дистанційного зондування Землі, інженерно-геологічних і геофізичних досліджень та моніторингу нерухомих пам’яток.

3.3.1. Вибірка з «LAVRA-GEO» та геопросторові дані попередніх досліджень

Основним джерелом вихідної просторової інформації є геоінформаційна база «LAVRA-GEO», створена відділом інженерної геології Інституту геологічних наук НАН України для накопичення, систематизації та аналізу даних про геологічне середовище території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра». У дослідженні використано адаптовану вибірку з бази, що містить відомості про природні й техногенні умови формування геологічної нестійкості. Методичні засади побудови «LAVRA-GEO» та результати її застосування для оцінювання інженерно-геологічного стану території наведено у працях розробників і матеріалах комплексного моніторингу Киэво-Печерськоъ лаври (Бугай та ін., 2023; Kril, Shekhunova, & Cherevko, 2023; Комплексне дослідження, 2023).

В основу геоінформаційної бази «LAVRA-GEO» покладено представлення території Заповідника як природно-техногенної системи, стан якої визначається взаємодією геологічних, геоморфологічних, гідрогеологічних і техногенних чинників. Такий підхід забезпечує спільне представлення природних передумов розвитку екзогенних геологічних процесів, особливостей історичної забудови, поширення підземних споруд та інженерної інфраструктури.

Базу реалізовано в середовищі ArcGIS із використанням реляційної моделі організації даних, у якій просторові об’єкти пов’язані зі структурованою атрибутивною інформацією. Просторовою основою є регулярна сітка з розміром елементарної просторової одиниці 5×5 м. Така деталізація дає змогу відображати

просторову неоднорідність забудови, підземних споруд, інженерних мереж і локальних проявів небезпечних процесів у межах усієї досліджуваної території.

Тематичні матеріали «LAVRA-GEO» об'єднано у природний і техногенний блоки. Природний блок містить характеристики рельєфу, геологічної будови, літологічного складу й фізико-механічних властивостей ґрунтів, гідрогеологічних умов та поширення небезпечних інженерно-геологічних процесів. Техногенний блок охоплює відомості про забудову, печерні комплекси й інші підземні споруди, інженерні комунікації, дренажні системи та зафіксовані порушення водного режиму (Kril, Shekhunova, & Cherevko, 2023; Бугай та ін., 2024).

Окрему складову інформаційної основи становлять результати режимних гідрогеологічних спостережень за період 1990 – 2025 рр. Накопичені часові ряди характеризують сезонні й багаторічні коливання рівнів ґрунтових вод, а також зміни, пов'язані з техногенними впливами та аварійними порушеннями водного режиму. На відміну від статичного факторного шару глибини залягання ґрунтових вод, дані режимних спостережень грунтових вод відображають типовий стан і часову мінливість гідрогеологічного режиму.

Дистанційну складову інформаційної основи сформовано за різночасовими багатоспектральними зображеннями Landsat і Sentinel-2. За результатами їх статистичного опрацювання визначено просторово локалізовані зміни спектральних характеристик земної поверхні та сформовано ознаку, що відображає належність елементарної просторової одиниці до виявленої аномальної зони. Ця ознака використовується як індикативна характеристика сучасних змін стану поверхні й не визначає безпосередньо вид геологічного процесу.

Вихідні матеріали доповнено топографічними планами, цифровими моделями рельєфу, результатами інженерно-геологічних вишукувань, геофізичних досліджень та спостережень за станом нерухомих пам'яток. Геофізичними роботами в районі саду над Ближніми печерами встановлено ділянки підвищеного зволоження й переважні напрями міграції підземних вод

(Левашов, Піщаний та Корчагін, 2008; Черевко, 2014). Матеріали гідрогеологічних, геодезичних та інструментальних спостережень використано для характеристики водного режиму, деформаційного стану споруд і сучасних змін геологічного середовища (Черевко та Куциба, 2011; Demchyshyn & Kril, 2024; Kril et al., 2024).

Сформована вихідна інформаційна основа охоплює факторні, режимні, деформаційні та дистанційні дані, що характеризують природні й техногенні передумови розвитку екзогенних геологічних процесів, сучасний стан геологічного середовища та його часову мінливість. Основні джерела інформації й послідовність формування просторового набору ознак узагальнено (рис. 3.10).

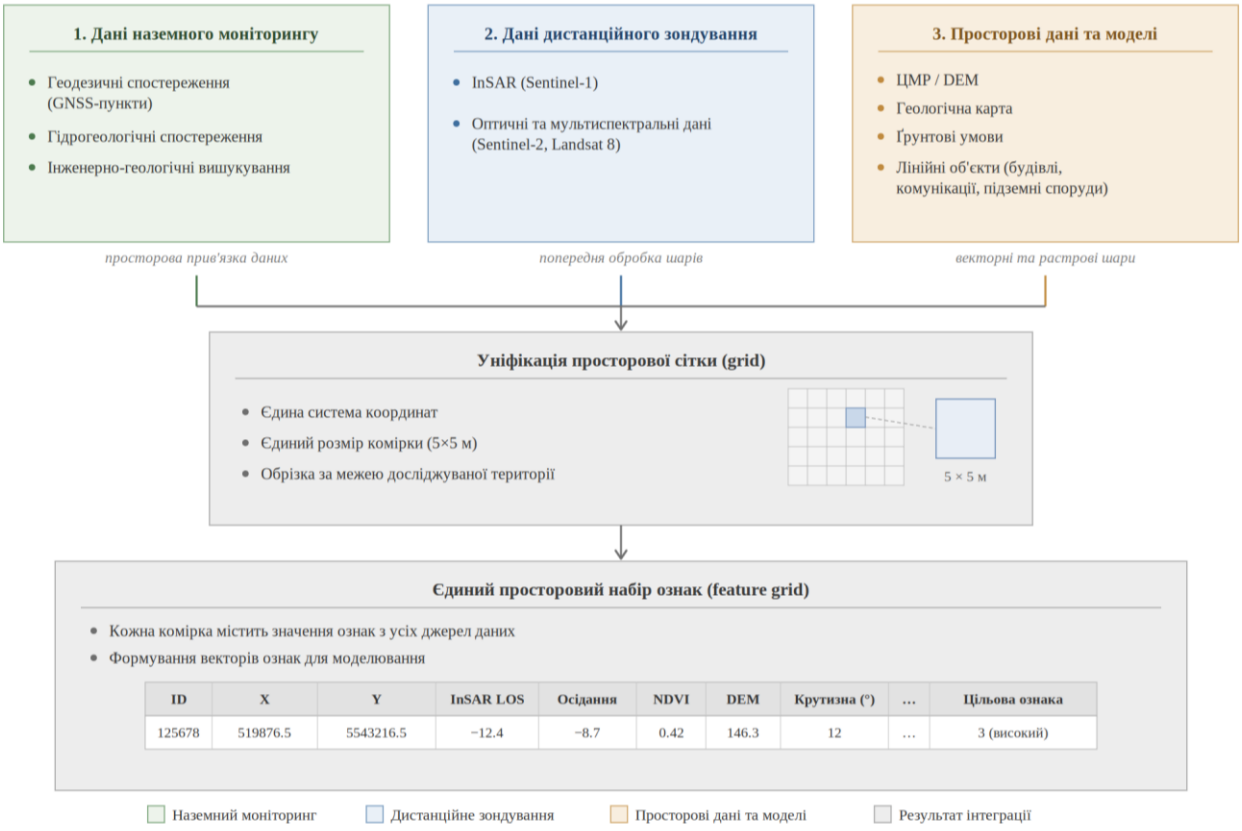


Рис. 3.10. Схема формування уніфікованого просторового набору ознак із даних геоінформаційної бази «LAVRA-GEO», режимних гідрогеологічних спостережень та дистанційного зондування Землі

3.3.2. Просторово-часове узгодження та формування набору ознак

Залучені до дослідження матеріали відрізняються за способом просторового представлення, часовим охопленням, роздільною здатністю та форматом зберігання. Геоінформаційна база «LAVRA-GEO» містить переважно векторні тематичні шари природних і техногенних характеристик території, режимні гідрогеологічні спостереження представлені часовими рядами вимірювань у дискретній мережі свердловин, а результати дистанційного зондування Землі мають растрову структуру. Їх спільне використання потребує просторового й часового узгодження та приведення до єдиної структури подання.

Просторовою основою інтегрування даних є регулярна сітка з розміром елементарної просторової одиниці 5 × 5 м, успадкована зі структури «LAVRA-GEO». Для кожної комірки сформовано впорядкований набір природних, техногенних, гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних характеристик. Така організація забезпечує сумісність різнорідних матеріалів, збереження взаємного просторового положення ознак і формування єдиного масиву даних для подальшого аналізу та моделювання.

Просторове узгодження тематичних матеріалів

Усі просторові матеріали приведено до єдиної системи координат, меж досліджуваної території та узгодженого порядку розташування елементів регулярної сітки. Векторні тематичні шари перетворено на растрове представлення відповідно до типу їхніх атрибутивних даних.

Для бінарних шарів використано правило:

$$\mathbf{R(i,j)} = \begin{cases} \mathbf{1}, \text{якщо об'єкт або властивість наявні,} \\ \mathbf{0}, \text{якщо об'єкт або властивість відсутні,} \end{cases}, \qquad (3.1)$$

де $R(i,j)$ – значення растрової комірки з координатами i, j.

Для категорійних шарів комірці присвоювали клас, що займав найбільшу частку її площі. Якщо в межах однієї комірки було представлено кілька категорій, переважальний клас визначався за співвідношенням площ їх

просторового перекриття. Такий підхід забезпечив узгоджене представлення природних і техногенних факторів у межах єдиної сіткової структури.

Багатоспектральні матеріали Landsat і Sentinel-2 попередньо перепроєктовано до системи координат дослідження та узгоджено за межами просторового охоплення. Їх статистичне опрацювання виконано з урахуванням вихідної просторової роздільної здатності, яка становила 30 м для використаних каналів Landsat і 10–20 м для Sentinel-2 залежно від спектрального каналу.

Методи штучного підвищення просторової роздільної здатності, надроздільного відновлення або реконструювання дрібніших просторових деталей не застосовувалися. Тому використання сітки 5×5 м не означає одержання супутникових даних із фактичною роздільною здатністю 5 м. Розмір комірки визначає лише структуру інтегрованого набору даних, тоді як змістова деталізація дистанційних показників залишається обмеженою характеристиками вихідних зображень.

Геопросторові аномалії визначено у вихідній растровій структурі дистанційних матеріалів. Після статистичного виділення нетипових значень сформовано бінарну растрову маску аномальних зон, яку просторово узгоджено з регулярною сіткою геопросторової бази даних. Для кожної комірки визначено її належність до виявленої аномальної зони.

Сформована дистанційна характеристика має зональний характер і відображає належність комірки до аномальної ділянки, виявленої за багатоспектральними даними. Вона не свідчить про наявність у межах окремої комірки локального провалу, тріщини або іншої деформації такого самого розміру. Сітка забезпечує просторове узгодження тематичного шару аномальних зон з іншими даними, але не підвищує фактичної деталізації дистанційних спостережень.

Просторово-часове опрацювання гідрогеологічних даних

Режимні спостереження за рівнями ґрунтових вод мають дискретне просторове представлення, оскільки виконувалися в окремих свердловинах. Для аналізованих часових зрізів за результатами фактичних вимірювань сформовано

неперервні поверхні абсолютних відміток рівня ґрунтових вод методом сплайн-інтерполяції. Вибір методу зумовлений необхідністю відтворення неперервного гідрогеологічного поля за дискретними спостереженнями та переважно плавним характером зміни рівнів у межах окремих гідрогеологічних зон (Черевко та ін., 2022; Hudak & Kril, 2025a).

Отримані інтерполяційні поверхні приведено до регулярної сітки. Для кожної елементарної просторової одиниці на основі різночасових значень сформовано три взаємодоповнювальні характеристики:

- середню абсолютну відмітку рівня ґрунтових вод;
- коефіцієнт лінійного тренду;
- амплітуду коливань.

Середнє значення характеризує типовий гідрогеологічний стан протягом аналізованого періоду. Коефіцієнт тренду відображає напрям і середню швидкість довготривалої зміни рівня ґрунтових вод. Амплітуда визначає діапазон його часової мінливості. Такий спосіб представлення дає змогу врахувати не лише просторовий стан гідрогеологічного поля, а й характер його багаторічних змін.

Градація факторів геологічної нестійкості

За матеріалами «LAVRA-GEO» сформовано систему факторів, що характеризують природні й техногенні умови розвитку небезпечних геологічних процесів. Їх склад визначено з урахуванням структури вихідної бази, результатів багаторічних інженерно-геологічних досліджень та встановлених закономірностей розвитку екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври (Демчишин, 2004; Kril, Shekhunova, & Cherevko, 2023; Kril et al., 2024).

Фактори представлено у трирівневій баловій шкалі, прийнятій у методиці «LAVRA-GEO» (Комплексне дослідження, 2023). Значення 1 бал відповідає відносно сприятливим умовам, 2 бали характеризують проміжний стан, а 3 бали відповідають найбільш несприятливим умовам функціонування геологічного середовища. Система охоплює одинадцять природних факторів F1–F11 і шість

техногенних факторів F12–F17 (табл. 3.2). Наведені градації відтворюють вихідну структуру «LAVRA-GEO» та використовуються в роботі як початкове категорійне представлення факторів. Їх змістове трактування залежить від фізичної сутності відповідного показника.

Таблиця 3.2 – Критерії градації факторів оцінювання геологічної нестійкості території

Група	Фактор	1 бал	2 бали	3 бали
Природні	F1. Тип рельєфу	рівнинні тераси, лесові плато	слабко нахилені поверхні	схили, схильні до зсувів
	F2. Морфометрія	нахил < 6°, слабка розчленованість	нахил 6–11°, помірна	нахил > 11°, значна
	F3. Неотектоніка	відсутні активні розломи	поблизу зон розломів	перетин активних розломів
	F4. Глибина ґрунтових вод	> 5 м	3–5 м	< 3 м
	F5. Літологія	щільні піски, тверді глини	пластичні глини, середні піски	делювіальні глини, просадкові ґрунти
	F6. Міцність ґрунтів, МПа	> 0,25	0,15–0,25	< 0,15
	F7. Потужність техногенних відкладів	< 1 м	1–3 м	> 3 м
	F8. Зсувні процеси	відсутні / стабілізовані	потенційні	активні
	F9. Підтоплення	вплив поверхневих вод	капілярне підняття	коливання РГВ
	F10. Просідання	відсутнє	I тип	II тип
	F11. Негативні форми рельєфу	відсутні	дрібні провали	значні провали
Техногенні	F12. Навантаження забудови	малоповерхова	середньоповерхова	багатоповерхова
	F13. Підземні споруди	відсутні	неглибокі підвали	печери / глибокі споруди
	F14. Інженерні мережі	холодне водопостачання	гаряче водопостачання	змішані мережі
	F15. Щільність мереж	< 0,08	0,08–0,28	> 0,28
	F16. Глибокі дренажні системи	висока ефективність	середня	низька ефективність
	F17. Мілкі дренажні системи	мала зона впливу	середня	значна зона впливу

Структура сформованої бази даних

У результаті просторово-часового узгодження сформовано геопросторовий набір даних, у якому кожен рядок відповідає елементарній просторовій одиниці, а кожен стовпець містить значення відповідної ознаки (табл. 3.3).

До складу вхідних даних включено:

- природні фактори F1–F11;
- техногенні фактори F12–F17;
- середнє значення, коефіцієнт лінійного тренду й амплітуду –ознаку «*GroundWater_level»*;
- ознаку «*Deformation»*;
- дистанційну ознаку «*Anomaly»*.

Ознака «*Deformation»* відображає наявність у межах елементарної просторової одиниці задокументованих деформацій земної поверхні або інженерних споруд за матеріалами геодезичних, інструментальних і технічних спостережень. Ознака «*Anomaly»* характеризує належність просторової одиниці до аномальної зони, виявленої за різночасовими багатоспектральними супутниковими даними.

Атрибутивну назву «*Risk*» успадковано зі структури вихідної бази. У дисертаційному дослідженні це поле використано лише як технічне позначення цільової змінної, що містить клас інтегральної геологічної нестійкості, сформований на основі факторів F1–F17. Поле «*Risk»* не є оцінкою геологічного ризику, оскільки не враховує експозицію, вразливість об’єктів і можливі втрати.

Таблиця 3.3 – Структура сформованої геопросторової бази даних

Група атрибутів	Склад	Джерело та роль
Природні фактори (F1–F11)	рельєф, морфометрія, неотектоніка, глибина РГВ, літологія, міцність ґрунтів, техногенні відклади, зсуви, підтоплення, просідання, негативні форми рельєфу	«LAVRA-GEO», ЦМР, інженерно-геологічні дані; базова природна схильність

Техногенні фактори (F12–F17)	навантаження забудови, підземні споруди, мережі та їх щільність, дренажні системи	обмірні/кадастрові плани, схеми комунікацій і дренажу; техногенний вплив
Динамічні шари	GroundWater_level, Deformation	середнє значення, тренд і амплітуда GroundWater_level; Deformation
Аномалії ДЗЗ	Anomaly	Landsat, Sentinel-2; вхідна ознака зональних аномалій стану поверхні
Цільова змінна	Risk	інтегральна оцінка нестійкості; мітка навчання моделі

Сформована база містить 22 вхідні ознаки: 17 природних і техногенних факторів, три характеристики гідрогеологічного режиму, одну ознаку деформаційного стану та одну дистанційну ознаку. Цільова змінна «*Risk*» до кількості вхідних ознак не належить. Така структура поєднує відносно сталі природно-техногенні умови з динамічними й дистанційно встановленими характеристиками стану геологічного середовища.

3.3.3. Статистична характеристика сформованого набору даних

Склад вхідних факторів F1–F17 визначено насамперед на основі класифікацій екзогенних геологічних процесів, розглянутих у теоретичній частині роботи, та встановлених закономірностей розвитку небезпечних процесів на території Києво-Печерської лаври (Hudak et al., 2021; Kril, Shekhunova, & Cherevko, 2023; Kril et al., 2024; Комплексне дослідження, 2023). Кожен фактор відповідає певній класифікаційній ознаці розвитку процесів: морфологічні та структурно-геологічні передумови представлено типом рельєфу, морфометрією, неотектонікою, літологією та міцністю ґрунтів; гідрогеологічні умови – глибиною залягання й режимом ґрунтових вод і підтопленням; фактичні прояви процесів – зсувами, просіданнями та негативними формами рельєфу; техногенні впливи – навантаженням забудови, підземними спорудами, інженерними мережами та станом дренажних систем. Такий склад забезпечує повноту опису природних і техногенних чинників геологічної нестійкості відповідно до генетичної, структурно-геологічної та

природно-техногенної класифікацій екзогенних процесів, а не є результатом суто статистичного відбору ознак.

Статистичне оцінювання виконано з метою перевірки просторової мінливості сформованих ознак, структури взаємозв'язків між ними та наявності потенційної інформаційної надлишковості (Guyon & Elisseeff, 2003). Склад факторів при цьому не переглядався, оскільки його обґрунтовано на основі класифікацій екзогенних геологічних процесів, фізичних механізмів їх розвитку та результатів інженерно-геологічних досліджень території. Окремо проаналізовано гідрогеологічні, деформаційні й дистанційні характеристики, що доповнюють відносно сталі природні та техногенні фактори інформацією про сучасний стан і часову мінливість геологічного середовища.

Статистичне опрацювання сформованого набору даних виконано в програмному середовищі Python із використанням бібліотек Pandas і NumPy для структурування та числового опрацювання даних, SciPy для розрахунку статистичних показників і коефіцієнтів кореляції та Matplotlib для графічного представлення результатів. Просторову підготовку, узгодження та картографічне представлення даних здійснено в середовищі QGIS.

Нормалізація та просторове варіювання ознак

Сформований набір містить порядкові фактори, подані у трирівневій баловій шкалі, та кількісні показники з різними одиницями вимірювання. Для забезпечення їх зіставності перед статистичним аналізом значення приведено до безрозмірного інтервалу [0;1] (Жуков, 2008; Вижва, 2011).

Для факторів F1–F17 із початковими баловими значеннями 1, 2 і 3 застосовано перетворення:

$$x'_{i\,j} = \frac{B_{i\,j}-1}{2}, \quad x'_{i\,j} \in [0,1] \qquad (3.2)$$

де B_{ij} – балове значення j-го фактора в i-й комірці сітки. Перетворення (3.2) забезпечує приведення факторних ознак до єдиного інтервалу значень.

Для кількісних ознак використовувалося мінімаксне перетворення

$$x'_{i\,j} = \frac{x_{i\,j}-x_j^{min}}{x_j^{max}-x_j^{min}}, \qquad (3.3)$$

де x_j^{min} та x_j^{max} – відповідно мінімальне та максимальне значення ознаки на території дослідження. Використання співвідношення (3.3) дозволяє усунути вплив різних одиниць вимірювання та забезпечує зіставність показників між собою.

Первинне оцінювання інформативності виконано за показниками просторового варіювання. Вибіркову дисперсію нормалізованої ознаки визначено за співвідношенням (Жуков, 2008; Вижва, 2011):

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x'_{i\,j} - \bar{x}_j)^2 \qquad (3.4)$$

де n – кількість просторових комірок; $\bar{x}_j$ – середнє значення j-ї ознаки.

Ознаки з дисперсією, близькою до нуля, майже не забезпечують просторового розмежування території та можуть розглядатися як малоінформативні. Аналіз не виявив характеристик із нульовою або критично низькою мінливістю (рис. 3.11).

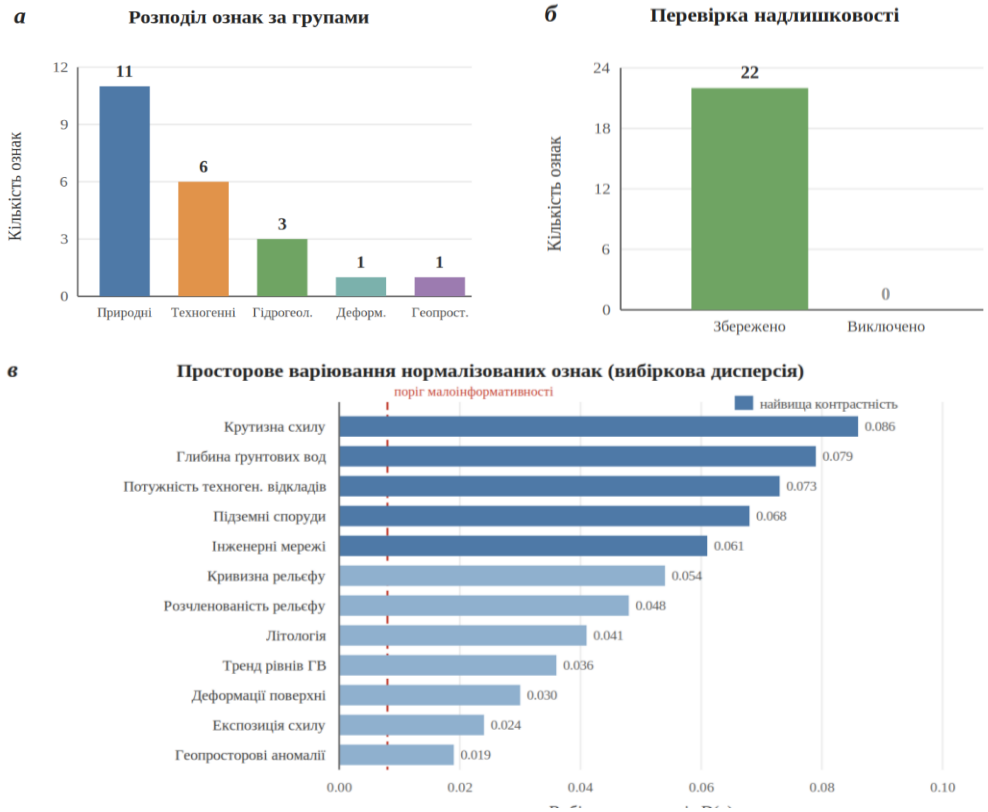


Рис. 3.11. Статистичне обґрунтування складу ознак інформаційної основи дослідження: *а – розподіл ознак за групами факторів; б – результат перевірки ознак на надлишковість; в – просторове варіювання нормалізованих ознак (вибіркова дисперсія) з порогом малоінформативності*

Найвища просторова контрастність властива морфометричним показникам рельєфу, глибині залягання ґрунтових вод, потужності техногенних відкладів, поширенню підземних споруд та інженерних мереж.

Інформативність режимних гідрогеологічних даних

Статистичний аналіз виконано для всього масиву режимних спостережень за рівнями ґрунтових вод у межах досліджуваної території. Для кожної свердловини залежно від повноти її часового ряду визначено основні статистичні характеристики, оцінено діапазон і часову мінливість рівнів, а також спрямованість їх багаторічних змін (рис. 3.12). Як репрезентативний приклад наведено результати аналізу однієї з режимних свердловин, для якої в дослідженні використано умовне позначення *w1*. Це позначення введено для уніфікованого представлення даних і не відповідає офіційному номеру свердловини.

Часовий ряд свердловини *w1* містить 993 вимірювання зі значеннями від 9,84 до 14,04 м. Амплітуда коливань становить 4,20 м, середнє значення дорівнює 12,34 м, стандартне відхилення становить 0,63 м, вибіркова дисперсія $S^2 = 0{,}394$, а коефіцієнт варіації дорівнює 5,08 %. Коефіцієнт асиметрії − 0,19 та ексцес − 0,07 характеризують розподіл значень як близький до симетричного.

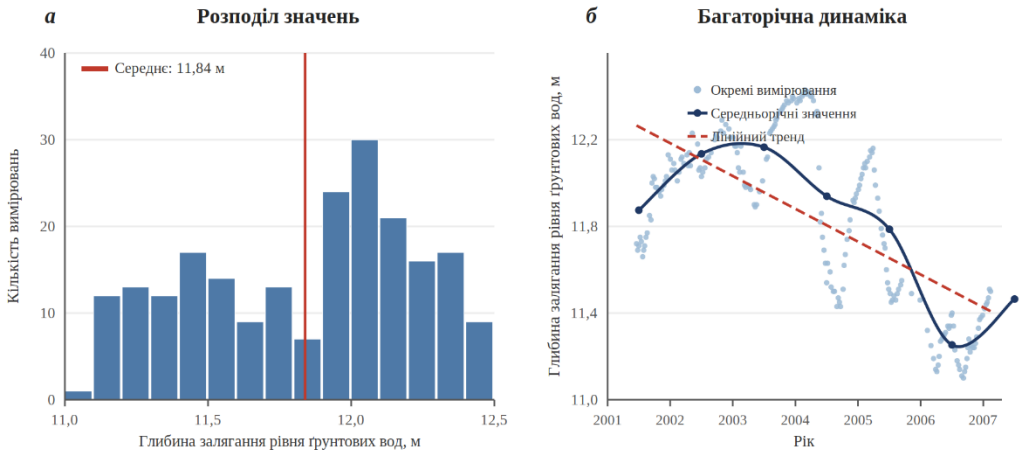


Рис. 3.12. Розподіл значень і багаторічна динаміка абсолютних відміток івня ґрунтових вод за даними режимної свердловини *w1*: *а – частотний розподіл; б – окремі вимірювання, середньорічні значення та лінійний тренд*.

Результати аналізу режимних спостережень підтвердили, що часові характеристики рівнів ґрунтових вод містять інформацію, яка не відтворюється статичним фактором глибини їх залягання. Тому для подальшого моделювання збережено три взаємодоповнювальні характеристики: середню абсолютну відмітку, коефіцієнт лінійного тренду та амплітуду коливань рівня ґрунтових вод. Вони дають змогу врахувати типовий гідрогеологічний стан, спрямованість довготривалих змін і діапазон часової мінливості.

Інформативність дистанційної ознаки Anomaly

Ознака *Anomaly* відображає належність просторової одиниці до аномальної зони, виявленої за різночасовими супутниковими даними. На відміну від факторів F1–F17, які переважно характеризують відносно сталі природні й техногенні умови, ця ознака містить інформацію про просторово локалізовані зміни земної поверхні.

Інформативність супутникових матеріалів визначається можливістю виявлення змін спектральних характеристик, наприклад, пов’язаних із перезволоженням, трансформацією рослинного покриву та порушеннями стану поверхні. Такі зміни можуть супроводжувати підтоплення, суфозійно-просадкові явища й інші процеси, що впливають на геологічну нестійкість території (Орленко, 2024; Marhes et al., 2025).

Поєднання матеріалів Landsat-5 із даними Landsat-8, Landsat-9 та Sentinel-2 дало змогу врахувати просторову повторюваність аномальних характеристик. Водночас ознака *Anomaly* не використовується для безпосереднього встановлення виду геологічного процесу, а доповнює факторну систему даними про сучасні просторові прояви змін поверхні.

Аналіз взаємозв’язків і надлишковості ознак

Для визначення структури взаємозв’язків застосовано коефіцієнт рангової кореляції Спірмена. Оскільки фактори F1–F17 містять повторювані значення, коефіцієнт визначено як кореляцію між рангами з присвоєнням середніх рангів однаковим спостереженням (Вижва, 2011):

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{ij}-\bar{R}_j)(R_{ik}-\bar{R}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(R_{ij}-\bar{R}_j)^2 \ \sum_{i=1}^{n}((R_{ik}-\bar{R}_k)^2}} \qquad (3.5)$$

де R_{ij} та R_{ik} є рангами значень відповідних ознак для i-ї просторової одиниці; $\bar{R}_j$ і $\bar{R}_k$є середніми значеннями рангів.

Переважна більшість пар ознак характеризується слабкими або помірними монотонними зв'язками, що свідчить про відсутність повного інформаційного дублювання. Підвищені коефіцієнти властиві окремим показникам, пов'язаним спільними природними або техногенними передумовами. Водночас не встановлено ознак, вилучення яких було б одночасно обґрунтоване високою кореляцією з іншими характеристиками, низькою власною просторовою мінливістю та відсутністю самостійного фізичного змісту (рис. 3.13).

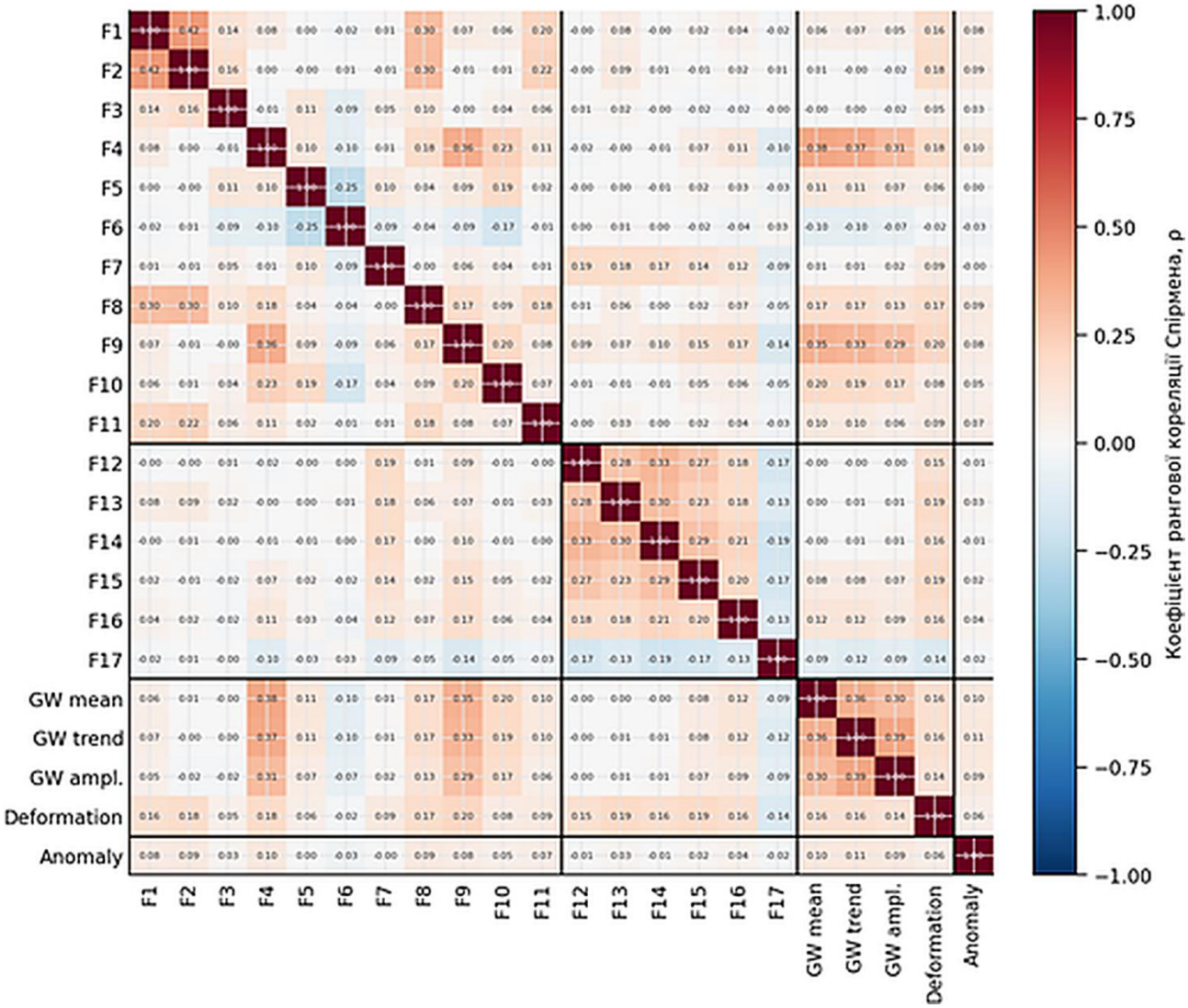


Рис. 3.13. Матриця коефіцієнтів рангової кореляції Спірмена між природними, техногенними, динамічними та дистанційними ознаками

Аналіз просторової мінливості та кореляційних зв’язків не виявив ознак, вилучення яких було б одночасно обґрунтоване низькою дисперсією, високою кореляцією з іншими характеристиками та відсутністю самостійного фізичного значення. Тому всі 22 ознаки збережено у складі вхідного набору даних. Це забезпечує відповідність ознакового простору класифікаційним характеристикам екзогенних геологічних процесів і зберігає можливість геологічної інтерпретації результатів моделювання.

Окремою складовою сформованого набору є дистанційна ознака, що відображає належність просторової одиниці до геопросторової аномальної зони. Її формування потребувало автоматизації статистичного виявлення, просторового об’єднання та векторизації нетипових значень у растрових даних. Програмну реалізацію відповідної процедури розглянуто в наступному розділі.

Висновки до розділу 3

У розділі охарактеризовано природні й техногенні умови території Києво-Печерської лаври та сформовано геопросторову інформаційну основу оцінювання її геологічної нестійкості.

1. Матеріали геоінформаційної бази «LAVRA-GEO», режимних, геодезичних, геофізичних і дистанційних спостережень просторово узгоджено в межах регулярної сітки з розміром комірки 5 × 5 м. При цьому приведення дистанційних матеріалів до структури сітки не змінювало їх фактичної просторової роздільної здатності.

2. Сформовано набір із 22 вхідних ознак, що охоплює одинадцять природних і шість техногенних факторів, три характеристики рівнів ґрунтових вод, ознаку деформаційного стану та дистанційну ознаку геопросторової аномалії.

3. Часові ряди рівнів ґрунтових вод представлено середнім значенням, коефіцієнтом лінійного тренду й амплітудою коливань, що забезпечує врахування типового гідрогеологічного стану, спрямованості довготривалих змін і діапазону часової мінливості.

4. Статистичне опрацювання підтвердило просторову мінливість сформованих ознак і не виявило їх критичного інформаційного дублювання. Усі ознаки збережено у фізично інтерпретованому представленні як інформаційну основу нейромережевого моделювання геологічної нестійкості.

Список використаних джерел до розділу 3:

Барщевский, Н. Е. (1989). Геоморфология и рельефообразующие отложения района г. Киева. Київ: *Наукова думка*. 195 с.

Бєлов І.Д., Дєдов О.П., Бугаєнко Н.М. (2016). Звіт про проведення технічного обстеження корпусу № 37 – «Галерея до Ближніх печер» Свято-Успенської Києво-Печерської Лаври. *Випробувальний центр будівельних конструкцій КНУБА*. 67с.

Бугай, Д. О., Щербина, С. В., Кріль, Т. В., Черевко, І. А., & Шехунова, С. Б. (2023). Огляд сучасних технологій «моніторингу структурного здоров'я» історичних будівель у складних інженерно-геологічних умовах: сенсори, методи аналізу даних та перспективи застосування в НЗ «Києво-Печерська лавра». *Збірник наукових праць ІГН НАН України*, 16(2), 76-86. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.293237

Бугай, Д. О., Шехунова, С. Б., Кріль, Т. В., Черевко, І. А., та ін. (2024). Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій. Етап 2. Натурні лазерні і сейсмоакустичні дослідження та опрацювання рекомендацій із забезпечення подальшої надійної експлуатації об'єктів Заповідника для умов надзвичайних ситуацій (воєнних подій): науковий *звіт про НДР*. Київ: Інститут геологічних наук НАН України.

Вижва, З. О. (2011). Статистичне моделювання випадкових процесів та полів. Київ: *Обрії*.

Гожик, П. Ф. (Ред.). (2012). Стратиграфічний кодекс України (2-ге вид.). Київ. 66 с.

Демчишин, М. Г., Беспалова, Е. Н. (1987). Инженерно-геологические условия правобережных склонов Среднего Днепра. *Основания и фундаменты*, 20, 15–19.

Демчишин, М. Г. (1992). Современная динамика склонов на территории Украины (инженерно-геологические аспекты). Київ: *Наукова думка*. 255 с.

Демчишин, М. Г. (2004). Техногенні впливи на геологічне середовище території України. Київ: *ТОВ «Гнозіс*». 156 с.

Демчишин М.Г., Кріль Т.В., Анацький О.М. (2014). Стан яружних систем правобережного схилу Дніпра в межах м. Київ, забудованих об'єктами історико-культурної спадщини. *Геологічний журнал*. № 2. С. 85-94.

Жуков, М. Н. (2008). Математична статистика та обробка геологічних даних. Київ: Видавничо-поліграфічний центр Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Зосимович, В. Ю., & Шевченко, Т. В. (2015). Палеогенові відклади Північноукраїнської палеоседиментаційної провінції. *Збірник наукових праць ІГН НАН України*, 8, 68-121.

Костюченко, М. М. (2008). Проблеми техногенних змін геологічного середовища території міста Києва. *Вісник Київського університету*. Геологія, 44, 43-48.

Левашов, С. П., Піщаний, Ю. М., & Корчагін, І. М. (2005). Геофізичні вишукування ділянки саду Свято-Успенської Києво-Печерської лаври: *звіт про НДР*. Київ: ТОВ НВП «Геопром». 26 с.

Левашов, С. П., Піщаний, Ю. М., & Корчагін, І. М. (2008). Геофізичне обстеження (вишукування) території Свято-Успенської Києво-Печерської лаври: *звіт про НДР*. Київ: ТОВ «Геолог-Буд». 47 с.

Макаренко, Д. Е. (Ред.). (1987). Стратиграфическая схема палеогеновых отложений Украины (Унифицированная). Київ: *Наукова думка*. С. 116-120.

Орленко, Т. А. (2024). Методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів на прикладі правобережжя Канівського водосховища (Дисертація доктора філософії). Інститут геологічних наук НАН України.

Рибін В.Ф., Демчишин М.Г., Черевко І.А., Куциба В.О. та ін. (2001) Розробити методику та обґрунтувати моніторинг геологічного середовища зон історичної забудови м. Києва з метою охорони історико-архітектурних пам’яток/ *Звіт про НДР № держреєстр*.15-2001 – К.: ІГН НАН України. – 197с.

Скальський, О. С., Бугай, Д. О., Депо, С. П. та ін. (2007). Створення автоматизованої системи гідрогеологічного моніторингу комплексу Ближніх печер Києво-Печерської лаври: *звіт про НДР* (договір № 01/07 від 01.07.2007). Київ: ПП «Гео-Еко-Консалтинг». 61 с.

Черевко, І. А., & Куциба, В. О. (2011). Дослідження мікроклімату та інженерно-геологічних умов Ближніх печер з метою визначення оптимальних умов експлуатації та збереження. *Дива печер лаврських (2-ге вид., доп.)*. Київ. 225 с.

Черевко І.А. (2014). Ділянка № 3 Оборонної стіни навколо Ближніх і Дальніх печер: питання атрибуції, технічний стан, чинники деструкції та засоби попередження. *Матеріали конференції «Церква -наука -суспільство: питання взаємодії» (28-30 травня, 2014, Київ)*. Київ: НКПІКЗ. С. 59-64.

Черевко І.А. (2016) Інженерно-геологічні умови Дальньопечерного пагорбу в контексті збереження об'єктів культурної спадщини *Збір. наук. праць «Могилянські читання-2015»* – Київ: НКПІКЗ. С. 306-313.

Черевко, І. А. (2019). Гідрогеологічні умови території Києво-Печерської лаври та їх вплив на стан пам'яток. *Сіверщина в історії України, 12*. Глухів–Київ: Центр пам'яткознавства НАН України і УТОПІК.

Демчишин М.Г., Кріль Т.В., Черевко І.А. (2017) Вдосконалення систем інженерного захисту території Національного історико-культурного заповідника «Києво-Печерська Лавра». *Звіт про НДР*. Інститут геологічних наук НАН України. 128 с.

Черевко І.А. (2016) Інженерно-геологічні умови Дальньопечерного пагорбу в контексті збереження об'єктів культурної спадщини. *Збірник наукових праць «Могилянські читання -2015»*. Київ: НКПІКЗ, С. 306-313.

Черевко І. А., Кріль Т. В., Безродний Д. А. (2024). Неруйнівні методи встановлення причинно-наслідкового зв'язку аварій водонесучих мереж та умов збереження архітектурної спадщини. *Геологічний журнал*. № 3. С. 11–30. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769

Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій (2023). Науковий звіт. Київ: Інститут геологічних наук НАН України.

Комплексний моніторинг Ближніх, Дальніх та Варязьких печер Києво-Печерської лаври: заключний звіт про НДР (2015). Державний реєстраційний № 0113U007605, обліковий № 0215U004379. Київ: Національний Києво-Печерський історико-культурний заповідник.

Cherevko, I., Kril, T., Bugai, D., & Shekhunova, S. (2024). Impact of Hydrogeological Factors on Geotechnical Conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra Monastery Complex: Lessons from Three Decades of Monitoring. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*. https://doi.org/10.7343/as-2024-765

Cherevko, I., Kril, T., & Stanisz, J. (2026). Geotechnical Study of the Linear Structures on the Slopes of the Kyiv-Pechersk Lavra: Causes of Deformation and Restoration Ways. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1630(1), 012059. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1630/1/012059

Cherevko, I., Zatserkovnyi, V., Trofymenko, P., Pampukha, I., Popkov, B., & Hudak, V. (2022). Geodatabase Application for Regime Observations of Kyiv-Pechersk Lavra Territory Hydrogeological Conditions and Its Analysis. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(98), 92-103. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.12

Guyon, I. and Elisseeff, A. (2003) An Introduction to Variable and Feature Selection. *Journal of Machine Learning Research*, 3, 1157-1182.https://doi.org/10.1162/153244303322753616

Hudak, V., Cherevko, I., Zatserkovnyi, V., Ostroukh, V., & Ilchenko, A. (2020). Determining of the effects of groundwater regime on the status of architectural monuments of Kyiv-Pechersk Lavra. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 2020. Volume 2020, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo009

Hudak, V., Cherevko, I., Zatserkovnyi, V., Nikolaienko, O., & Lazorenko-Hevel, N. (2021). Geoinformation modeling of exogenous geological processes on the territory of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 2021. Volume 2021, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521048

Hudak, V. (2024). Enhancing the Quality of Surface Displacement Maps Obtained via the D-InSAR Method Using Linear Filters. Авторська редакція збірника тез *III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів "Сучасні виклики геологічної освіти і науки"*, Львів 7-8 листопада 2024. URI: https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/10/Stud.konf.2024.pdf

Hudak, V., Marhes, S., Zatserkovnyi, V., & De Donatis, M. (2025). Methodology for the Automated Detection of Anomalous Geospatial Zones in Satellite Imagery Using Statistical Analysis and a Custom QGIS Plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 3(110), 117-126. https://doi.org/10.17721/1728-2713.110.13

Hudak, V., & Kril, T. (2025a). 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, 2025,* 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510054

Hudak, V., Kril, T., & Zatserkovnyi, V. (2025). Remote Sensing Analysis of Vertical Surface Displacements as an Indicator of Underground Structure Deformations. V*isnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 1(108), 94-102. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13

Kril, T., & Cherevko, I. (2023). Identification of Unstable (Landslide Hazard) Areas on Lavra Far-Caves Hill. *4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*, 1-5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500017

Kril, T. V. (2017). Causes of Some Hazardous Engineering-Geological Processes on Urban Territories. *E3S Web of Conferences*, 24, 01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172401009

Kril, T. V., Cherevko, I. A., & Shekhunova, S. B. (2025). Numerical Analysis of the Large-Scale Water Supply Network Accident Consequences on the Engineering and Geological Conditions of a Heritage Site. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10, Article 44. https://doi.org/10.1007/s41062-024-01859-x

Kril, T. V., Cherevko, I. A., Shcherbyna, S. V., & Chalyi, O. O. (2024). Modern Risk Assessment of the Influences of Natural and Military Man-Made Factors on the State of the Historical Buildings of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 46(5). https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.309056

Kril, T. V., Shekhunova, S. B., & Cherevko, I. A. (2019). Improvement of the Engineering Protection Systems of the Kyiv-Pechersk Lavra Preserve Territory. *Nauka innov*., 15(3), 37-51. https://doi.org/10.15407/scin15.03.037

Kril, T., Shekhunova, S., & Cherevko, I. (2023). Identification of Potentially Unstable Areas by Engineering and Geological Processes Monitoring and Heritage Building Deformations. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1-5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520203

Marhes S., Hudak, V., Zatserkovnyi, V., Filipovych, V., & De Donatis, M. (2026). Detection of Soil Degradation Processes in River Basins Using Satellite Indices and a Custom QGIS Plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (112). DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.112.14

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО ПЛАГІНА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛЬНИХ ЗОН

Зростання обсягів даних дистанційного зондування Землі зумовлює потребу в застосуванні автоматизованих геоінформаційних методів моніторингу геологічного середовища. Ручне опрацювання значних масивів просторової інформації є трудомістким, а його результати можуть залежати від суб'єктивних рішень дослідника. Тому актуальним є використання формалізованих алгоритмів, які забезпечують об'єктивність і відтворюваність процедур виявлення нетипових просторових змін характеристик земної поверхні.

Практична реалізація такого підходу потребує спеціалізованого програмного засобу, інтегрованого в геоінформаційне середовище та придатного для аналізу числових растрів різної фізичної природи. З цією метою в межах дисертаційного дослідження у співавторстві розроблено плагін «Anomalies to Contours» для програмного середовища QGIS, призначений для статистичного виявлення аномальних значень, просторової локалізації відповідних ділянок, їх векторизації та атрибутивного опису.

4.1. Концептуальні засади автоматизованого виявлення геопросторових аномалій

Концепція розробленого інструмента «*Anomalies to Contours*» ґрунтується на статистичному аналізі розподілу значень растрового показника та просторовій локалізації ділянок, характеристики яких відрізняються від типових для досліджуваної території. Результати аналізу можуть використовуватися у вигляді бінарної растрової маски або, залежно від завдань подальшого опрацювання, перетворюватися у векторний полігональний шар.

Застосований підхід забезпечує опрацювання числових растрів різної фізичної природи за єдиною алгоритмічною процедурою. Це створює можливість застосовувати розроблений інструмент до супутникових даних без зміни базових принципів виявлення аномальних значень. Інтерпретація

отриманих результатів здійснюється з урахуванням просторової розрізненності, статистичних властивостей і фізичного змісту аналізованого показника.

4.1.1. Методичні принципи автоматизованого виявлення геопросторових аномалій

У межах розробленого підходу *геопросторову аномалію* визначено як просторово локалізоване статистично значуще відхилення значень аналізованого растрового показника від його фонового розподілу. Залежно від фізичної природи вихідних даних такі відхилення можуть характеризувати зміни спектральної яскравості, температури земної поверхні, зволоження, інтенсивності радарного сигналу, величини зміщень або інших кількісних параметрів.

Процедура автоматизованого виявлення передбачає статистичний аналіз масиву піксельних значень, визначення параметрів їх розподілу та застосування встановленого порогового критерію. За результатами класифікації формується бінарна растрова маска, у якій аномальні пікселі відокремлюються від фонових (Гудак, Маргес та Зацерковний, 2025). Просторово суміжні аномальні пікселі можуть бути об’єднані та полігонізовані з утворенням окремих аномальних зон (рис. 4.1).

Порогові параметри визначають чутливість алгоритму та ступінь вибірковості результатів. Їх регулювання дає змогу адаптувати процедуру виявлення до статистичних особливостей конкретного растрового набору та завдань дослідження. За однакових параметрів аналізу алгоритм забезпечує відтворюваність результатів, що є важливим для порівняльного опрацювання значних масивів геопросторових даних.

Виявлена аномальна зона характеризує ділянку зі статистично нетиповими значеннями аналізованого показника. Її змістове трактування визначається фізичною природою вихідних даних і контекстом досліджуваної території. Такий підхід забезпечує розмежування автоматизованого статистичного виявлення та подальшої предметної інтерпретації отриманих результатів.

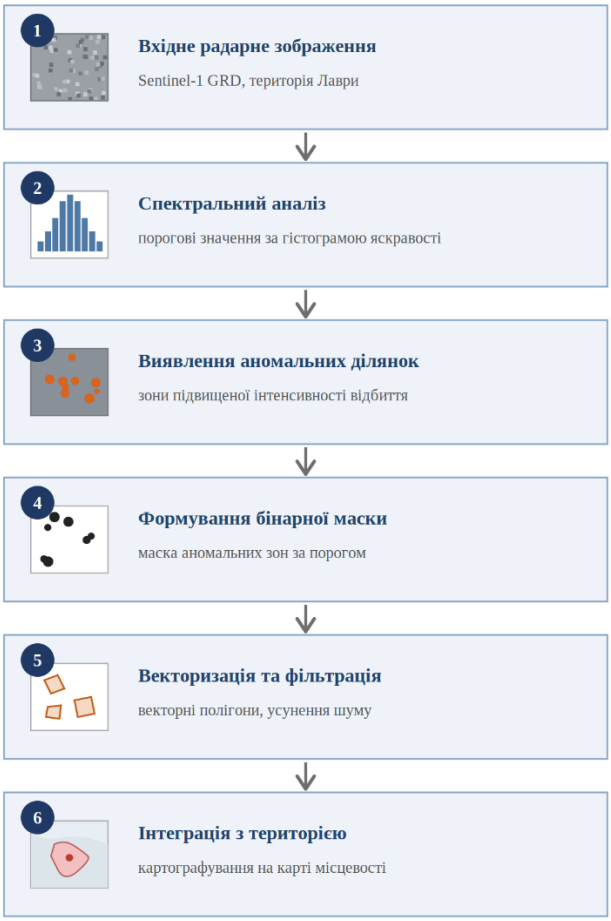


Рис. 4.1. Узагальнена схема автоматизованого виявлення аномальних зон за супутниковими даними: від растрового зображення до векторного шару аномалій

Повторне застосування алгоритму до різночасових зображень дає змогу порівнювати просторове положення, конфігурацію та площу виявлених зон. На цій основі можна розмежовувати відносно стійкі й змінні аномалії та аналізувати часову динаміку характеристик земної поверхні (Kril & Orlenko, 2022; Marhes et al., 2025).

4.1.2. Просторова розрізненність та інформаційні можливості супутникових даних

Інформативність даних дистанційного зондування Землі визначається співвідношенням між їхньою просторовою розрізненністю та характерними розмірами досліджуваних об’єктів і проявів природних або техногенних процесів. Просторова розрізненність характеризує розмір ділянки земної поверхні, властивості якої узагальнюються в межах одного пікселя

супутникового зображення. Вона визначає рівень просторової деталізації результатів і масштаб, у якому здійснюється їх змістова інтерпретація.

У дослідженні використано супутникові зображення Sentinel-2 із просторовою розрізненністю 10 м і Landsat із просторовою розрізненністю 30 м. Такі матеріали забезпечують суцільне просторове охоплення досліджуваної території та дають змогу виявляти зональні зміни характеристик земної поверхні, що охоплюють окремі групи суміжних пікселів. Це є важливою перевагою для аналізу просторового поширення ділянок підвищеного зволоження, змін стану рослинного покриву та інших проявів трансформації поверхні (рис. 4.2). Окремі провали, локальні просідання, тріщини й осередки суфозійних процесів можуть мати менші розміри, ніж піксель використаного зображення. За таких умов спектральні характеристики локального об'єкта узагальнюються разом із властивостями навколишньої поверхні. Відповідно, супутникові дані використовуються не для безпосереднього розпізнавання малорозмірних деформацій, а для виявлення пов'язаних із ними просторово поширених змін стану земної поверхні (Hudak et al., 2025).

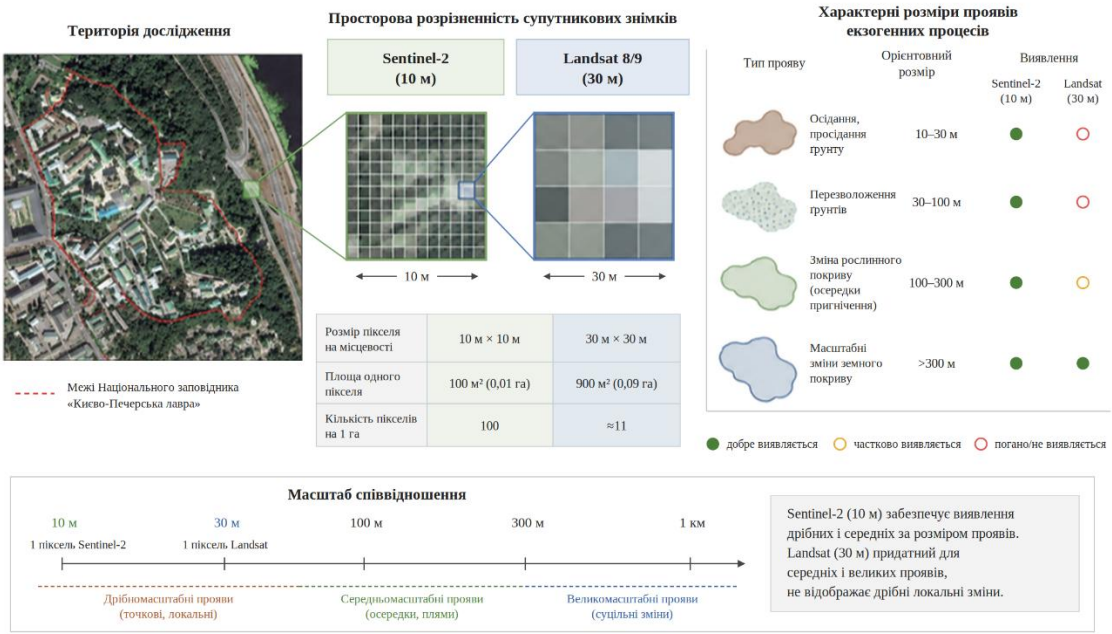


Рис. 4.2. Співвідношення просторової розрізненності супутникових знімків (Sentinel-2 – 10 м, Landsat – 30 м) із характерними розмірами проявів екзогенних процесів на території Києво-Печерської лаври

Автоматизований аналіз орієнтовано на виявлення площинних аномальних зон, які охоплюють групи просторово суміжних пікселів і характеризуються узгодженим відхиленням значень аналізованого показника від фонового розподілу. Просторова зв’язність таких зон дає змогу відокремлювати системні зміни стану поверхні від поодиноких піксельних відхилень і статистичного шуму. Унаслідок цього результати аналізу характеризують не окремі точкові прояви, а просторовий контекст, у межах якого можуть формуватися або розвиватися відповідні процеси (Гудак та Маргес, 2025).

Важливою інформаційною перевагою супутникових даних є можливість проведення різночасового аналізу. Повторне застосування алгоритму до зображень, отриманих у різні періоди, дає змогу порівнювати просторове положення, конфігурацію та площу аномальних зон, розмежовувати відносно стійкі й змінні відхилення та оцінювати характер їхньої часової динаміки (Kril & Orlenko, 2022; Marhes et al., 2025). Такий аналіз підвищує інформативність окремих спостережень, оскільки дає змогу враховувати не лише наявність аномалії, а й сталість її просторового прояву в часі. Отримані результати формують інформаційну основу для подальшого зіставлення з іншими компонентами системи геоінформаційного моніторингу.

4.1.3. Місце результатів автоматизованого виявлення аномалій у системі геоінформаційного моніторингу

Результати автоматизованого виявлення геопросторових аномалій є складовою інформаційного забезпечення геоінформаційного моніторингу територій. Їх використання розширює можливості просторового аналізу завдяки виявленню ділянок зі статистично нетиповими значеннями характеристик земної поверхні та забезпечує формалізоване опрацювання значних масивів растрових даних.

У загальній системі моніторингу автоматизоване виявлення аномалій виконує функцію просторової локалізації ділянок (рис. 4.3). Це дає змогу

зосередити подальший аналіз на територіях із найбільш вираженими змінами та визначити пріоритетні ділянки для залучення додаткових матеріалів досліджень.

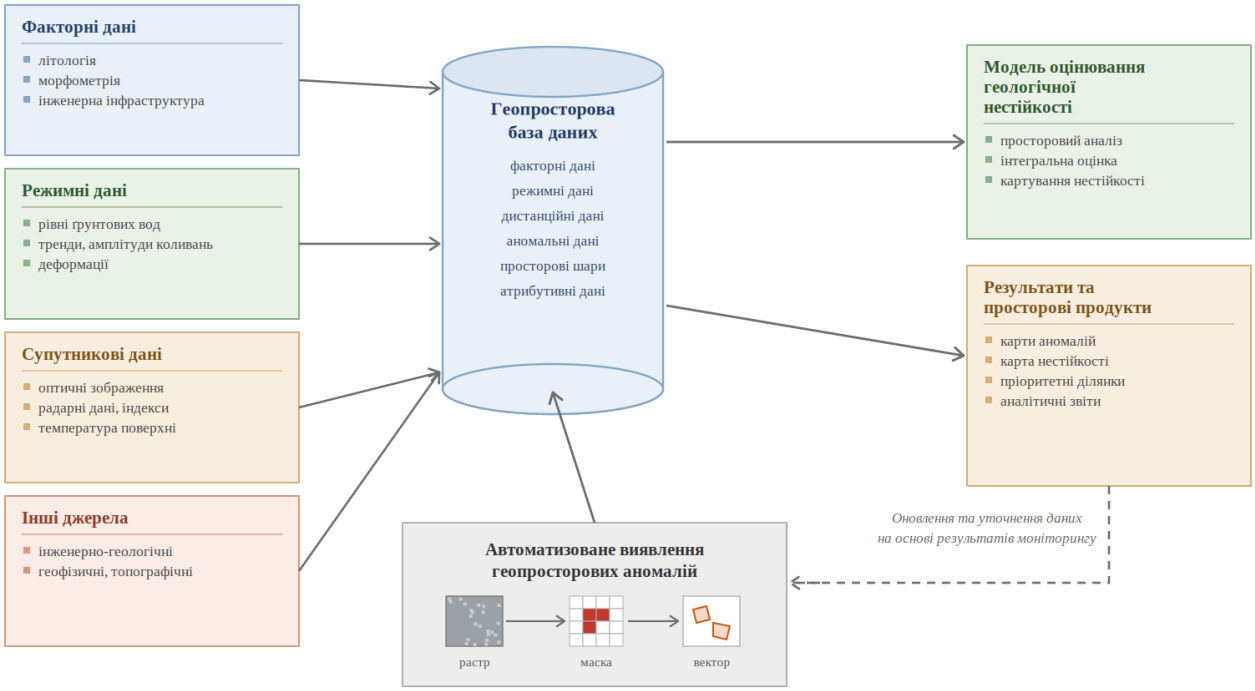


Рис. 4.3. Місце автоматизованого виявлення геопросторових аномалій у системі геоінформаційного моніторингу та формування геопросторової бази даних

Результати автоматизованого аналізу можуть використовуватися у растровому або векторному поданні. Растрова форма забезпечує збереження просторової структури вихідних даних і можливість їх зіставлення з іншими растровими показниками, тоді як векторне подання дає змогу здійснювати картографічне відображення, кількісний опис та просторовий аналіз виявлених аномальних зон. Розроблений інструмент забезпечує перехід від первинного опрацювання растрових даних до комплексного геоінформаційного аналізу, доповнюючи наявні матеріали просторово неперервною інформацією про зміни стану земної поверхні.

4.2. Розроблення та програмна реалізація плагіна «Anomalies to Contours»

Практична реалізація запропонованого підходу передбачала розроблення спеціалізованого програмного засобу, інтегрованого в геоінформаційне

середовище та орієнтованого на опрацювання растрових даних різної фізичної природи. У межах дисертаційного дослідження у співавторстві розроблено плагін «*Anomalies to Contours*» як програмне розширення геоінформаційної системи QGIS із відкритим вихідним кодом. Функціональне призначення плагіна полягає у статистичному виявленні аномальних значень у растрових даних, просторовій локалізації відповідних ділянок, їх автоматизованій векторизації та формуванні атрибутивних характеристик отриманих полігональних об'єктів (Hudak et al., 2025). Відкритість програмної реалізації забезпечує можливість перевірки алгоритмів, незалежного відтворення результатів, адаптації інструмента до інших наборів растрових даних і його подальшого використання в геоінформаційних дослідженнях. Вихідний код програмного засобу розміщено у відкритому репозиторії GitHub (Marhes, 2025), а інсталяційний пакет оприлюднено в офіційному каталозі розширень QGIS, що забезпечує доступність плагіна для практичного застосування.

4.2.1. Програмна архітектура та функціональні модулі плагіна

Плагін «*Anomalies to Contours*» реалізовано мовою програмування Python із використанням відкритих бібліотек, інтегрованих у програмне середовище QGIS. Вибір цієї платформи зумовлений її широким застосуванням у геопросторових дослідженнях, підтримкою відкритих стандартів просторових даних та можливістю розширення функціональності шляхом створення власних програмних модулів (Hudak et al., 2025; Congedo, 2021).

Обчислювальне ядро плагіна базується на бібліотеках NumPy та SciPy, які забезпечують статистичну обробку числових масивів, а також GDAL/OGR, призначених для роботи з растровими та векторними геопросторовими даними, геоприв'язкою і системами координат. Графічний інтерфейс користувача реалізовано засобами бібліотеки PyQt. (Hudak et al., 2025). Використання відкритих бібліотек і стандартних форматів даних забезпечує відтворюваність результатів та можливість інтеграції плагіна в наявні геоінформаційні робочі процеси.

Архітектуру програмного інструмента побудовано за модульним принципом, відповідно до якого окремі функціональні блоки реалізують послідовні етапи оброблення растрових даних. Цей принцип забезпечує логічне розмежування функцій, спрощує супровід програмного коду та створює можливість подальшого розвитку окремих компонентів без зміни загальної структури програмного засобу. У структурі плагіна виокремлено чотири основні функціональні модулі:

- модуль завантаження та попереднього опрацювання растрових даних;
- модуль статистичного аналізу значень пікселів;
- модуль виявлення аномальних зон;
- модуль векторизації та формування вихідного шару.

Модуль завантаження та попереднього опрацювання забезпечує вибір вхідного растрового шару, зчитування його параметрів та, за необхідності, вибір окремого каналу багатоканального зображення. Після завантаження формується масив значень, який надходить до модуля статистичного аналізу для подальшого опрацювання.

Модуль статистичного аналізу виконує розрахунок основних характеристик розподілу піксельних значень і формує гістограму розподілу. Візуалізація статистичних параметрів дає змогу оцінити структуру даних та встановити порогові критерії виявлення відповідно до особливостей конкретного набору зображень.

Центральним елементом архітектури є модуль виявлення аномалій, у якому реалізовано статистичний критерій виділення пікселів, значення яких відхиляються від фонового рівня зображення. На основі заданих параметрів формується бінарна растрова маска аномалій. Для забезпечення оперативного аналізу результати автоматично оновлюються під час зміни порогових значень, що дозволяє використовувати інтерактивне налаштування чутливості алгоритму (рис. 4.4).

Заключним етапом оброблення є векторизація бінарної маски аномалій та формування підсумкового просторового шару. Модуль векторизації виконує

полігонізацію суміжних аномальних комірок та автоматичне обчислення атрибутивних характеристик виділених зон. У результаті створюється векторний набір геопросторових даних, придатний для подальшого аналізу, картографування та використання в геоінформаційних системах.



Рис. 4.4. Послідовність взаємодії користувача з плагіном під час оброблення растрових даних

На відміну від універсальних програмних засобів оброблення даних дистанційного зондування Землі, таких як Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) або Orfeo Toolbox (OTB), орієнтованих на широкий спектр задач класифікації, сегментації та машинного навчання (Congedo, 2021; Orfeo Toolbox, 2025), розроблений інструмент спеціалізовано на автоматизованому виявленні та векторизації геопросторових аномалій. Така спеціалізація забезпечує спрощення процедури налаштування, зменшення кількості операцій підготовки даних та підвищення ефективності його застосування в задачах геоінформаційного моніторингу.

4.2.2. Алгоритм статистичного виявлення аномальних значень

Виявлення аномалій належить до поширених підходів аналізу даних дистанційного зондування Землі та ґрунтується на виділенні пікселів або просторових зон, характеристики яких істотно відрізняються від статистичних параметрів навколишнього середовища (Racetin & Krtalić, 2021; Guo et al., 2023). У межах розробленого плагіна реалізовано статистичний підхід, що базується на аналізі розподілу значень растра та ідентифікації їхніх відхилень від фонового рівня.

В основу алгоритму покладено представлення растрового зображення як дискретного двовимірного поля значень, у якому кожному пікселю відповідає

певна числова характеристика досліджуваного параметра (Kotsiubivska & Tymoshenko, 2019):

$$R: Z^2 \to R, \;\; R(i,j) = r_{ij},. \qquad (4.1)$$

де $R\ (i,\ j)$ – значення пікселя з координатами $(i,\ j)$, r_{ij} – характеризує інтенсивність сигналу, що може відповідати спектральній яскравості, коефіцієнту відбиття, температурі земної поверхні, величині зміщення поверхні або іншому дистанційно вимірюваному параметру.

Для кількісного опису розподілу значень растра обчислюється середнє арифметичне:

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} r_{ij}, \qquad (4.2)$$

де *M* і *N* відповідають кількості рядків і стовпців растрового зображення відповідно.

Мірою розсіювання значень відносно середнього є стандартне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M\,N}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}(r_{ij} - \mu)^2}, \qquad (4.3)$$

де σ характеризує ступінь варіації піксельних значень у межах зображення та використовується як базова статистична міра оцінювання однорідності даних (Page, 2018).

Виявлення аномальних значень ґрунтується на статистичному правилі сигмового відхилення (рис. 4.5), яке широко застосовується для ідентифікації статистично нетипових спостережень і задач автоматизованого виявлення аномалій (Page, 2018; Zhu et al., 2017). У загальному вигляді порогове значення визначається як:

$$I_{thr} = \mu + k\sigma \qquad (4.4)$$

де I_{thr} – порогове значення, що відокремлює аномальні пікселі від фонового розподілу; k – коефіцієнт чутливості, який визначає допустиму величину відхилення від середнього значення.

Для підвищення гнучкості налаштування алгоритму використано нормовану форму критерію, засновану на z-перетворенні:

$$\left|\frac{r_{i\,j}-\mu}{\sigma}\right| > \theta \qquad (4.5)$$

де θ є порогом чутливості виявлення (Benedek & Boccignone, 2017).

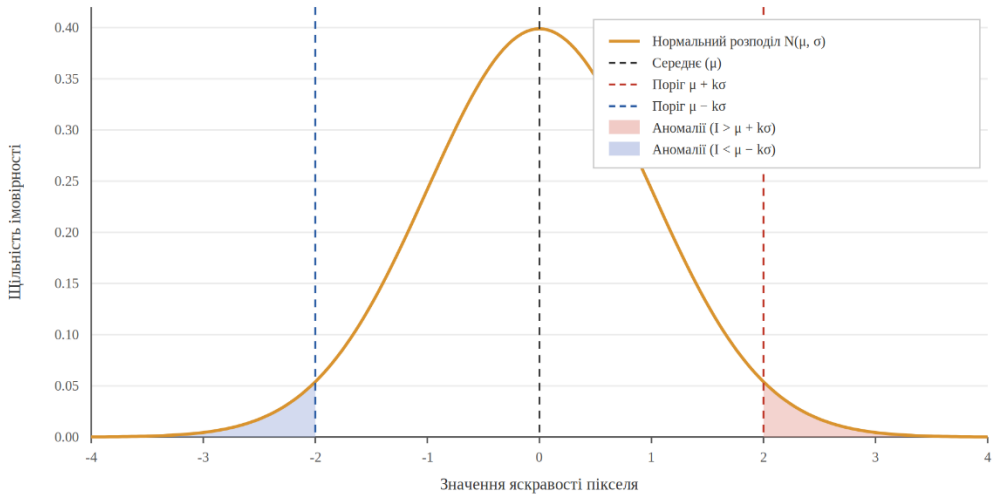


Рис. 4.5. Ілюстрація застосування правила $k\sigma(I_i = \mu \pm k\sigma)$у плагіні Anomalies to Contours для виявлення аномальних значень інтенсивності пікселів супутникових растрових даних

Використання нормованого відхилення забезпечує незалежність критерію від абсолютного діапазону значень вхідних даних і дає змогу застосовувати однаковий математичний апарат до растрів різної фізичної природи. Такий підхід є одним із базових статистичних методів автоматизованого виявлення аномалій у просторових даних (Benedek & Boccignone, 2017; Racetin & Krtalić, 2021).

Зміна параметрів k або θ дає змогу керувати співвідношенням між повнотою та вибірковістю виявлення аномалій. Менші значення порога підвищують чутливість алгоритму та збільшують кількість виділених зон, тоді як більші значення забезпечують локалізацію лише найбільш виражених відхилень і зменшують вплив статистичного шуму.

Для підтримки різних сценаріїв аналізу в плагіні реалізовано два режими роботи. У першому випадку використовується один поріг, за якого аномальними вважаються значення, що перевищують або не досягають установленого рівня відхилення. Другий режим передбачає використання верхньої та нижньої меж,

між якими формується діапазон аномальних значень. Такий підхід є доцільним для даних із асиметричним або складним розподілом значень і розширює можливості аналізу різнотипних растрових даних (рис. 4.6).

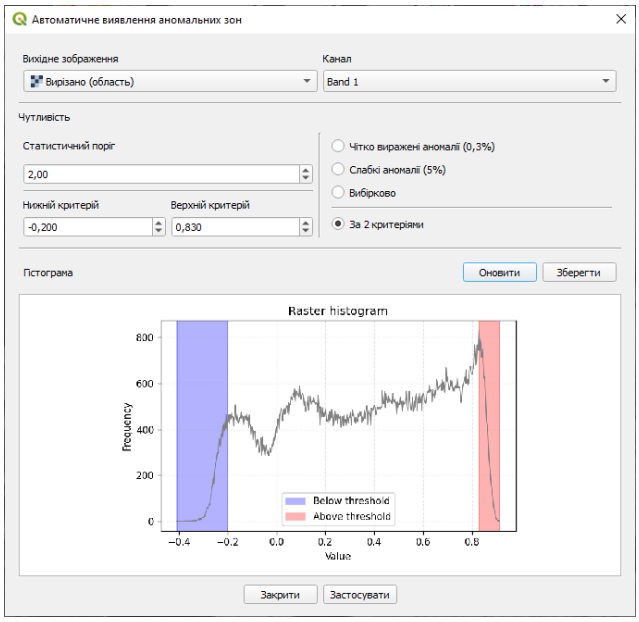


Рис. 4.6. Виявлення аномальних значень за гістограмою розподілу растрових значень: режим одного порога та режим двох порогів

Результатом застосування статистичного критерію є бінарна растрова маска, у якій аномальним пікселям присвоюється окреме значення класу. Отримана маска зберігається у форматі GeoTIFF зі збереженням просторової прив’язки та параметрів системи координат, що забезпечує її подальше використання в геоінформаційному аналізі.

4.2.3. Полігонізація та просторова фільтрація аномальних зон

Результатом застосування статистичного критерію є бінарна растрова маска, у якій аномальні пікселі відокремлено від фонових. Таке подання зберігає просторову структуру вихідного растра та може використовуватися для подальшого растрового аналізу. Водночас для визначення геометричних характеристик аномальних зон, оцінювання їх взаємного розташування та інтеграції результатів з іншими геопросторовими даними передбачено можливість перетворення бінарної маски у векторне подання.

Векторизацію виконують за процедурою полігонізації, яка передбачає об’єднання суміжних аномальних пікселів у зв’язні просторові об’єкти (Гудак, Маргес та Зацерковний, 2025; Hudak et al., 2025):

$$\mathrm{P} = \{A_i\}_{i=1}^{N} \qquad (4.6)$$

де A_i – зокрема зв’язна аномальна зона, сформована із суміжних пікселів, а N –загальна кількість виділених полігонів.

У процесі полігонізації кожній зв’язній області присвоюється окрема геометрія, що забезпечує її подальше незалежне опрацювання та аналіз. Отримані полігони є первинним результатом векторизації, однак їх геометричні характеристики можуть містити артефакти, спричинені особливостями розподілу даних, наявністю шуму або поодиноких аномальних пікселів.

Для кількісної характеристики сформованих полігонів обчислюється їх площа. Розрахунок виконується за формулою Гаусса для довільного багатокутника (Gechlik & Sedrakyan, 2024):

$$S_i = \frac{1}{2} \left| \sum_{j=1}^{n} \left(x_j y_{j+1} - x_{j+1} y_j \right) \right|, \qquad (4.7)$$

де S_i – площа i-го полігону; (x_j, y_j) – координати його вершин; n – кількість вершин полігону.

Обчислені площі використовуються для автоматизованої фільтрації результатів. Полігони надто малого розміру зазвичай є наслідком шумових ефектів або локальних статистичних відхилень, не пов’язаних із реальними особливостями поверхні. Водночас надмірно великі полігони можуть бути наслідком некоректно вибраного порога виявлення або неоднорідності фонового розподілу значень. Застосування площинних критеріїв дає змогу усунути подібні об’єкти та підвищити достовірність виділених аномальних зон. Крім того, на відміну від растрової маски, векторне представлення забезпечує можливість інтеграції результатів із просторовими базами даних, виконання операцій накладання шарів, оцінювання просторових взаємозв’язків та формування атрибутивної інформації для кожної виділеної зони.

4.2.4. Формування та атрибутивне наповнення вихідного шару

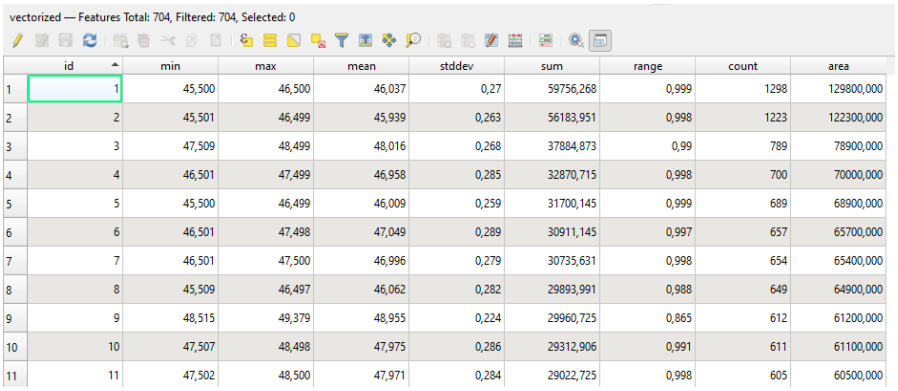
За результатами полігонізації та просторової фільтрації формується вихідний векторний шар аномальних зон. Кожному виділеному полігону автоматично присвоюється унікальний ідентифікатор і набір геометричних та статистичних характеристик, що забезпечує кількісний опис відповідної аномальної зони.

Статистичні характеристики обчислюються за значеннями вихідного растра в межах кожного полігона. До атрибутивної таблиці включаються мінімальне, максимальне та середнє значення, стандартне відхилення, сума і розмах значень, кількість охоплених пікселів та площа полігона (табл. 4.1, рис. 4.7).

Таблиця 4.1 – Атрибутивні характеристики векторного шару аномальних зон

№	Атрибут	Характеристика
1	ID	Унікальний ідентифікатор полігону
2	Area	Площа аномальної зони
3	Pixels	Кількість пікселів у межах полігону
4	Min	Мінімальне значення растра
5	Max	Максимальне значення растра
6	Mean	Середнє значення растра
7	StdDev	Стандартне відхилення
8	Range	Розмах значень
9	Sum	Сума значень пікселів

Атрибутивне наповнення виконується безпосередньо під час створення вихідного шару та не потребує окремого обчислення зональної статистики. Сформовані характеристики дають змогу ранжувати аномальні зони за інтенсивністю прояву, здійснювати їх фільтрацію за площею та кількістю пікселів, порівнювати результати різночасових спостережень і виконувати атрибутивні та просторові запити в геоінформаційному середовищі (Longley et al., 2015; Bolstad, 2019).



vectorized — Features Total: 704, Filtered: 704, Selected: 0

	id	min	max	mean	stddev	sum	range	count	area
1	1	45,500	46,500	46,037	0,27	59756,268	0,999	1298	129800,000
2	2	45,501	46,499	45,939	0,263	56183,951	0,998	1223	122300,000
3	3	47,509	48,499	48,016	0,268	37884,873	0,99	789	78900,000
4	4	46,501	47,499	46,958	0,285	32870,715	0,998	700	70000,000
5	5	45,500	46,499	46,009	0,259	31700,145	0,999	689	68900,000
6	6	46,501	47,498	47,049	0,289	30911,145	0,997	657	65700,000
7	7	46,501	47,500	46,996	0,279	30735,631	0,998	654	65400,000
8	8	45,509	46,497	46,062	0,282	29893,991	0,988	649	64900,000
9	9	48,515	49,379	48,955	0,224	29960,725	0,865	612	61200,000
10	10	47,507	48,498	47,975	0,286	29312,906	0,991	611	61100,000
11	11	47,502	48,500	47,971	0,284	29022,725	0,998	605	60500,000

Рис. 4.7. Фрагмент атрибутивної таблиці сформованого векторного шару аномальних зон

Вихідний шар може бути збережений у стандартних форматах векторних геопросторових даних, зокрема ESRI Shapefile та GeoJSON. Поєднання геометрії полігонів зі статистичними характеристиками вихідного растра забезпечує сумісність результатів з іншими наборами геопросторових даних і можливість їх подальшого використання для картографічного представлення, кількісного аналізу та моніторингу просторово-часових змін.

4.3. Апробація плагіна на різнотипних супутникових даних

Апробацію розробленого плагіна проведено на супутникових даних, що відрізняються за фізичною природою вимірюваних параметрів, діапазоном значень, просторовою розрізненністю та характером просторової мінливості. Вибір різнотипних супутникових матеріалів дозволяє перевірити можливість застосування реалізованої процедури до кількісних растрових показників із відмінними одиницями вимірювання та статистичними розподілами. При цьому оцінюється не однаковість змістової інтерпретації результатів, а стабільність програмної послідовності їх опрацювання та можливість просторової локалізації аномальних значень для кожного використаного набору даних.

4.3.1. Методика та критерії апробації плагіна

Для апробації сформовано вибірку різнотипних похідних растрових продуктів дистанційного зондування Землі. До вибірки включено інтерферометричні растри зміщень земної поверхні, отримані за даними Sentinel-

1, растри температури земної поверхні, сформовані за тепловими каналами Landsat 8/9, а також растри індексу NDWI, розрахованого за багатоспектральними зображеннями Sentinel-2 і PlanetScope.

Для кожного набору даних застосовано передбачену архітектурою плагіна послідовність операцій. Вона охоплювала завантаження відповідного растрового шару, статистичне оцінювання розподілу його значень, установлення порогових параметрів, локалізацію аномальних пікселів і формування просторово зв'язних аномальних зон. Значення порогів і параметри просторової фільтрації визначено окремо для кожного набору.

Оцінювання результатів апробації здійснювали за такими критеріями:

1. працездатність алгоритму під час опрацювання растрів із різними одиницями вимірювання та діапазонами значень;
2. можливість адаптивного налаштування порогових і просторових параметрів відповідно до властивостей вхідних даних;
3. просторова зв'язність отриманих зон і можливість відокремлення системних відхилень від поодиноких піксельних значень;
4. коректність збереження геоприв'язки растрових і векторних результатів;
5. придатність сформованих матеріалів для подальшого картографічного представлення та геоінформаційного аналізу.

Під час апробації базова структура обчислювальної процедури залишалася незмінною, тоді як параметри виявлення адаптували до властивостей конкретного набору даних. Такий підхід дав змогу оцінити універсальність не на рівні декларативного припущення, а за результатами практичного застосування плагіна до різнотипних супутникових матеріалів.

4.3.2. Результати апробації на різнотипних супутникових даних

Результати проведеної апробації розглянуто відповідно до фізичного змісту аналізованих показників і характеру просторового прояву виділених відхилень. Такий виклад дає змогу порівняти особливості застосування плагіна

до інтерферометричних, теплових і багатоспектральних матеріалів та оцінити характер отриманих результатів (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Апробація інструмента на різних типах супутникових даних

Джерело даних	Тип растра	Аналізований показник	Виявлені аномалії
Sentinel-1 (ESA)	Інтерферометричний	Вертикальні зміщення земної поверхні	Деформаційні зони та ділянки просідання
Landsat 8/9 (NASA/USGS)	Тепловий	Температура земної поверхні (LST)	Теплові аномалії
Sentinel-2 (ESA)	Спектральний індекс	NDWI	Аномалії зволоження
PlanetScope (Planet Labs)	Спектральний індекс	NDWI	Локальні ділянки підвищеного зволоження

За інтерферометричними растрами Sentinel-1, сформованими за результатами D-InSAR-опрацювання, локалізовано ділянки з позитивними та негативними відхиленнями величин зміщень від фонового рівня досліджуваної території. Виділені зони відображають просторову неоднорідність розподілу зміщень земної поверхні та нерухомих об’єктів і можуть використовуватися для подальшого зіставлення з матеріалами геологічних, геофізичних та інженерних спостережень (Minh, Hanssen & Rocca, 2020; Hudak, Kril & Zatserkovnyi, 2025).

За тепловими растрами Landsat 8/9 виявлено ділянки з підвищеними та зниженими значеннями температури земної поверхні відносно її фонового розподілу. Виділені температурні аномалії відрізнялися за площею, конфігурацією та просторовою зв’язністю, що дало змогу охарактеризувати неоднорідність теплового стану досліджуваних територій (Keesstra et al., 2018; Kravchenko, 2023).

Опрацювання растрів індексу NDWI, розрахованого за зображеннями Sentinel-2 і PlanetScope, забезпечило локалізацію ділянок із нетипово підвищеними значеннями показника зволоження (McFeeters, 1996). Порівняння результатів показало, що просторова роздільна здатність вихідних матеріалів впливає на деталізацію, площу та конфігурацію виділених зон. Дані PlanetScope

забезпечили детальніше відображення локальних відхилень, тоді як матеріали Sentinel-2 дають змогу представити їх просторовий розподіл у більш узагальненому вигляді (Kril & Orlenko, 2022).

Приклади результатів застосування розробленого інструмента до різних типів супутникових даних наведено на рис. 4.8 (Hudak et al., 2025).

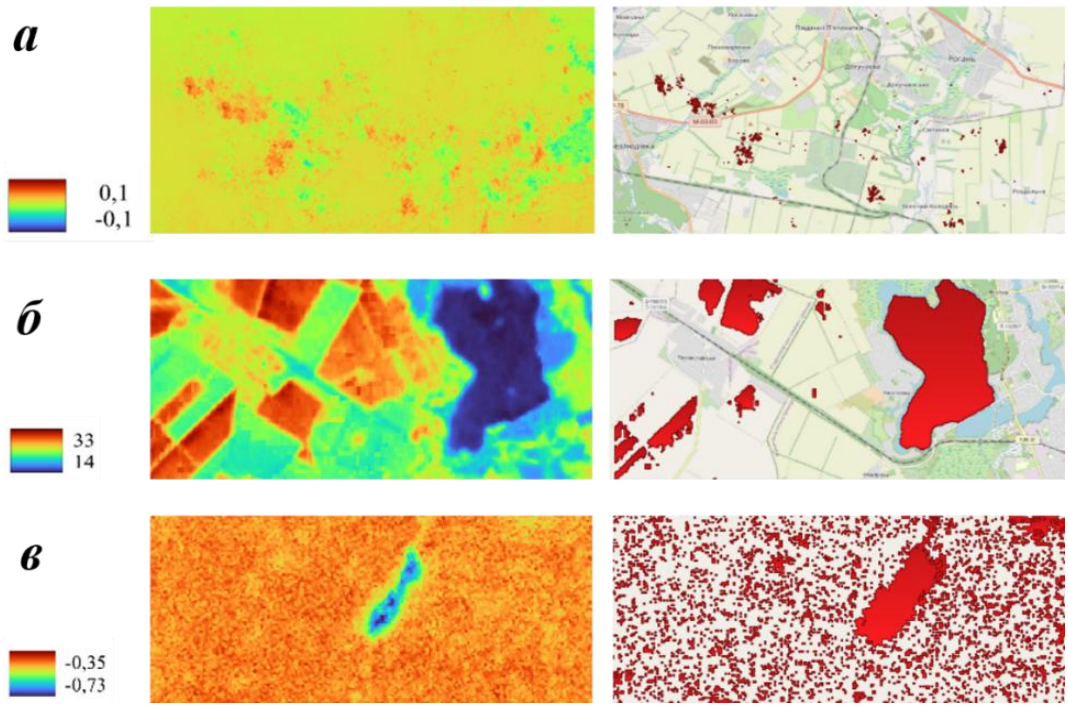


Рис. 4.8. Результати автоматизованого виявлення аномалій на різних типах супутникових даних: *а – інтерферометричний растр вертикальних зміщень Sentinel-1; б – растр температури земної поверхні Landsat 8/9; в – карта аномалій зволоження за індексом NDWI, розрахованим на основі даних Sentinel-2 та PlanetScope*

Для розглянутих наборів даних процедура оброблення залишалася незмінною та включала статистичне виявлення аномальних значень, формування бінарної маски аномалій, векторизацію виділених зон та автоматичне формування їх атрибутивних характеристик. Незалежно від фізичної природи вихідних даних результатом роботи інструмента виступав шар аномальних зон, придатний для подальшого геоінформаційного аналізу, інтеграції з іншими просторовими даними та використання в задачах моніторингу природних і техногенних процесів.

4.4. Застосування плагіна для виявлення аномалій стану території Києво-Печерської лаври

Після апробації на різнотипних супутникових даних розроблений плагін застосовано для аналізу території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра». Метою цього етапу є виявлення просторових аномалій стану земної поверхні за багаторічними супутниковими спостереженнями, аналіз їх просторово-часової динаміки та зіставлення з незалежними матеріалами моніторингу. З огляду на просторову розрізненність використаних зображень дослідження орієнтовано на виявлення зональних змін умов зволоження, рослинного покриву та інших характеристик земної поверхні, які можуть розглядатися як непрямі індикатори змін геологічного середовища.

У межах прикладного дослідження результати статистичного виявлення аномалій використано безпосередньо в растровому поданні. Після просторового узгодження з іншими вхідними шарами їх включали до геопросторового набору даних у вигляді бінарної ознаки *Anomaly*, без перетворення у векторну форму.

4.4.1. Виявлення аномалій стану земної поверхні за спектральними індексами

Для аналізу стану земної поверхні на досліджуваній території Києво-Печерської лаври використано багаторічні ряди оптичних супутникових зображень Landsat і Sentinel-2. На їх основі розраховано комплекс спектральних індексів, що характеризують стан рослинного покриву, умови зволоження та властивості поверхневого покриву (Гудак і Маргес, 2025).

Вибір спектральних показників здійснено з урахуванням інженерно-геологічних особливостей території. Одним із чинників розвитку небезпечних процесів у межах Лаврських схилів є порушення водного режиму, проявами якого можуть бути перезволоження ґрунтів, зміни поверхневого стоку та трансформація стану рослинного покриву (Комплексне дослідження, 2023). Відповідно, пріоритетного значення набули індекси, чутливі до просторових змін зволоження, фізіологічного стану рослинності та характеристик земної

поверхні. Значення таких показників розглянуто як непрямі дистанційні ознаки змін стану геологічного середовища, а не як безпосереднє підтвердження конкретного геологічного процесу (Marhes et al., 2025).

Спектральні індекси обчислено за нормалізованими співвідношеннями відбивної здатності відповідних каналів супутникових зображень. Використання нормалізованих показників зменшує вплив загальних відмінностей у спектральній яскравості та підвищує порівнюваність результатів різночасових спостережень за умови належного попереднього опрацювання вихідних матеріалів. У дослідженні використано індекси NDVI, GNDVI, SAVI, NDMI, MNDWI, NDPI, NDTI та NDSI (Marhes & Hudak, 2025; Marhes et al., 2025). Підготовку супутникових матеріалів і розрахунок індексів виконано в середовищі Google Earth Engine (рис. 4.9).

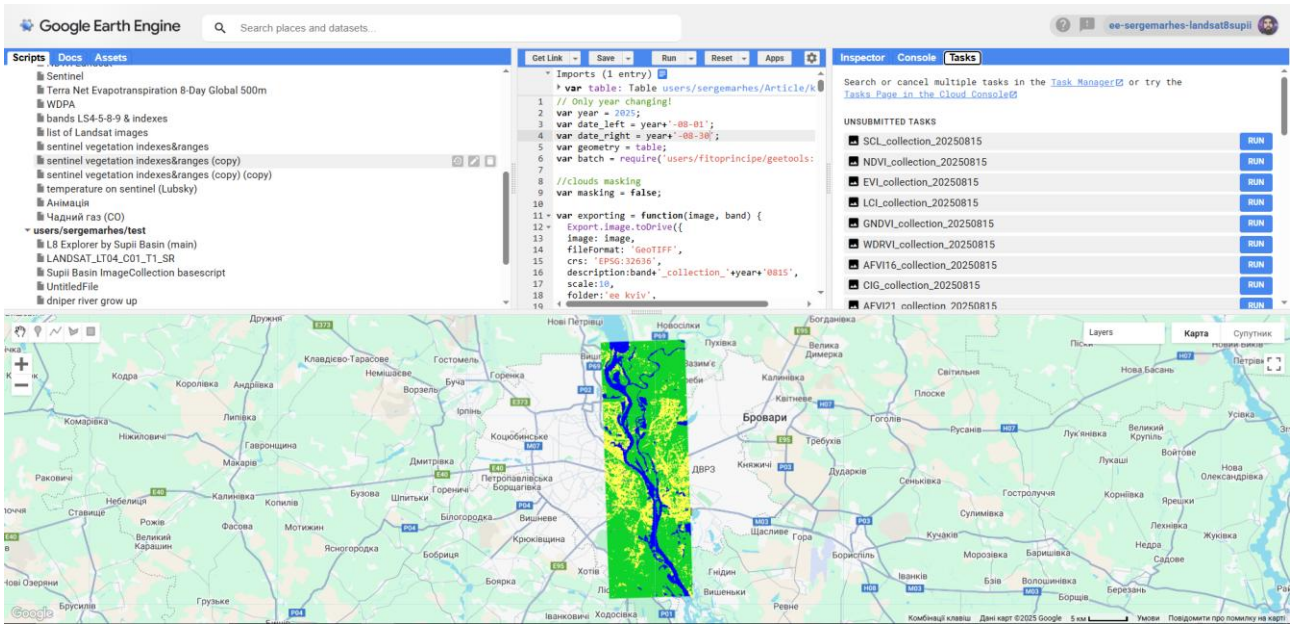


Рис. 4.9. Фрагмент автоматичної обробки супутникових зображень у середовищі Google Earth Engine

Виявлення аномальних значень здійснено окремо для кожного спектрального індексу за статистичним критерієм, реалізованим у розробленому плагіні. Порогові межі встановлено на основі аналізу статистичного розподілу та просторової мінливості значень відповідного показника в межах досліджуваної території (табл. 4.3). При цьому враховано напрям відхилення, що має змістове значення для конкретного індексу.

Таблиця 4.3 – Порогові значення спектральних індексів, використані для виявлення аномалій на території Києво-Печерської лаври

Індекс	Нижня порогова межа (від −1)	Верхня порогова межа (до 1)	Інтерпретаційне призначення
NDVI	0	0,85	Оцінка стану та деградації рослинного покриву
GNDVI	−0,4	0,8	Виявлення змін фотосинтетичної активності рослинності
SAVI	−0,05	0,6	Аналіз рослинності на ділянках із відкритим ґрунтом
NDMI	−0,25	0,5	Виявлення зон підвищеного зволоження ґрунтів і рослинності
MNDWI	−0,7	0,5	Локалізація ділянок накопичення поверхневих вод та перезволоження
NDPI	0	0,7	Ідентифікація заболочених і надмірно зволожених ділянок
NDTI	−0,35	0,1	Виявлення трансформованих поверхонь і зон активного поверхневого змиву
NDSI	0	0,42	Оцінка змін водного режиму та властивостей поверхневого покриву

Використаний комплекс індексів забезпечив диференційовану характеристику стану земної поверхні. Індекси NDVI, GNDVI і SAVI застосовано для оцінювання стану рослинного покриву та його просторової неоднорідності. Індекси NDMI, MNDWI і NDPI використано для виявлення змін умов зволоження, тоді як NDTI і NDSI залучено для характеристики трансформацій поверхневого покриву та пов’язаних із ними змін його спектральних властивостей (рис. 4.10).

Особливе значення для дослідження мали NDMI, MNDWI і NDPI, оскільки вони характеризують різні аспекти водного режиму території. Їх спільний аналіз дав змогу виявляти ділянки з нетиповими умовами зволоження, наявністю поверхневої вологи та змінами стану ґрунтового і рослинного покриву. Це має важливе значення для території Лаврських схилів і ділянок, розташованих над

підземними спорудами Заповідника, де перерозподіл вологи може впливати на стан ґрунтового масиву (Marhes et al., 2025).

Інтерпретацію результатів здійснено не лише за величиною відхилення окремого пікселя, а й з урахуванням просторової зв'язності виділених ділянок та їх повторюваності в різночасових матеріалах. Це дало змогу зменшити вплив поодиноких статистичних відхилень і зосередити аналіз на просторово сформованих зонах зі стійкими змінами спектральних характеристик. Застосування плагіна до підготовлених растрів забезпечило автоматизовану локалізацію таких зон і формування їх просторового представлення.

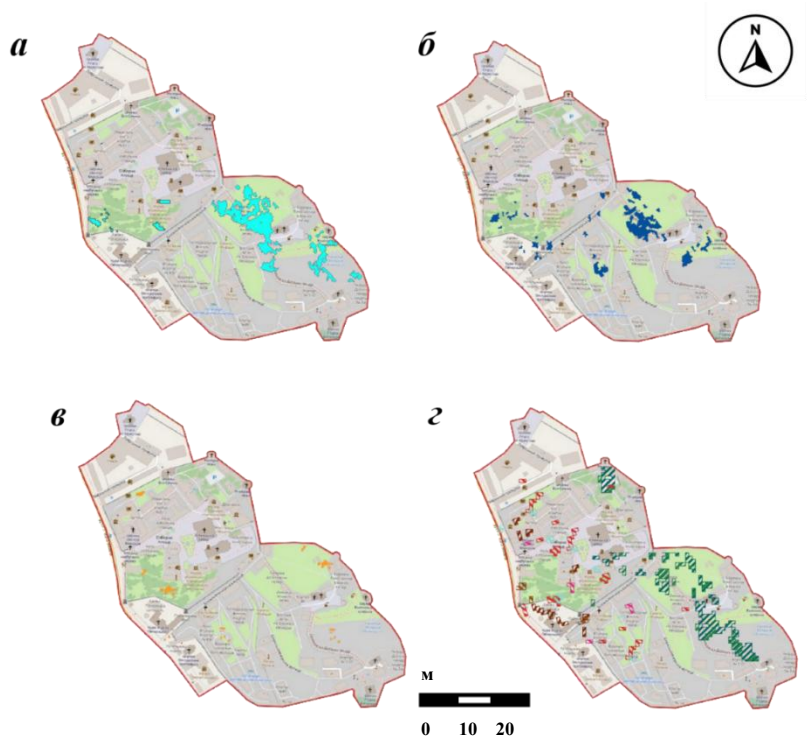


Рис. 4.10. Результати автоматизованого виявлення геопросторових аномалій на території Києво-Печерської лаври за комплексом спектральних індексів: *а – зони підвищеного зволоження земної поверхні за результатами аналізу NDMI, MNDWI та NDPI; б – зони спектральних ознак засолення ґрунтового покриву за результатами аналізу NDSI; в – зони спектральних ознак активізації водно-ерозійних процесів за результатами аналізу NDTI; г – узагальнені аномальні зони, сформовані за сукупністю спектральних показників*

Виявлені аномальні зони характеризують просторові зміни умов зволоження, стану рослинного покриву та спектральних властивостей земної поверхні. Найбільшу їх концентрацію встановлено на ділянках зі складними умовами поверхневого й підземного водообміну. Просторовий розподіл таких зон загалом узгоджується з відомими інженерно-геологічними особливостями території Києво-Печерської лаври (Комплексне дослідження, 2023), однак не є самостійною підставою для визначення виду або причини розвитку конкретного геологічного процесу (Marhes et al., 2025).

4.4.2. Аналіз просторово-часової динаміки та верифікація виявлених аномалій

Для оцінювання просторово-часової стійкості виявлених аномалій використано архів супутникових спостережень за 1985–2025 рр., сформований за матеріалами Landsat-5, Landsat-8/9 і Sentinel-2 (Marhes et al., 2025). Залучення різночасових даних дало змогу простежити зміни просторового положення, конфігурації та площі аномальних зон, а також зіставити результати дистанційного аналізу з матеріалами геофізичних, інженерно-геологічних і наземних спостережень.

Особливу увагу приділено території саду Ближніх печер, розташованого на південному схилі Лаврського яру. За результатами різночасового аналізу встановлено просторово стійкі аномальні зони підвищеного зволоження, приурочені до локального пониження в середній частині саду та ділянок поблизу підпірних стін і схилових конструкцій. Їх конфігурація відображає просторову неоднорідність умов перерозподілу вологи в межах досліджуваної території.

За різночасовими супутниковими матеріалами встановлено сезонну й багаторічну мінливість аномальних зон. У періоди підвищеного зволоження спостерігалося збільшення їх площі та об'єднання окремих осередків у просторово зв'язні структури, тоді як у посушливі періоди площа таких зон зменшувалася. Водночас положення основних осередків залишалося відносно сталим, що може бути пов'язано з особливостями рельєфу, геологічної будови та

водообміну території (рис. 4.11). У періоди максимального водонасичення просторово зв'язні аномальні зони поширювалися в напрямку схилів і ділянок розташування підземних споруд, насамперед у бік печерного поля, дзвіниці та оборонної стіни. Цей напрям узгоджується з установленим за багаторічними спостереженнями механізмом зволоження території, за яким тала та інфільтраційна вода мігрує латеральними шляхами вздовж садової доріжки, акумулюється в локальному пониженні середньої частини саду й далі розтікається до печерних лабіринтів. Це засвідчує інформативність різночасових супутникових матеріалів для аналізу просторових змін умов зволоження та перерозподілу поверхневих і підземних вод (Черевко та ін., 2022).

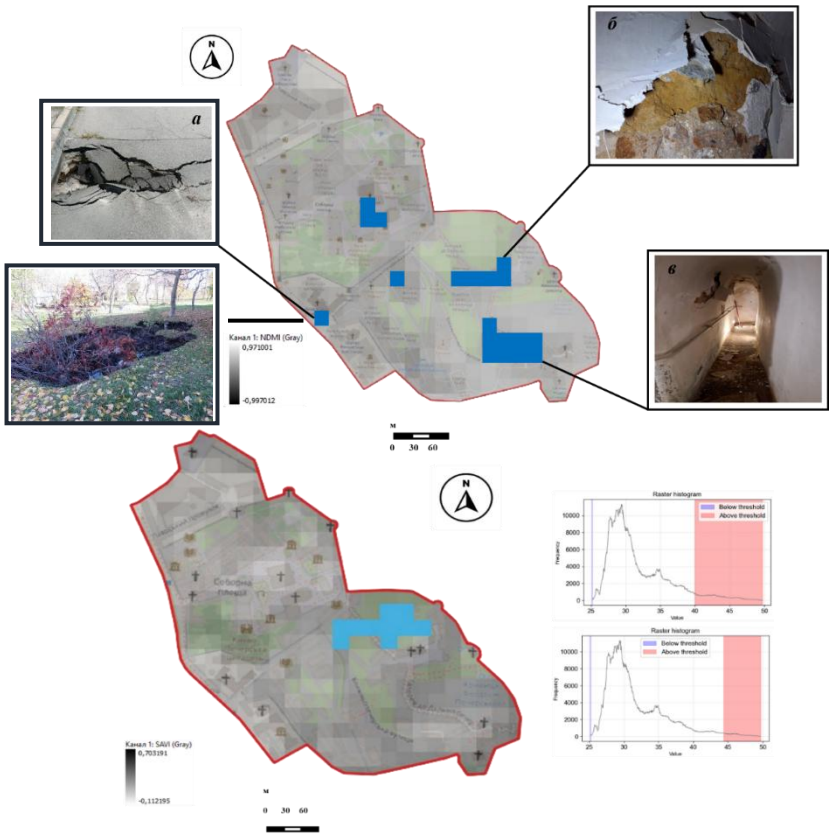


Рис. 4.11. Просторовий розподіл аномальних зон підвищеного зволоження та основні напрями їх поширення

Встановлені просторові закономірності загалом узгоджуються з результатами геофізичних та інженерно-геологічних досліджень території саду Ближніх печер. За матеріалами електрометричних досліджень і наземних спостережень визначено напрями латеральної міграції вологи та зони

розущільнення ґрунтів, просторове положення яких відповідає локалізації частини дистанційно виявлених аномалій (рис. 4.12) (Рыбин та ін., 1991; Левашов та ін., 2008; Черевко, Кріль та Безродний, 2024). Просторово-часова узгодженість цих матеріалів із динамікою аномальних зон підтверджує можливість використання дистанційно встановлених відхилень як індикаторів змін стану геологічного середовища.

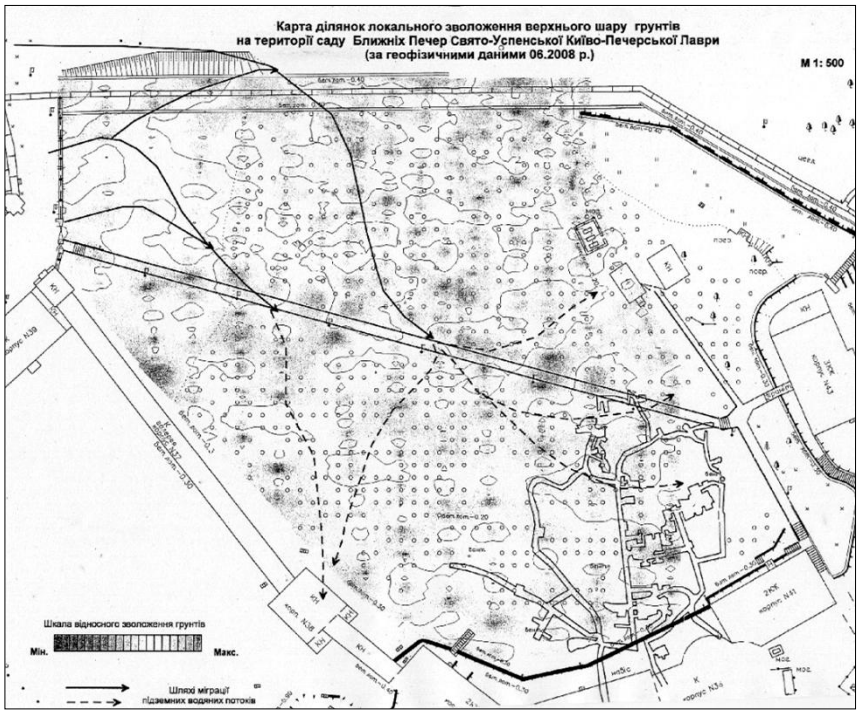


Рис. 4.12. Лінії потоків ґрунтових вод в саду Ближніх печер за даними геофізичних досліджень у червні 2008 р. (Черевко, Куциба та Моргун, 2015)

Архівні матеріали інженерно-геологічного моніторингу свідчать про активізацію деформаційних проявів і виникнення аварійних ситуацій у періоди підвищеного водонасичення схилів та підземних виробок. Зокрема, перезволоження ґрунтового масиву внаслідок сніготанення й інфільтрації атмосферних опадів спричинило вивал ґрунту в підземну галерею у 2005 р., а в березні 2013 р. — аварійне просочування води в печери з подальшим тріщиноутворенням і деформаціями галерей. Для контролю гідрогеологічного режиму з 2007 р. облаштовано мережу режимних свердловин, спостереження за якими підтвердили щорічне весняне розширення площі водоносного горизонту (Черевко, 2016; Черевко та Куциба, 2011). Просторово-часова узгодженість

наземних та інструментальних спостережень із динамікою дистанційно виявлених зон підтверджує інформативність установлених відхилень як індикаторів змін стану геологічного середовища.

Для детальнішого представлення результатів відібрано два показові випадки просторової відповідності між аномальними значеннями зеленого нормалізованого різницевого вегетаційного індексу GNDVI та задокументованими порушеннями земної поверхні. Індекс GNDVI характеризує стан і фотосинтетичну активність рослинного покриву, а його просторові зміни можуть опосередковано відображати реакцію рослинності на локальні відмінності умов зволоження та стану поверхні.

Перший випадок відображає локалізацію аномальної зони та її просторову відповідність матеріалам польової фіксації задокументованого провалу земної поверхні (рис. 4.13а).

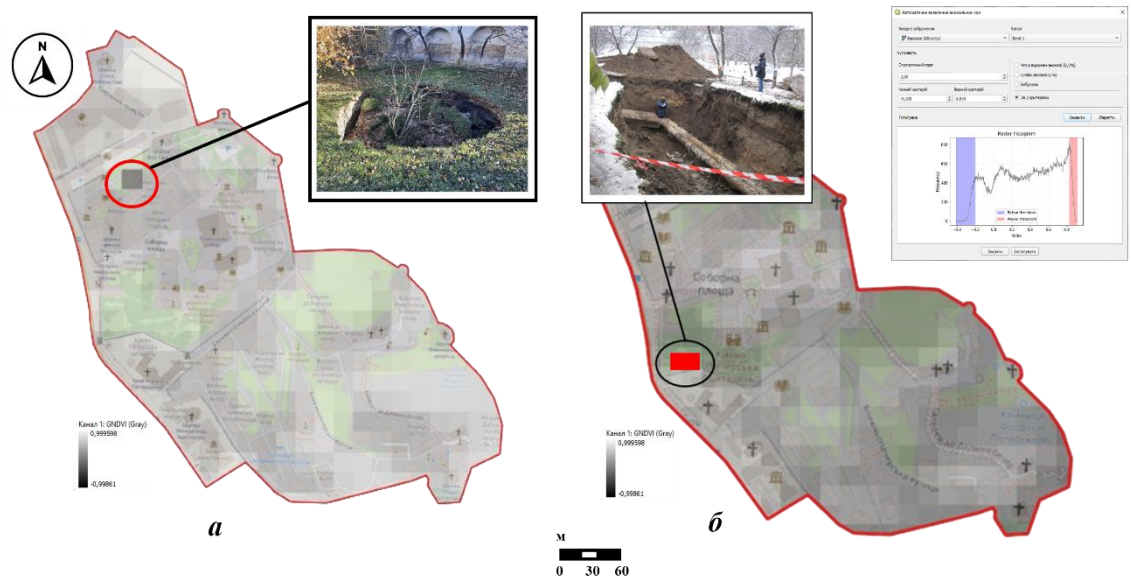


Рис. 4.13. Просторова верифікація аномальних зон, виявлених за індексом GNDVI на території Києво-Печерської лаври: *а – локалізація аномальної зони та її зіставлення з матеріалами польової фіксації задокументованого провалу земної поверхні; б – статистичне виявлення аномальної зони за встановленими пороговими межами GNDVI та її зіставлення з матеріалами польової фіксації порушення земної поверхні поблизу корпусу К-6*

Другий випадок стосується ділянки поблизу корпусу № 6, де в 2023 р. за результатами польових обстежень задокументовано провал земної поверхні з локальним просіданням та оголенням підземних комунікацій, що вказувало на порушення стійкості ґрунтового масиву. Локалізована аномальна зона просторово узгоджується з місцем задокументованого деформаційного прояву (рис. 4.13б).

Просторове зіставлення результатів дистанційного аналізу з матеріалами польових та інженерно-геологічних спостережень засвідчило приуроченість виявлених аномалій до ділянок, де було зафіксовано перезволоження ґрунтів, порушення поверхневого стоку та локальні деформаційні прояви (Левашов Піщаний та Корчагін, 2005; Черевко, Куциба та Моргун, 2015). Зокрема, просторова відповідність аномальної зони та задокументованого провалу поблизу корпусу № 6 підтверджує інформативність спектральних характеристик рослинного покриву для попередньої локалізації ділянок зі зміненим станом земної поверхні. Дистанційно виявлені аномалії характеризують не геометрію окремого провалу або іншого малорозмірного деформаційного прояву, а ширшу зону зміненого стану земної поверхні. Такий характер результатів відповідає просторовій розрізненності використаних супутникових матеріалів і прийнятому масштабу аналізу. Відповідно, просторова приуроченість аномальних зон до задокументованих проявів розглядається як підтвердження їх інформативності, тоді як змістова інтерпретація потребує врахування геологічної будови, гідрогеологічних умов, рельєфу та техногенного навантаження.

Отримані результати підтвердили придатність багаторічних супутникових спостережень для оцінювання просторової локалізації, конфігурації, площі та часової стійкості аномальних зон.

4.5. Інтеграція результатів виявлення аномалій у систему оцінювання геологічної нестійкості

Розроблений плагін у межах даного дослідження використано для формування окремої вхідної ознаки, що характеризує геопросторові аномалії

стану земної поверхні. На відміну від факторних шарів, які відображають відносно сталі природні й техногенні умови території, ця ознака характеризує просторово локалізовані відхилення спектральних властивостей поверхні, виявлені за результатами різночасових супутникових спостережень.

Аномальні зони, відібрані за результатами статистичного аналізу та змістової перевірки, приведено до регулярної сітки геопросторового набору даних із розміром комірки 5 × 5 м. Для кожної комірки сформовано бінарну ознаку *Anomaly*: значення 1 присвоєно коміркам, віднесеним до аномальних зон, а значення 0, усім іншим коміркам. Ознаку сформовано безпосередньо в растровому поданні, узгодженому за просторовою структурою з іншими каналами вхідного масиву. Передбачену функціональністю плагіна векторизацію використовували окремо для картографічного представлення та просторового аналізу виявлених зон, однак вона не була етапом формування ознаки *Anomaly*.

Ознака *Anomaly* фіксує наявність дистанційно виявлених статистично нетипових змін стану земної поверхні, проте не визначає їх походження та не дає змоги встановити конкретний вид геологічного процесу. Тому її включено до моделі як один із взаємодоповнювальних компонентів комплексного набору ознак. Такий підхід забезпечує врахування просторової неоднорідності сучасного стану поверхні поряд із характеристиками геологічної будови, рельєфу, гідрогеологічних умов, техногенного навантаження та результатами режимних спостережень.

Методично важливим є розмежування функціонального призначення використаних інформаційних джерел. Матеріали інженерно-геологічних, геофізичних і наземних спостережень залучали для змістової перевірки дистанційно виявлених аномалій до їх включення у вхідний набір даних. Перевірка полягала в оцінюванні просторової узгодженості виділених зон із відомими особливостями геологічного середовища та стану досліджуваної території. Водночас ці матеріали не використовували як незалежні дані для подальшого оцінювання результатів нейромережевого моделювання. Таке

розмежування запобігає одночасному використанню тих самих інформаційних джерел для формування вхідних ознак та незалежної перевірки моделі. Сформовану ознаку *Anomaly* як один із вхідних каналів, використано для нейромережевого моделювання геологічної нестійкості території, розглянутого в розділі 5.

Висновки до розділу 4

У розділі розроблено, програмно реалізовано й апробовано геоінформаційний інструмент автоматизованого виявлення аномальних зон за числовими растровими даними.

1. Розроблено плагін «Anomalies to Contours» для програмного середовища QGIS, який реалізує статистичне виявлення аномальних значень, формування бінарної растрової маски, полігонізацію просторово суміжних аномальних пікселів та автоматичне обчислення геометричних і статистичних характеристик виділених зон.

2. Функціональність плагіна апробовано на інтерферометричних, теплових і багатоспектральних растрових даних. Застосування єдиної послідовності опрацювання підтвердило придатність алгоритму для аналізу числових растрів різного походження за умови адаптивного встановлення порогових параметрів та окремої змістової інтерпретації результатів.

3. За багаторічними матеріалами Landsat і Sentinel-2 на території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» виявлено просторово локалізовані відхилення спектральних характеристик земної поверхні. Їх зіставлення з матеріалами інженерно-геологічних, геофізичних і наземних спостережень засвідчило просторову узгодженість окремих аномальних зон із ділянками перезволоження та задокументованими порушеннями земної поверхні.

4. За результатами статистичного аналізу та змістової перевірки сформовано бінарну растрову ознаку *Anomaly*, яку приведено до регулярної сітки та включено до геопросторового набору даних як один із вхідних каналів нейромережевої моделі.

Список використаних джерел до розділу 4:

Гудак, В., & Маргес С. (2025). Автоматизований аналіз супутникових знімків в QGIS: розробка плагіна для ідентифікації аномальних зон. Авторська редакція збірника тез *XV Всеукраїнської молодіжної наукової конференції - школи «Сучасні проблеми наук про Землю»*, Київ, 10-11 квітня 2025. URI: www.geol.univ.kiev.ua/docs/conf/2025/conf_univ_apr_2025.pdf

Гудак, В., Маргес С., & Зацерковний, В. (2025). Розробка інтерактивного засобу виявлення та аналізу геопросторових аномалій у QGIS на основі супутникових даних. *Географічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*, 6(6). DOI: https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2025.6.13

Демчишин М.Г., Кріль Т.В., Черевко І.А. Вдосконалення систем інженерного захисту території Національного історико-культурного заповідника «Києво-Печерська Лавра». *Звіт про НДР*. Інститут геологічних наук НАН України. Київ, 2017. 128 с.

Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій (2023). Наук. кер. Д. О. Бугай. Науковий звіт. Київ, 125 с.

Левашов, С. П., Піщаний, Ю. М., & Корчагін, І. М. (2005). Геофізичні вишукування ділянки саду Свято-Успенської Києво-Печерської лаври: звіт про НДР. Київ: *ТОВ НВП «Геопром».* 26 с.

Левашов, С. П., Піщаний, Ю. М., & Корчагін, І. М. (2008). Геофізичне обстеження території Свято-Успенської Києво-Печерської лаври в районі саду над Ближніми печерами: звіт про НДР. Київ: ТОВ «Геолог-Буд». 47 с.

Рыбин, В. Ф., Скальский, А. С., Куцыба, В. А., & др. (1991). Комплексные исследования с целью охраны Ближних пещер. *Препринт ИГН АН УССР*, 91-8. Киев. С. 8.

Черевко, І. А., & Куциба, В. О. (2011). Дослідження мікроклімату та інженерно-геологічних умов Ближніх печер з метою визначення оптимальних

умов експлуатації та збереження. *Дива печер лаврських (2-ге вид., доп.)*. Київ. 225 с.

Черевко, І. А., Куциба, В. О., & Моргун, І. П. (2015). Гідрогеологічні умови території Ближньопечерного пагорбу, їх вплив на стан печер та засоби регуляції. *Болховітіновський щорічник 2013/2014*. Київ.

Черевко І.А. (2016) Інженерно-геологічні умови Дальньопечерного пагорбу в контексті збереження об'єктів культурної спадщини. *Збір. наук. праць «Могилянські читання-2015»*. Київ:НКПІКЗ. С. 306-313.

Черевко, І., Зацерковний, В., Трофименко, П., Пампуха, І., Попков, Б., & Гудак, В. (2022). Застосування бази геоданих режимних спостережень за гідрогеологічними умовами території Києво-Печерської лаври та її аналіз. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 3(98)*, 92-103. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.12

Черевко, І. А., Кріль, Т. В., & Безродний, Д. А. (2024). Неруйнівні методи встановлення причинно-наслідкового зв'язку аварій водонесучих мереж та умов збереження архітектурної спадщини. *Геологічний журнал*, 3(388), 11-30. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.3.307769

Benedek, C., & Boccignone, G. (2017). Pattern recognition in image analysis. *Cham: Springer*.

Bolstad, P. (2019). GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems (6th ed.). *Eider Press*.

Congedo, L. (2021). Semi-automatic classification plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. https://doi.org/10.21105/joss.03172

Gechlik, J., & Sedrakyan, H. (2024). Gauss's area formula for irregular shapes. *The Ohio Journal of School Mathematics*, 97(1), 12–29. https://doi.org/10.18061/ojsm.4172

Guo, H., Wang, H., Song, X., & Ruan, Z. (2023). Anomaly Detection of Remote Sensing Images Based on the Channel Attention Mechanism and LRX. *Applied Sciences*, 13(12), 6988. https://doi.org/10.3390/app13126988

Hudak, V., Marhes, S., Zatserkovnyi V., & De Donatis, M. (2025). Methodology for the automated detection of anomalous geospatial zones in satellite imagery using statistical analysis and a custom QGIS plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 3(110), 95-103. https://doi.org/10.17721/1728-2713.110.13

Hudak, V., Kril, T., & Zatserkovnyi, V. (2025). Remote Sensing Analysis of Vertical Surface Displacements as an Indicator of Underground Structure Deformations. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 1(108), 94-102. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13

Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., et al. (2018). The role of soil science in addressing global challenges. *SOIL*, 4(2), 145–156.

Kotsiubivska, K., & Tymoshenko, V. (2019). Математичні методи обробки зображень. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері,* 2(1), 41–54. https://doi.org/10.31866/2617-796x.2.1.2019.175653

Kravchenko, K. (2023). Urbanization and soil degradation: Challenges for sustainable development. Man and Environment. *Issues of Neoecology*, 38(1), 22–34.

Kril, T., & Orlenko, T. (2022). Surface dynamics assessment as a landslide hazard factor by remote sensing data. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580246

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Systems and Science* (4th ed.). Wiley.

Marhes, S. (2025). AutoContour QGIS Plugin (Version 1.0) [Computer software]. GitHub. https://github.com/rnrhs/autocountour_qgis_plugin.

Marhes S., & Hudak, V. (2025). A GIS-based open-source tool for experimental detection of geospatial anomalies in geoecology. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2025*: тези доповідей XX Міжнарод. конф. (м. Чернігів, 10–12 листопада 2025 р.). Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – 107 с. URI: https://ir.stu.cn.ua/items/d8944c66-6730-4d00-8c7a-7e88e033d44b

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.

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.

Orfeo ToolBox: Remote modules, deep learning, QGIS integration: Documentation. (n.d.). https://www.orfeo-toolbox.org. (Accessed September 9, 2025).

Page, T. R. (2018). Statistical methods for big data analysis. *Hoboken: Wiley*.

Racetin, I., & Krtalić, A. (2021). Systematic Review of Anomaly Detection in Hyperspectral Remote Sensing Applications. *Applied Sciences,* 11(11), 4878. https://doi.org/10.3390/app11114878

Zhu, Z., Wang, S., & Woodcock, C. E. (2017). Continuous anomaly detection in satellite image time series based on Z-score. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS 2017), 3364–3367. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127685

РОЗДІЛ 5. НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОЛОГІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ ТЕРИТОРІЇ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ

Оцінювання геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври потребує врахування складної взаємодії природних і техногенних чинників, просторової неоднорідності геологічного середовища та динамічних змін його стану. Інтегральні балові методи забезпечують узагальнення різнорідних факторів у межах єдиної оцінки, однак ґрунтуються переважно на їх адитивному поєднанні та не повною мірою відображають нелінійні залежності й просторові зв'язки між окремими ділянками території. Водночас розвиток екзогенних геологічних процесів визначається не лише локальним поєднанням несприятливих умов, а й взаємодією просторово пов'язаних елементів природно-техногенної системи.

Необхідність врахування локального та просторового контексту зумовлює доцільність застосування методів глибокого навчання, здатних опрацьовувати багатоканальні геопросторові дані та встановлювати складні закономірності їх розподілу. У межах дослідження нейромережеве моделювання розглядається як засіб нелінійного просторового уточнення вихідної інтегральної оцінки геологічної нестійкості з урахуванням природних і техногенних факторів, характеристик гідрогеологічного режиму, показників деформацій та геопросторових аномалій.

5.1. Формування цільової оцінки та ознакового простору моделі

Побудова нейромережевої моделі потребує визначення цільової змінної, що кількісно характеризує рівень геологічної нестійкості елементарних просторових одиниць території та використовується для формування навчальних міток. Основою такої оцінки є інтегральний показник, сформований за системою природних і техногенних факторів геоінформаційної бази «LAVRA-GEO». Застосування фізично інтерпретованої балової оцінки як цільової змінної

забезпечує змістовний зв’язок між результатами моделювання та встановленими інженерно-геологічними умовами території.

Вхідний набір моделі, крім факторів, що визначають інтегральну цільову оцінку, охоплює додаткові характеристики сучасного стану геологічного середовища: просторово-часові показники рівнів ґрунтових вод, дані про деформації та ознаку геопросторової аномалії. Зазначені характеристики не включаються безпосередньо до розрахунку цільового індексу, а використовуються як самостійні вхідні ознаки. Таке розмежування дає змогу оцінити зв’язок між вихідною баловою характеристикою нестійкості, динамічними змінами геологічного середовища та просторовим контекстом території.

5.1.1. Склад і функціональне призначення вхідних ознак

Ознаковий простір нейромережевої моделі сформовано з врахуванням багатофакторної природи геологічної нестійкості та необхідності одночасного відображення відносно сталих умов території, динамічних змін геологічного середовища і просторових проявів його сучасного стану. До складу вхідних даних включено три функціонально відмінні групи характеристик: природні й техногенні фактори геоінформаційної бази «LAVRA-GEO», динамічні показники режимних спостережень та ознаку геопросторової аномалії (рис. 5.1), детальну характеристику яких наведено в 3 розділі.

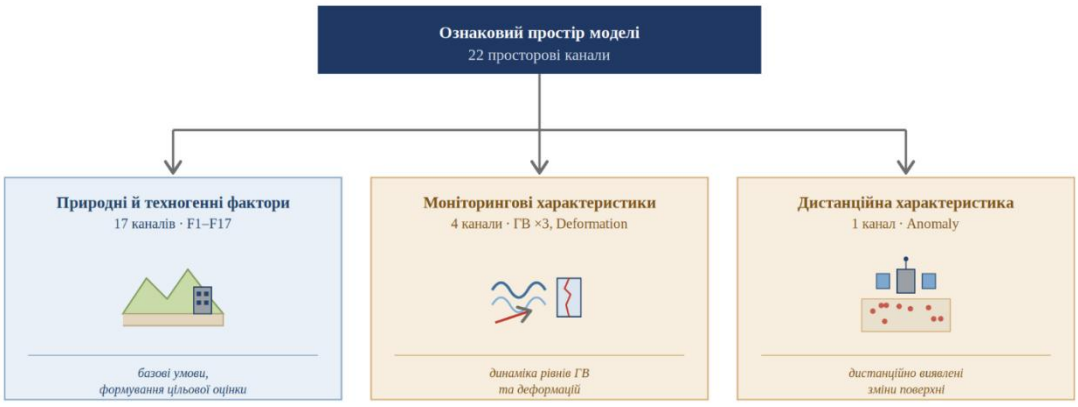


Рис. 5.1. Структура та функціональне призначення вхідних ознак нейромережевої моделі геологічної нестійкості

Першу групу становлять фактори, які характеризують природні й техногенні умови території. Їх сукупність формує базову характеристику природно-техногенних передумов геологічної нестійкості та використовується для побудови інтегральної цільової оцінки відповідно до методичних засад «LAVRA-GEO» (Комплексне дослідження, 2023; Kril, Shekhunova & Cherevko, 2023). За характером змін у часі фактори належать переважно до умовно постійних характеристик. Вони описують властивості території, зміни яких відбуваються протягом тривалих часових інтервалів. Їх включення до ознакового простору забезпечує врахування геологічної будови, рельєфу, гідрогеологічних передумов та інженерного освоєння території як базових чинників просторової диференціації геологічної нестійкості. Особливе значення мають гідрогеологічні та схилові фактори, вплив яких на розвиток небезпечних процесів у межах урбанізованих територій підтверджено результатами попередніх інженерно-геологічних досліджень (Ivanik et al., 2022; Cherevko et al, 2025).

Другу групу утворюють динамічні характеристики. Ознака *GroundWater_level* відображає просторово-часові зміни гідрогеологічного режиму, зокрема коливання рівнів ґрунтових вод, які впливають на обводнення лесових і техногенних ґрунтів, зміну їх міцності та активізацію суфозійно-просадкових і схилових процесів. Ознака *Deformation* характеризує сучасні прояви зміни стану ґрунтового масиву й інженерних споруд за результатами геодезичних та інструментальних спостережень. Ці характеристики відображають не лише передумови, а й поточну реакцію геологічного середовища на природні та техногенні впливи. Динамічні характеристики не включаються безпосередньо до розрахунку інтегральної цільової оцінки. Їх використання як вхідних ознак дає змогу встановлювати залежності між класами нестійкості, визначеними за базовою системою факторів, і фактичними змінами гідрогеологічного та деформаційного стану території. Це розмежування зменшує безпосереднє дублювання цільової змінної у складі вхідних каналів і водночас розширює інформаційну основу моделювання.

Третю групу представлено ознакою *Anomaly*, сформованою за результатами автоматизованого аналізу різночасових супутникових зображень. Функціональне призначення цієї ознаки полягає у введенні до моделі просторово суцільної характеристики сучасного стану території, яка доповнює дискретні дані режимних та інструментальних спостережень. З огляду на просторову роздільну здатність вихідних супутникових матеріалів ознака *Anomaly* відображає переважно зональні зміни стану поверхні й не використовується для безпосередньої локалізації окремих провалів, тріщин або інших малорозмірних деформацій. Її значення для моделювання визначається можливістю врахування просторового контексту змін поверхні та стійкості або повторюваності аномальних зон у часі.

Усі характеристики подаються до моделі як окремі просторові канали зі збереженням їх початкового фізичного змісту.

Цільова змінна представлена атрибутивним полем *Risk*, успадкованим зі структури вихідної геоінформаційної бази. У межах дослідження значення цього поля відповідають класам інтегральної геологічної нестійкості та не ототожнюються з геологічним ризиком, визначення якого передбачає врахування експозиції, вразливості об’єктів і можливих втрат. Тому в подальшому викладі для змістової характеристики результатів використовується поняття *«клас геологічної нестійкості»*, тоді як назва *Risk* зберігається лише як технічне позначення атрибутивного поля.

5.1.2. Підготовка багатоканального просторово-часового масиву ознак

Використання різнорідних геопросторових даних у нейромережевому моделюванні потребує їх подання у вигляді єдиного багатоканального масиву з узгодженими просторовими розмірами, системою координат, повнотою та діапазонами значень. Основні процедури інтегрування вихідної інформації, включаючи растеризацію тематичних шарів та просторову інтерполяцію режимних спостережень, виконано під час формування геопросторової бази даних. На етапі підготовки даних для нейромережевого аналізу здійснено

оброблення пропущених значень, узагальнення часової мінливості динамічних показників і нормалізацію ознак (Hudak & Kril, 2025b).

Усі шари приведено до однакових просторових меж і порядку розташування елементів регулярної сітки. У результаті вхідні дані представлено тривимірним масивом:

$$X \in \mathbb{R}^{H \times W \times C}, \qquad (5.1)$$

де H і W – це просторові розміри прямокутного охоплення досліджуваної території, а C відповідає кількості каналів ознак. Кожен канал містить просторовий розподіл окремої характеристики території. Така форма подання відповідає структурі вхідних даних згорткових моделей семантичної сегментації та забезпечує збереження просторового взаємного розташування ознак (Ronneberger, Fischer, & Brox, 2015). Просторові одиниці, розташовані поза межами досліджуваної території або позбавлені достовірної вихідної інформації, виключено з розрахунків за допомогою просторової маски.

Окремим етапом стало опрацювання пропущених значень у часових рядах рівнів ґрунтових вод. Пропуски були зумовлені нерегулярністю вимірювань, тимчасовим припиненням спостережень і різною тривалістю функціонування свердловин. Заповнення таких пропусків нульовими або сталими значеннями могло б спотворити статистичну структуру часових рядів і спричинити формування штучних залежностей (Hudak & Kril, 2025b).

Для відновлення відсутніх спостережень застосовано ітеративний алгоритм імпутації на основі методу випадкового лісу (*Random Forest*), що враховує нелінійні залежності між наявними режимними та просторовими характеристиками. Загалом імпутовано близько 19% значень. Точність процедури оцінено шляхом контрольного вилучення частини фактичних спостережень із подальшим порівнянням відновлених і вихідних значень. Відносна середньоквадратична похибка становила близько 5 %, а коефіцієнт детермінації перевищував $R^2 = 0{,}90$, що засвідчує достатню узгодженість відновлених значень із фактичними даними для подальшого формування узагальнених характеристик часових рядів (Hudak & Kril, 2025b).

Після відновлення часових рядів для відповідних часових зрізів сформовано неперервні поверхні абсолютних відміток рівня ґрунтових вод (Черевко та ін., 2022; Hudak & Kril, 2025a). Для кожної комірки регулярної сітки отримано послідовність різночасових значень, за якою визначено середню абсолютну відмітку, коефіцієнт лінійного тренду та амплітуду коливань.

Для показника, представленого в елементарній просторовій одиниці з координатами *(i, j)* рядом значень

$$\left\{v_{ij}^{(1)}, v_{ij}^{(2)}\right\}, \dots, v_{ij}^{(T)}, \qquad (5.2)$$

визначено середнє значення (Жуков, 2008; Вижва, 2011)

$$\bar{v}_{ij} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} v_{ij}^{(t)}, \qquad (5.3)$$

де T є кількістю спостережень у часовому ряді, а $\bar{v}_{ij}$ характеризує типовий рівень відповідного параметра за аналізований період.

Загальну спрямованість і швидкість довготривалої зміни показника визначено за коефіцієнтом лінійного тренду, оціненим методом найменших квадратів (Жуков, 2008; Hyndman & Athanasopoulos, 2021):

$$k_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T}(\tau_t - \bar{\tau})\,(v_{ij}^{(t)} - \bar{v}_{ij})}{\sum_{t=1}^{T}(\tau_t - \bar{\tau})^2}, \qquad (5.4)$$

де τ_t є фактичним моментом проведення *t*-го спостереження, вираженим у єдиних часових одиницях; $\bar{\tau}$ є середнім значенням часових координат; k_{ij} характеризує середню швидкість зміни аналізованого показника. Використання фактичних часових координат забезпечує коректне оцінювання тренду за нерівномірної періодичності спостережень. Якщо час виражено в роках, коефіцієнт k_{ij} має розмірність метрів на рік (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

Діапазон часової мінливості визначено за амплітудою ряду, обчисленою як різниця між його максимальним і мінімальним значеннями (Жуков, 2008; Вижва, 2011):

$$A_{ij} = \max_t v_{ij}^{(t)} - \min_t v_{ij}^{(t)}, \qquad (5.5)$$

де A_{ij} є амплітудою зміни відповідного показника в межах елементарної просторової одиниці за аналізований період.

Отримані показники відображають взаємодоповнювальні характеристики гідрогеологічного режиму: середня абсолютна відмітка описує типовий стан, коефіцієнт тренду характеризує спрямованість багаторічних змін, а амплітуда відображає діапазон часових коливань.

Ознаки *Deformation* та *Anomaly* включено до масиву як окремі бінарні просторові канали. Значення 1 відповідає наявності відповідної характеристики в межах комірки, а значення 0, її відсутності. Додаткові характеристики часової мінливості для цих каналів не обчислювали. Для приведення вхідних ознак до порівнянних числових діапазонів виконано їх нормалізацію. Фактори F1–F17, представлені у трирівневій шкалі, перетворено до інтервалу $[0; 1]$ за встановленим співвідношенням. Кількісні характеристики *GroundWater_level* масштабовано за параметрами, визначеними виключно за навчальною підмножиною. Ті самі параметри без повторного оцінювання застосовано до валідаційної та тестової підмножин. Бінарні ознаки *Deformation* та *Anomaly* збережено у вихідному поданні 0/1.

Сформований просторовий масив поділено на навчальну, валідаційну та тестову підмножини у співвідношенні 70 %, 15 % і 15 % відповідно. Навчальну підмножину використано для оптимізації параметрів нейронної мережі, валідаційну для налаштування гіперпараметрів, контролю перенавчання та вибору оптимального стану моделі, а тестову лише для остаточного оцінювання якості після завершення навчання й вибору моделі. Поділ виконано за просторовим блоковим принципом, без випадкового перемішування окремих комірок і без перекриття фрагментів між підмножинами. Підсумковий масив охоплює приблизно 8,6 тис. валідних просторових одиниць (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Послідовність формування багатоканального просторово-часового масиву ознак для нейромережевого моделювання геологічної нестійкості

5.1.3. Формування інтегрального індексу геологічної нестійкості

Інтегральний індекс геологічної нестійкості використано як кількісну основу для формування цільової змінної нейромережевої моделі. Фактори представлено у трирівневій шкалі, у якій збільшення балового значення відповідає посиленню несприятливості природних або техногенних умов у межах відповідної просторової одиниці (Комплексне дослідження, 2023).

Відносний внесок факторів у формування інтегральної оцінки враховано за допомогою вагових коефіцієнтів, визначених у межах методики «LAVRA-GEO» методом аналізу ієрархій (Saaty, 1980; Комплексне дослідження, 2023). Нормалізований вектор ваг задовольняє умову:

$$\sum_{i=1}^{17} w_m = 1\,, \quad (5.6)$$

де w_m є нормалізованим ваговим коефіцієнтом m-го фактора. Виконання умови (5.6) забезпечує представлення ваг як відносних пріоритетів факторів у межах їх повного набору (Saaty, 1987; Kril, Shekhunova & Cherevko, 2023).

Для змістового розмежування впливу природних і техногенних умов визначено відповідні складові інтегральної оцінки. Природну складову розраховано за факторами F1–F11:

$$F_N(i,j) = \sum_{m=1}^{11} w_m B_m(i,j)\,, \quad (5.7)$$

де $F_N(i,j)$ є зваженою оцінкою природних умов у межах просторової одиниці з координатами *(i,j)*; $B_m(i,j)$ є баловим значенням m-го природного фактора; w_m є відповідним ваговим коефіцієнтом.

Техногенну складову розраховано аналогічно за факторами F12–F17 (Комплексне дослідження, 2023):

$$F_T(i,j) = \sum_{m=12}^{17} w_m B_m(i,j)\,, \quad (5.8)$$

де $F_T(i,j)$ характеризує сукупний зважений вплив забудови, підземних споруд, інженерних мереж і дренажних систем на стан відповідної просторової одиниці.

Інтегральний індекс геологічної нестійкості розраховано шляхом об'єднання природної та техногенної складових (Saaty, 1987; Бугай та ін, 2023; Комплексне дослідження, 2023):

$$GI(i,j) = F_N(i,j) + F_T(i,j) = \sum_{m=1}^{17} w_m B_m(i,j)\,, \quad (5.9)$$

де $GI(i,j)$ є значенням інтегрального індексу геологічної нестійкості в комірці з координатами (i,j). Збільшення індексу відповідає посиленню сукупного впливу несприятливих природних і техногенних чинників та зниженню потенційної стійкості геологічного середовища.

Оскільки значення кожного фактора змінюється від 1 до 3 балів, а сума вагових коефіцієнтів дорівнює одиниці, теоретично можливі межі інтегрального індексу становлять:

$$GI_{\min}^{\text{theor}} = 1,\ GI_{\max}^{\text{theor}} = 3 \quad (5.10)$$

Для приведення інтегральної оцінки до безрозмірної шкали $[0;1]$ виконано нормалізацію за теоретично можливими межами:

$$GI_n(i,j) = \frac{GI(i,j) - GI_{\min}^{\text{theor}}}{GI_{\max}^{\text{theor}} - GI_{\min}^{\text{theor}}} = \frac{GI(i,j)-1}{2}, \quad (5.11)$$

де $GI_n(i,j)$ є нормалізованим значенням інтегрального індексу. Значення, наближені до нуля, характеризують переважання відносно сприятливих природно-техногенних умов, тоді як збільшення GI_n відповідає посиленню сукупного впливу несприятливих факторів.

Нормалізація за теоретичними, а не фактично встановленими мінімальним і максимальним значеннями забезпечує сталість шкали та порівнюваність оцінок у разі подальшого оновлення геопросторової бази даних. За такого підходу фактичний максимум нормалізованого індексу може бути меншим за одиницю, якщо в межах досліджуваної території відсутні комірки з одночасним поєднанням максимальних балів усіх факторів.

5.1.4. Формування цільових класів геологічної нестійкості

Для використання нормалізованого інтегрального індексу як кількісної основи цільової змінної його значення перетворено на три дискретні класи: *відносно стійкий*, *незадовільний* і *небезпечний*. Назви та змістову інтерпретацію класів узгоджено з методичними засадами геоінформаційної бази «LAVRA-GEO», тоді як їх кількісні межі в цьому дослідженні визначено шляхом рівноінтервального поділу теоретичної нормалізованої шкали $[0; 1]$ (Комплексне дослідження, 2023). Відносно стійкий клас охоплює просторові одиниці з переважанням сприятливих природно-техногенних умов та обмеженим проявом чинників нестійкості. Незадовільний клас характеризує ділянки з посиленим сукупним впливом несприятливих чинників, здатних порушувати рівноважний стан геологічного середовища. Небезпечний клас відповідає просторовим одиницям із найбільш несприятливим поєднанням урахованих природних і техногенних умов та підвищеною схильністю до розвитку екзогенних геологічних процесів.

Виділені класи характеризують рівень інтегральної факторної оцінки та не є безпосереднім підтвердженням наявності конкретного геологічного процесу в межах окремої комірки. Змістове трактування одержаних класів потребує врахування фактичних матеріалів моніторингу та результатів незалежних інструментальних досліджень.Цільову мітку $y(i,j)$ визначено за правилом:

$$y(i,j) = \begin{cases} 1, & 0 \le GI_n(i,j) \le \frac{1}{3}, \\ 2, & \frac{1}{3} < GI_n(i,j) < \frac{2}{3}, \\ 3, & \frac{2}{3} \le GI_n(i,j) \le 1, \end{cases} \qquad (5.12)$$

де мітка 1 відповідає відносно стійкому класу, мітка 2, незадовільному, мітка 3, небезпечному класу. Таке визначення меж узгоджується з фактичною процедурою класифікації, за якої значення $GI_n = 1/3$ належить до відносно стійкого класу, а значення $GI_n = 2/3$, до небезпечного (табл. 5.1). Використання неперетинних інтервалів забезпечує однозначне віднесення кожної валідної просторової одиниці до одного цільового класу. У програмній реалізації моделі застосовано нульову індексацію цільових міток. Відповідно, змістові класи геологічної нестійкості *C = 1, 2, 3* закодовано мітками *y = 0, 1, 2*, де *y = C−1*. Таке перетворення має суто обчислювальний характер і не змінює меж, назв та інтерпретації класів. Для представлення результатів у тексті, таблицях і картографічних матеріалах збережено нумерацію класів 1, 2 і 3.

Фактичні значення GI_n у межах досліджуваної території змінюються від 0 до 0,83. Відсутність значень у верхній частині теоретичного діапазону пояснюється тим, що в аналізованому наборі не встановлено комірок з одночасним поєднанням максимальних балів усіх сімнадцяти факторів. Фактичний максимум 0,83 не суперечить нормалізації за теоретично можливими межами інтегральної шкали (рис. 5.3).

Таблиця 5.1 – Критерії класифікації та розподіл просторових одиниць за рівнями геологічної нестійкості

Мітка	**Інтервал GI_n**	**Рівень геологічної нестійкості**	**Характеристика стану геологічного середовища**	**Кількість просторових одиниць**	**Частка території, %**
1	$0 \le GI_n(i,j) \le \frac{1}{3}$	Відносно стійкий	Переважання сприятливих умов та обмежений прояв чинників нестійкості	3 988	46,4
2	$\frac{1}{3} < GI_n(i,j) < \frac{2}{3}$	Незадовільний	Сукупний вплив несприятливих чинників, здатних порушувати рівноважний стан геологічного середовища	3 576	41,6
3	$\frac{2}{3} \le GI_n(i,j) \le 1$	Небезпечний	Концентрація несприятливих природних і техногенних чинників та підвищена схильність до розвитку екзогенних геологічних процесів	1 036	12,0

До відносно стійкого класу віднесено 3988 комірок, що становить 46,4 % валідних просторових одиниць. Незадовільний клас охоплює 3576 комірок, або 41,6 %, а небезпечний клас, 1036 комірок, або 12,0 %. Відносно стійкий і незадовільний класи сукупно становлять 88,0 % вибірки, тоді як небезпечний клас має істотно меншу представленість і характеризується локалізованим просторовим поширенням.

Сформовані класи використано як цільові мітки нейромережевої моделі та збережено в атрибутивному полі *Risk*, успадкованому зі структури геоінформаційної бази «LAVRA-GEO».

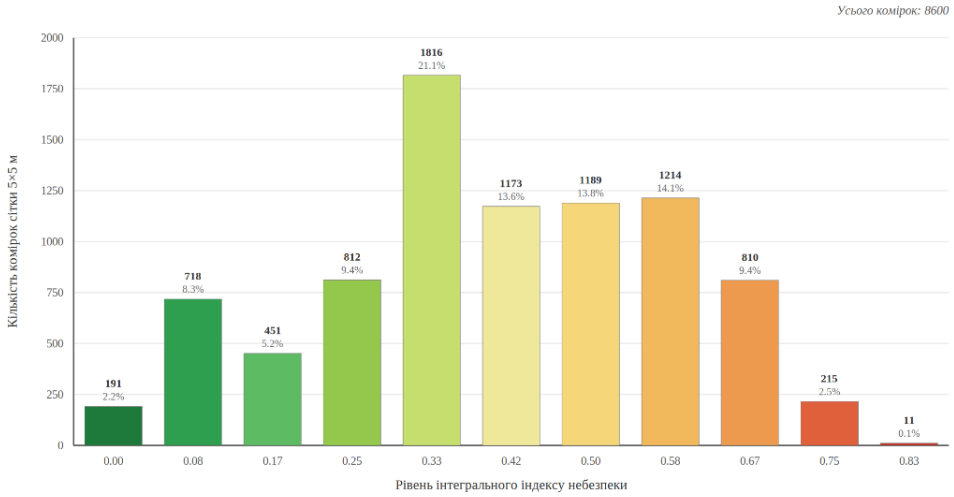


Рис. 5.3. Розподіл комірок території за класами геологічної нестійкості

Розподіл цільових міток є нерівномірним: частка небезпечного класу приблизно у 3,8 раза менша за частку відносно стійкого класу та у 3,5 раза менша за частку незадовільного. Просторовий поділ даних виконано з контролем представленості всіх трьох класів у навчальній, валідаційній і тестовій підмножинах. Залишкову нерівномірність частот класів у навчальній підмножині враховано шляхом зважування функції втрат.

5.2. Гібридна нейромережева модель U-Net–Transformer

Для нелінійного просторового уточнення інтегральної оцінки геологічної нестійкості застосовано гібридну нейромережеву модель U-Net–Transformer. Модель опрацьовує багатоканальний просторовий масив і формує для кожної

валідної комірки розподіл імовірностей належності до відносно стійкого, незадовільного та небезпечного класів.

Поєднання згорткової й трансформерної складових забезпечує врахування просторових закономірностей різного масштабу. Згорткові блоки призначено для виділення локальних і багатомасштабних характеристик, тоді як трансформерний модуль забезпечує моделювання контекстних залежностей між просторово пов'язаними ділянками. Декодувальна частина відновлює просторову структуру результату відповідно до регулярної сітки вихідних даних.

Методичну коректність моделювання забезпечено просторовим поділом даних на навчальну, валідаційну й тестову підмножини, відсутністю перекриття просторових фрагментів між ними, визначенням параметрів масштабування лише за навчальними даними та врахуванням нерівномірної представленості класів у функції втрат.

5.2.1. Формування модельної вибірки та просторовий поділ даних

Модельну вибірку сформовано на основі підготовленого 22-канального просторового масиву та узгодженого з ним шару цільових міток. Для кожної валідної комірки визначено значення вхідних ознак і відповідний клас геологічної нестійкості. Комірки поза межами території дослідження або без повного набору даних виключено з обчислення функції втрат і визначення показників якості за допомогою просторової маски.

З огляду на просторову автокореляцію геопросторових характеристик випадковий розподіл окремих комірок між підмножинами не застосовувався. Суміжні просторові одиниці характеризуються подібними природно-техногенними умовами й не можуть розглядатися як статистично незалежні спостереження. За випадкового поділу просторово близькі комірки могли б одночасно потрапити до різних підмножин, що призвело б до витоку просторової інформації та завищення показників якості моделі (Roberts et al., 2016; Sun et al., 2023).

Для зменшення впливу просторової залежності досліджувану територію розподілено на компактні блоки, кожен із яких повністю віднесено лише до однієї підмножини. Навчальна підмножина охоплювала 70 % валідних просторових одиниць, валідаційна й тестова підмножини по 15 %. Межі просторових блоків визначено до формування модельних фрагментів, що унеможливило включення однакових або частково перекривних ділянок до різних підмножин.

Розмір блоків узгоджено з просторовою структурою вхідних ознак і розмірами фрагментів, які подаються до нейромережевої моделі. Недостатній розмір блоків не усуває впливу просторової автокореляції, тоді як надмірне збільшення блоків зменшує кількість незалежних територіальних ділянок, доступних для навчання й оцінювання моделі (Sun et al., 2023; Stock, 2025).

Після блокового поділу в межах кожної підмножини окремо сформовано просторові фрагменти однакового розміру. Кожен фрагмент містить багатоканальний масив вхідних ознак, матрицю цільових міток і відповідний фрагмент маски валідних комірок. Така послідовність забезпечує збереження просторового контексту та запобігає перекриттю модельних фрагментів між підмножинами.

Навчальну підмножину використано для обчислення градієнтів та оптимізації параметрів нейронної мережі. Валідаційну підмножину залучено для контролю збіжності, налаштування гіперпараметрів, реалізації ранньої зупинки та вибору стану моделі з найменшим значенням валідаційної втрати. Тестова підмножина не використовувалась під час оптимізації параметрів, налаштування гіперпараметрів або вибору остаточного стану моделі. Її застосовано лише для підсумкового оцінювання якості вже навченої та зафіксованої моделі.

Просторовий розподіл блоків здійснено з контролем представленості відносно стійкого, незадовільного й небезпечного класів у кожній підмножині. При цьому випадкового перемішування окремих комірок для штучного вирівнювання частот класів не виконувалось, оскільки така процедура порушила б просторову незалежність підмножин. Залишкову нерівномірність класів

враховано на етапі навчання шляхом зважування функції втрат. Вагові коефіцієнти визначено виключно за частотами класів у навчальній підмножині, без використання розподілів валідаційних і тестових даних.

Параметри масштабування кількісних ознак також визначено лише за навчальною підмножиною. До валідаційних і тестових даних застосовано ті самі параметри без повторного оцінювання. У сукупності просторовий блоковий поділ, окреме формування фрагментів і незалежна підготовка тестових даних забезпечують коректніше оцінювання здатності моделі відтворювати встановлені закономірності на просторово відокремлених ділянках території.

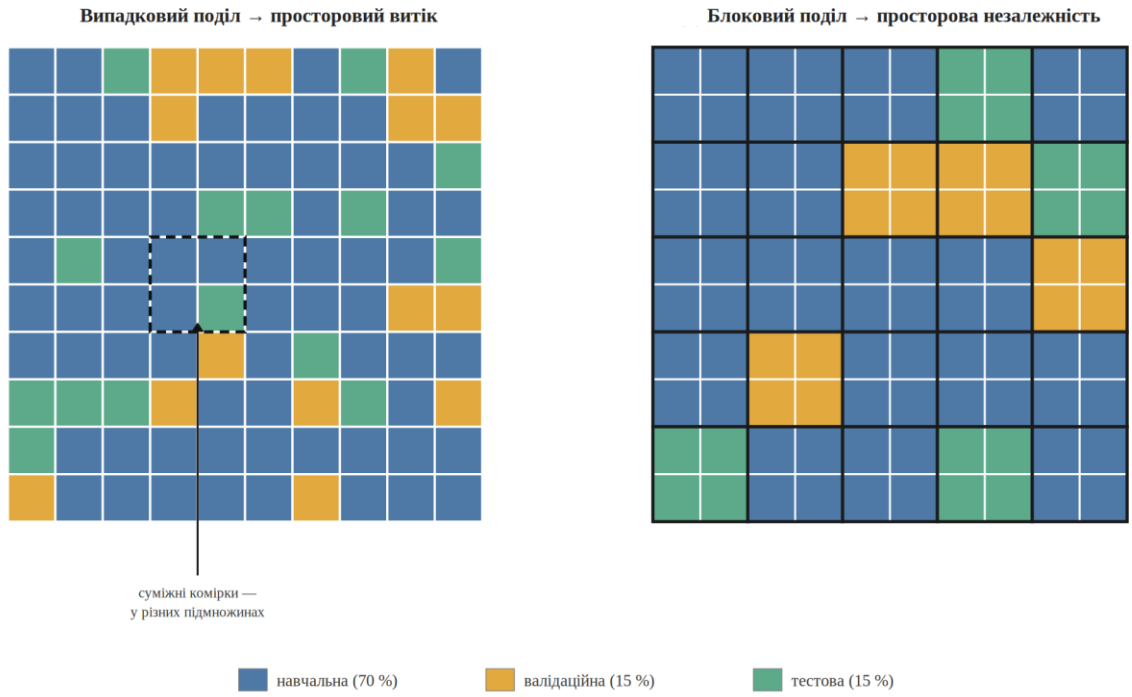


Рис. 5.4. Просторовий блоковий поділ досліджуваної території на навчальну, валідаційну та тестову підмножини

5.2.2. Обґрунтування вибору та архітектура гібридної моделі

Поставлена задача передбачає визначення для кожної валідної комірки регулярної сітки одного з трьох взаємовиключних класів геологічної нестійкості зі збереженням просторової структури вихідних даних. За такої постановки моделювання відповідає задачі багатокласової семантичної сегментації, у якій багатоканальному просторовому фрагменту вхідних ознак ставиться у

відповідність матриця цільових класів того самого просторового охоплення (Noroozi & Riahi, 2025).

Визначення класу геологічної нестійкості потребує врахування характеристик не лише окремої комірки, а й прилеглих ділянок. Схилові умови, напрями поверхневого й підземного стоку, поширення підземних споруд та інженерної інфраструктури утворюють просторові залежності різного масштабу. Відповідно, архітектура моделі має забезпечувати одночасне опрацювання локальних особливостей і ширшого просторового контексту.

Згорткові нейронні мережі забезпечують виділення локальних просторових ознак у межах рецептивного поля. Архітектура U-Net додатково відновлює просторову роздільність результату завдяки кодувально-декодувальній структурі та з'єднанням пропуску між відповідними рівнями мережі. Це забезпечує поєднання узагальнених ознак глибоких шарів із детальнішою просторовою інформацією, сформованою на початкових рівнях кодування (Ronneberger, Fischer & Brox, 2015; Alorf, 2025; Noroozi & Riahi, 2025).

Трансформерні архітектури використовують механізм уваги для моделювання залежностей між елементами просторового представлення. На відміну від згорткових операцій із локальним ядром, механізм уваги розширює контекст аналізу ознак. Водночас суто трансформерні моделі зазвичай потребують значного обсягу навчальних даних або попереднього навчання, що обмежує їх застосування за відносно невеликої просторової вибірки (Vaswani et al., 2017; Dosovitskiy et al., 2021).

З огляду на зазначені особливості застосовано гібридну архітектуру U-Net–Transformer, у якій згорткова частина призначена для формування локальних і багатомасштабних ознак, а трансформерний модуль розширює просторовий контекст їх опрацювання. Вибір архітектури здійснено шляхом порівняльну аналізу модельних підходів за такими критеріями: врахування локального та ширшого просторового контексту, збереження просторової роздільності результату, придатність до задачі семантичної сегментації та можливість застосування за обмеженого обсягу навчальних даних (табл. 5.2).

Наведений аналіз має концептуальний характер і не є результатом окремого експериментального порівняння моделей. Тому вибір моделі U-Net–Transformer обґрунтовується відповідністю функціональних властивостей архітектури поставленій задачі, а не її наперед установленою перевагою над альтернативними підходами (Wolf et al., 2020). Доцільність поєднання згорткових і трансформерних компонентів у задачах семантичної сегментації обґрунтовано в попередніх дослідженнях (Ma & Mei, 2021; Liu et al., 2023; Alorf, 2025), а можливість застосування глибоких згорткових моделей у задачах геологічної класифікації показано в роботі Noroozi & Riahi (2025).

Таблиця 5.2 – Концептуальне зіставлення модельних підходів за вимогами просторового оцінювання геологічної нестійкості

Модельний підхід	**Локальний просторовий контекст**	**Залежності ширшого масштабу**	**Просторово узгоджений результат**	**Основне обмеження**
Табличні моделі RF і XGBoost	Безпосередньо не враховується	Потребують попереднього формування просторових ознак	Клас кожної комірки визначається окремо	Відсутність вбудованого врахування просторової структури
Згорткова мережа-класифікатор	Враховується в межах рецептивного поля	Обмежується глибиною мережі	Потребує адаптації до семантичної сегментації	Не забезпечує безпосереднього відновлення матриці класів
U-Net	Враховується на кількох масштабних рівнях	Частково враховується через розширення рецептивного поля	Забезпечується кодувально-декодувальною структурою	Обмежене моделювання залежностей між віддаленими ділянками
Vision Transformer	Залежить від способу формування просторових фрагментів	Ураховується механізмом самоуваги	Потребує спеціалізованої декодувальної частини	Значні вимоги до навчальних даних і обчислювальних ресурсів
U-Net–Transformer	Враховується згортковими блоками та з’єднаннями пропуску	Розширюється трансформерним модулем	Забезпечується декодувальною частиною U-Net	Складніша архітектура та підвищений ризик перенавчання

Архітектуру моделі побудовано за послідовністю «*кодувальна частина → трансформерний модуль → декодувальна частина*» (рис. 5.5). На вхід подається

просторовий фрагмент багатоканального масиву. Кодувальна частина послідовно перетворює вхідний масив на ієрархію просторових ознак. На кожному рівні застосовано згорткові операції з ядром 3×3 і нелінійну функцію активації ReLU. Зменшення просторових розмірів проміжних представлень виконано операцією максимального об'єднання з вікном 2×2. Така послідовність забезпечує поступове розширення рецептивного поля та формування ознак різного масштабу (Mahoney et al., 2023).

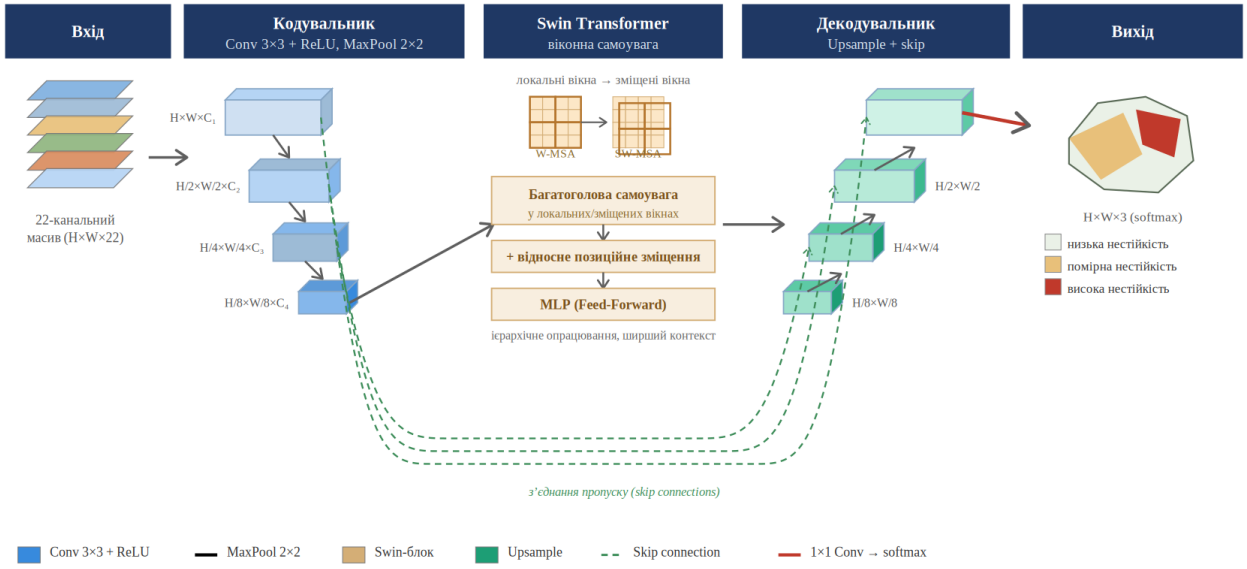


Рис. 5.5. Архітектура гібридної моделі U-Net–Transformer, що інтегрує багатомасштабне вилучення ознак та моделювання просторового контексту на основі уваги для оцінки геологічної нестійкості

У центральній частині архітектури використано модуль на основі Swin Transformer. Самоувага в цьому модулі обчислюється в межах локальних просторових вікон, що зменшує обчислювальну складність порівняно з повною самоувагою. Чергування звичайних і зміщених вікон забезпечує обмін інформацією між сусідніми просторовими областями та розширює контекст аналізу. Відносне позиційне зміщення, включене до розрахунку коефіцієнтів уваги, використано для врахування взаємного просторового положення елементів представлення (Liu et al., 2023).

Декодувальна частина послідовно відновлює просторові розміри представлення. Ознаки з відповідних рівнів кодувальної частини передаються

через з’єднання пропуску, завдяки чому узагальнена контекстна інформація поєднується з локальними просторовими характеристиками (Hudak & Zatserkovnyi, 2026). Така структура зменшує втрату деталізації під час декодування.

На виході декодувальної частини застосовується згортковий шар із ядром 1×1, який формує три канали ненормованих оцінок відповідно до кількості цільових класів. Для кожної просторової позиції ці оцінки перетворюються на розподіл імовірностей (LeCun, Bengio,& Hinton, 2015; Wolf et al., 2020):

$$P_{i\ j,\ c} = \frac{exp\ (s_{i\ j,c})}{\sum_{r=1}^{3} exp\ (s_{i\ j,r})}, \quad c \in \{0,1,2\}, \text{ (5.13)}$$

де $P_{i\ j,\ c}$ є прогнозованою імовірністю належності просторової одиниці з координатами *(i,j)* до класу c; $(s_{i\ j,c})$ є ненормованою вихідною оцінкою класифікаційного шару для відповідного класу. Сума ймовірностей за трьома класами дорівнює одиниці, а результуючий клас визначається за найбільшим значенням $P_{i\ j,\ c}$.

Імовірнісне представлення результатів забезпечує можливість оцінювання визначеності класифікації. Виразне переважання імовірності одного класу відповідає більш однозначному модельному рішенню, тоді як близькі значення для двох або трьох класів вказують на підвищену невизначеність (Noroozi & Riahi, 2025). Такі випадки не розглядаються як безпосереднє свідчення перехідного стану геологічного середовища, оскільки їх змістова інтерпретація потребує зіставлення з просторовим розподілом вхідних ознак та незалежними матеріалами моніторингу.

Програмну реалізацію моделі виконано мовою Python із використанням бібліотеки PyTorch. Згорткову частину побудовано відповідно до принципів архітектури U-Net, а центральний трансформерний модуль адаптовано на основі ієрархічної структури Swin Transformer (Ronneberger, Fischer & Brox, 2015; Liu et al., 2023). Вхідний шар узгоджено з структурою геопросторового масиву, забезпечено сумісність розмірностей згорткових і трансформерних

представлень, а вихідний шар налаштовано на формування трьох каналів класових оцінок.

Методичний внесок дослідження полягає в адаптації гібридної архітектури U-Net–Transformer до опрацювання багатоканальних геопросторових даних для просторового відтворення класів інтегральної оцінки геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври. Представлення кожної вхідної ознаки окремим каналом створює передумови для подальшого аналізу зв'язку модельних результатів із природними, техногенними, гідрогеологічними, деформаційними та дистанційними характеристиками території.

5.2.3. Навчання та вибір оптимального стану моделі

Навчання гібридної моделі здійснено шляхом ітеративної мінімізації розбіжності між прогнозованими й цільовими класами геологічної нестійкості. Для кожного просторового фрагмента модель формувала нормований розподіл імовірностей належності валідних комірок до трьох класів, за яким обчислювали функцію втрат та оновлювали параметри нейронної мережі.

Нерівномірна представленість класів у навчальній підмножині потребувала диференційованого врахування помилок класифікації. Із цією метою застосовано зважену перехресну ентропію, яка збільшує внесок помилок для менш представлених класів і зменшує вплив чисельного переважання відносно стійкого та незадовільного класів на процес оптимізації (Lin et al, 2017$ Liu et al., 2023). Ваговий коефіцієнт для класу *c* визначено обернено пропорційно до частоти його представлення в навчальній підмножині:

$$\alpha_c = \frac{N_{train}}{K\, N_{c,\ train}}, \quad (5.14)$$

де α_c є ваговим коефіцієнтом класу *c*; N_{train} є загальною кількістю елементів навчальної підмножини; $N_{c,\ train}$ є кількістю її елементів, віднесених до класу *c*; *K=3* є кількістю класів геологічної нестійкості.

Вагові коефіцієнти обчислено після просторового поділу даних виключно за розподілом класів у навчальній підмножині. Частоти класів у валідаційній і тестовій підмножинах для визначення ваг не використовувались. Такий підхід

забезпечує компенсацію дисбалансу без залучення інформації з підмножин, призначених для вибору стану моделі та підсумкового оцінювання її якості (Hudak & Zatserkovnyi, 2026; Kavya & Saravanan, 2025).

Функцію втрат обчислено лише для валідних комірок просторових фрагментів. Комірки, розташовані поза межами досліджуваної території або виключені просторовою маскою, не впливали на значення функції втрат і процес оновлення параметрів моделі.

Оптимізацію параметрів виконано методом AdamW із початковим темпом навчання 1×10^{-4}. Цей алгоритм поєднує адаптивне оцінювання моментів градієнта з відокремленою регуляризацією ваг, що сприяє стабільному налаштуванню параметрів глибоких нейронних мереж (Loshchilov & Hutter, 2019). Навчальні фрагменти опрацьовано мініпакетами по 32 зразки.

Максимальну тривалість навчання обмежено 100 епохами. Після кожної епохи модель застосовувалась до валідаційної підмножини без оновлення її параметрів. Значення валідаційної функції втрат використовувались для контролю збіжності, виявлення початку перенавчання та вибору оптимального стану моделі. Стан мережі зберігався для епохи, якій відповідало найменше значення валідаційної втрати. Ранню зупинку застосовано після визначеної кількості послідовних епох без зменшення валідаційної втрати.

Основне зниження навчальної та валідаційної втрат відбувалося впродовж перших 40 епох (рис. 5.6). Надалі зменшення навчальної втрати не супроводжувалося відповідним поліпшенням валідаційного показника, що вказувало на вичерпання здатності моделі до подальшого узагальнення та можливий початок перенавчання. Для подальшого застосування обрано збережений стан моделі з найменшим значенням валідаційної втрати.

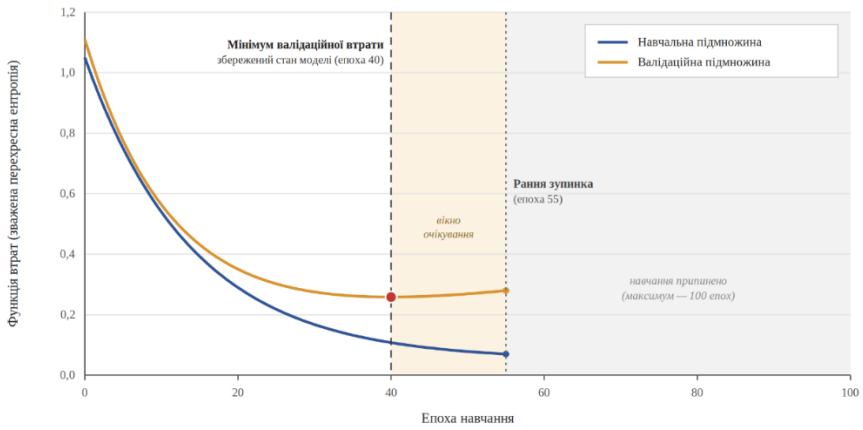


Рис. 5.6. Динаміка функції втрат на навчальній та валідаційній підмножинах за епохами навчання: епоха мінімальної валідаційної втрати (збережений стан моделі), вікно очікування та момент ранньої зупинки

Навчальну підмножину використано для оптимізації параметрів мережі, а валідаційну, для контролю навчання та вибору її оптимального стану. Тестову підмножину на цих етапах не залучено. Остаточне оцінювання класифікаційної якості виконано лише після завершення навчання та фіксації параметрів моделі.

5.2.4. Оцінювання якості моделі

Остаточну якість гібридної моделі оцінено на просторово відокремленій тестовій підмножині, яку не використовували під час оптимізації параметрів, налаштування гіперпараметрів, ранньої зупинки або вибору стану мережі. Такий підхід забезпечив оцінювання здатності зафіксованої моделі відтворювати цільові класи на просторових ділянках, не залучених до навчання й валідації.

Оцінювання виконано за сукупністю показників багатокласової класифікації (Hejmanowska et al., 2025). Використання лише загальної частки правильних класифікацій є недостатнім через нерівномірну представленість класів, оскільки переважання відносно стійкого та незадовільного рівнів може маскувати помилки у визначенні менш представленого небезпечного класу. Тому показники визначено як для всієї тестової підмножини, так і окремо для кожного класу геологічної нестійкості (Zatserkovnyi, Hudak, & Bohush-Zadnipriana, 2026).

Основними показниками обрано точність класу, повноту та F1-міру. Точність класу характеризує частку правильно класифікованих комірок серед усіх просторових одиниць, віднесених моделлю до відповідного класу. Повнота відображає частку правильно визначених комірок серед усіх еталонних представників цього класу. F1-міра є гармонічним середнім точності й повноти та забезпечує їх збалансоване оцінювання за нерівномірного розподілу цільових міток ((Loshchilov & Hutter, 2019; Wang, Khodadadzadeh & Zurita-Milla, 2023; Hudak & Zatserkovnyi, 2026).

Узагальнені показники визначено із застосуванням макроусереднення та зваженого усереднення. За макроусереднення метрику обчислено окремо для кожного класу, після чого отримані значення усереднено з однаковою вагою. Це дало змогу однаковою мірою врахувати якість класифікації всіх трьох рівнів незалежно від кількості їх представників. За зваженого усереднення враховано фактичну частоту кожного класу в тестовій підмножині, що забезпечило узагальнену характеристику правильності класифікації досліджуваної території.

Для оцінювання здатності моделі розмежовувати класи за прогнозованими ймовірностями додатково використано площу під ROC-кривою. У багатокласовій постановці цей показник визначено окремо для кожного класу за принципом його зіставлення з двома іншими класами, після чого виконано макроусереднення трьох отриманих значень. Показник використано разом із точністю, повнотою та F1-мірою як характеристику роздільної здатності моделі за різних порогів класифікації (Hudak & Zatserkovnyi, 2026).

Структуру помилок проаналізовано за матрицею похибок, що відображає співвідношення між цільовими та прогнозованими класами в тестовій підмножині (рис 5.7). Основну частину помилок становили взаємні переходи між суміжними рівнями, тобто між відносно стійким і незадовільним або між незадовільним і небезпечним класами. Помилкові переходи безпосередньо між відносно стійким і небезпечним класами траплялися рідше. Така структура похибок узгоджується з поступовою зміною просторового поєднання природних

і техногенних факторів та наявністю ділянок із близькими значеннями інтегральної оцінки поблизу меж класів.

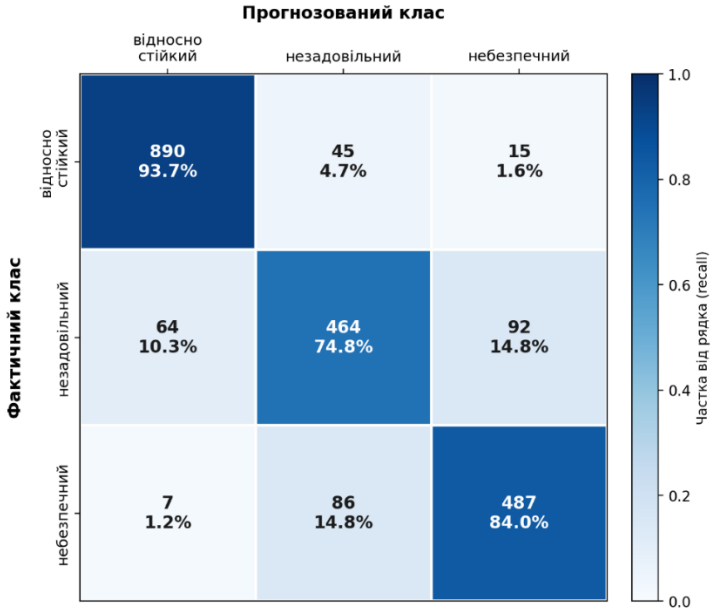


Рис. 5.7. Матриця похибок класифікації комірок за рівнями геологічної нестійкості

За результатами оцінювання на тестовій підмножині загальна частка правильних класифікацій перевищила 0,85. Для небезпечного класу точність становила близько 0,82, повнота, близько 0,84, а F1-міра, близько 0,83. Близькі значення точності й повноти не виявили вираженого дисбалансу між пропуском комірок небезпечного класу та їх надмірним виділенням у межах тестової підмножини, тобто систематичного пропуску небезпечних ділянок або їх надмірного виділення. Макроусереднене значення ROC-AUC перевищило 0,90, що характеризує здатність моделі розмежовувати три цільові класи за сформованими ймовірнісними оцінками (Hudak & Zatserkovnyi, 2026; Zatserkovnyi, Hudak, & Bohush-Zadnipriana, 2026).

Наведені метрики характеризують відповідність прогнозів цільовим класам, сформованим на основі інтегрального індексу геологічної нестійкості. Оскільки фактори F1–F17 одночасно входять до ознакового простору та використовуються для формування цільових міток, високі тестові показники не є самостійним підтвердженням фактичного стану геологічного середовища.

Вони відображають здатність моделі відтворювати й просторово уточнювати прийняту систему інтегральної оцінки на просторово відокремлених даних.

Змістову обґрунтованість результуючої карти оцінено окремо шляхом зіставлення із задокументованими проявами екзогенних геологічних процесів, даними супутникової радарної інтерферометрії та матеріалами геофізичних досліджень. Зазначені незалежні матеріали не входили до тестової підмножини та використовувалися для предметної верифікації результатів моделювання.

5.3. Результати моделювання та картографування геологічної нестійкості території

Для аналізу просторово-часової мінливості модельних оцінок сформовано серію зіставних вхідних масивів, що відповідають вибраним часовим зрізам моніторингових спостережень. Умовно постійні природні фактори зберігались незмінними за відсутності документально підтверджених змін, тоді як техногенні та моніторингові характеристики актуалізовувались відповідно до інформаційного стану матеріалів на визначену дату.

Середню абсолютну відмітку, коефіцієнт лінійного тренду та амплітуду коливань рівнів ґрунтових вод для кожного часового зрізу визначено в межах п’ятирічного рухомого вікна, кінцева дата якого відповідала даті картографування. Для зрізу 2009 р. використано спостереження за 2005–2009 рр., для 2013 р. за 2009–2013 рр., для 2015 р. за 2011–2015 рр., а для 2017 р. за 2013–2017 рр. Дані наступних періодів під час формування відповідних ретроспективних масивів не використовувались. Ознаки *Deformation* та *Anomaly* формувались за матеріалами, актуальними для відповідного часового зрізу.

До сформованих масивів застосовано зафіксований стан навченої нейромережевої моделі без зміни її структури та параметрів. Для всіх часових зрізів використано однакову послідовність підготовки даних і незмінні параметри перетворень, визначені за навчальною множиною. Це забезпечило зіставність отриманих карт і дало змогу пов’язувати відмінності між ними зі

змінами часово залежної вхідної інформації, а не з повторним налаштуванням моделі.

Різночасові карти характеризують модельну оцінку стану геологічного середовища за інформаційним станом вхідних даних відповідного періоду. Зміни площі, конфігурації та просторового положення класів розглядаються як модельні індикатори просторово-часової мінливості, а не як безпосередньо виміряні прояви конкретних геологічних процесів.

5.3.1. Формування різночасових карт геологічної нестійкості

Для кожного часового зрізу сформовано три растрові шари прогнозованих імовірностей належності просторових одиниць до відносно стійкого, незадовільного та небезпечного класів. Результуючий клас визначено за найбільшим значенням відповідної імовірності.

Картографування виконано шляхом послідовного опрацювання території частково перекривними просторовими фрагментами. У межах ділянок перекриття прогнозовані імовірності усереднено, що дало змогу зменшити вплив крайових ефектів і забезпечити просторову неперервність картографічного представлення результатів. Близькі значення імовірностей належності до кількох класів розглядались як ознака зниженої однозначності модельного рішення. Такі випадки не ототожнювались з фактичним перехідним станом геологічного середовища. Їх змістова інтерпретація потребувала зіставлення з первинними моніторинговими, інструментальними та польовими матеріалами.

Результати окремих часових зрізів збережено в однаковому картографічному представленні, що забезпечує їх безпосереднє просторове порівняння. Аналіз різночасових карт виконано за змінами площі та конфігурації класів, положенням їхніх меж, появою локальних осередків, просторовою сталістю раніше виділених зон і переходами між суміжними класами. Додатково проаналізовано переходи між суміжними класами та зміну прогнозованої ймовірності належності комірок до небезпечного класу. Для узагальненого представлення результатів сформовано зведену карту просторово-часового

розподілу класів геологічної нестійкості (рис. 5.8). Зведене картографічне представлення використано для подальшого аналізу просторово-часової диференціації класів.

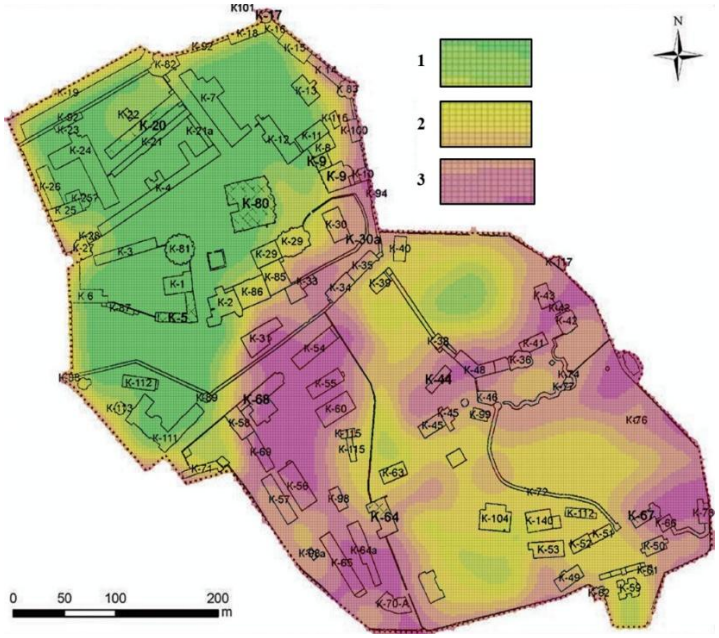


Рис. 5.8. Зведене представлення просторового розподілу модельних класів геологічної нестійкості Києво-Печерської лаври за вибраними часовими зрізами: 1 – відносно стійкий клас; 2 – незадовільний клас; 3 – небезпечний клас

5.3.2. Просторово-часова диференціація класів геологічної нестійкості

Порівняльний аналіз різночасових карт засвідчив загальну сталість основних просторових закономірностей за одночасної часової мінливості окремих локальних ділянок (рис. 5.9). Відносно стійкий клас переважає в межах підвищених і порівняно вирівняних частин лесового плато. Незадовільний і небезпечний класи тяжіють до розчленованих схилів, тальвегів, знижених і більш обводнених ділянок, територій поширення підземних споруд та зон концентрованого техногенного навантаження.

У межах Верхньої лаври переважно представлено відносно стійкий клас, що просторово узгоджується з вирівняним рельєфом, незначними ухилами та більшою глибиною залягання ґрунтових вод. Водночас поблизу підземних

комунікацій, інженерних споруд і ділянок порушеного водовідведення в окремі періоди виділяються локальні осередки незадовільного класу (Hudak et al., 2021).

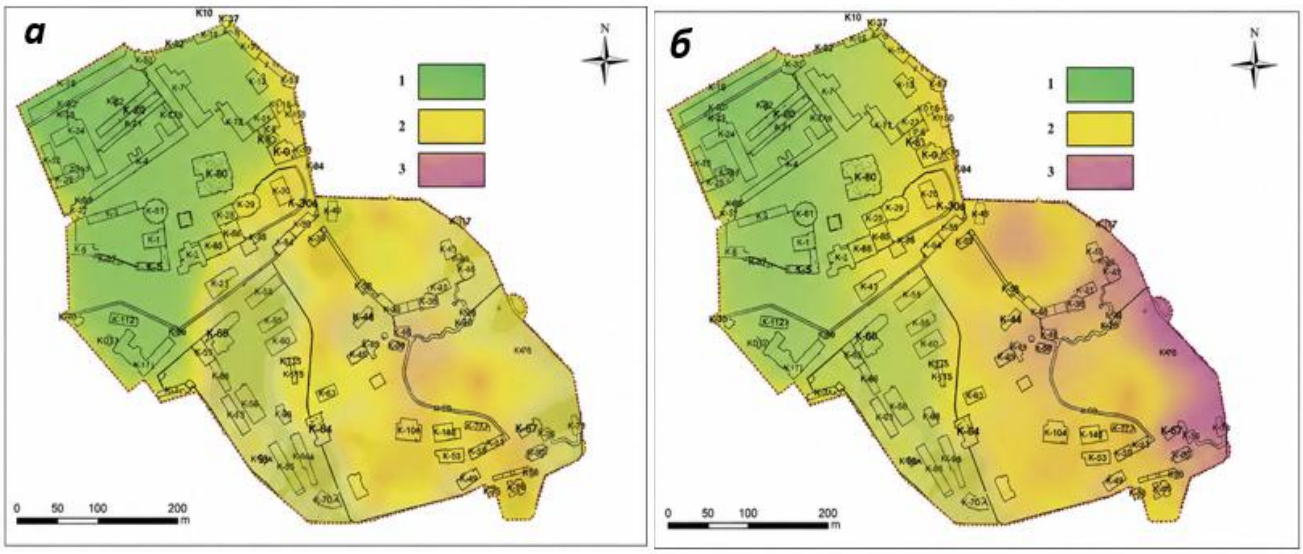


Рис. 5.9. Різночасове оцінювання геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври (1 – відносно стійкий клас; 2 – незадовільний клас; 3 – небезпечний клас)*: а – поширення незадовільного й небезпечного класів у межах Ближньопечерного та Дальньопечерного пагорбів і прилеглих схилів за інформаційним станом моніторингових даних на 2022 р.; б – просторовий розподіл класів у межах Верхньої лаври та локальних ділянок поблизу інженерних об'єктів і зон порушеного водовідведення за інформаційним станом моніторингових даних на 2023 р.*

У Нижній лаврі переважає незадовільний клас із локальним поширенням небезпечного. Ця частина території характеризується нижчими гіпсометричними позначками, складними умовами поверхневого й підземного стоку, неглибоким заляганням ґрунтових вод, поширенням підземних споруд і локальними порушеннями дренування. Зміни конфігурації класів між часовими зрізами відображають реакцію моделі на мінливість часово залежних характеристик (Kril & Cherevko, 2023; Cherevko, Kril & Stanisz, 2026).

На схилах Ближньопечерного й Дальньопечерного пагорбів, а також у межах Лаврського яру незадовільний і небезпечний класи характеризуються відносно стійким просторовим положенням. Їх локалізація узгоджується зі

значними ухилами, ерозійним розчленуванням, неоднорідністю ґрунтової товщі, концентрацією поверхневого стоку та розвантаженням підземних вод. Сукупна дія цих умов формує передумови для зниження міцності ґрунтів і розвитку зсувних, ерозійних та суфозійно-просадкових процесів (Hudak et al., 2021; Cherevko et al., 2025).

За характером просторово-часового прояву виділено три типи ділянок:

1. ділянки зі сталим збереженням відповідного класу в різних часових зрізах;
2. ділянки з переходами між суміжними класами;
3. ділянки з поодинокою зміною класу в окремі періоди.

Стійкі осередки небезпечного класу визначають території першочергового моніторингового контролю. Переходи між незадовільним і небезпечним класами характеризують ділянки з підвищеною чутливістю модельної оцінки до зміни часово залежних характеристик. Поодинокі зміни класу потребують перевірки за первинними матеріалами відповідного періоду, оскільки можуть бути пов’язані як із фактичною мінливістю стану території, так і з локальною невизначеністю вихідних даних або модельного рішення.

Загальний просторовий розподіл характеризується підвищенням модельної оцінки геологічної нестійкості від вирівняних вододільних поверхонь до розчленованих схилів, тальвегів і знижених, більш обводнених ділянок. Межі класів не завжди збігаються з адміністративним або функціональним поділом території, оскільки визначаються просторовим поєднанням геологічних, геоморфологічних, гідрогеологічних і техногенних умов.

5.3.3. Геологічна інтерпретація ділянок небезпечного класу

Для геологічної інтерпретації результатів розглянуто вибірку різночасових карт, що характеризують типові варіанти просторового розподілу класів геологічної нестійкості. До вибірки включено часові зрізи за 2009, 2013, 2015 і 2017 рр. (рис. 5.10), які відображають відмінності у поширенні та конфігурації незадовільного й небезпечного класів за різного інформаційного стану моніторингових даних (Hudak & Zatserkovnyi, 2026).

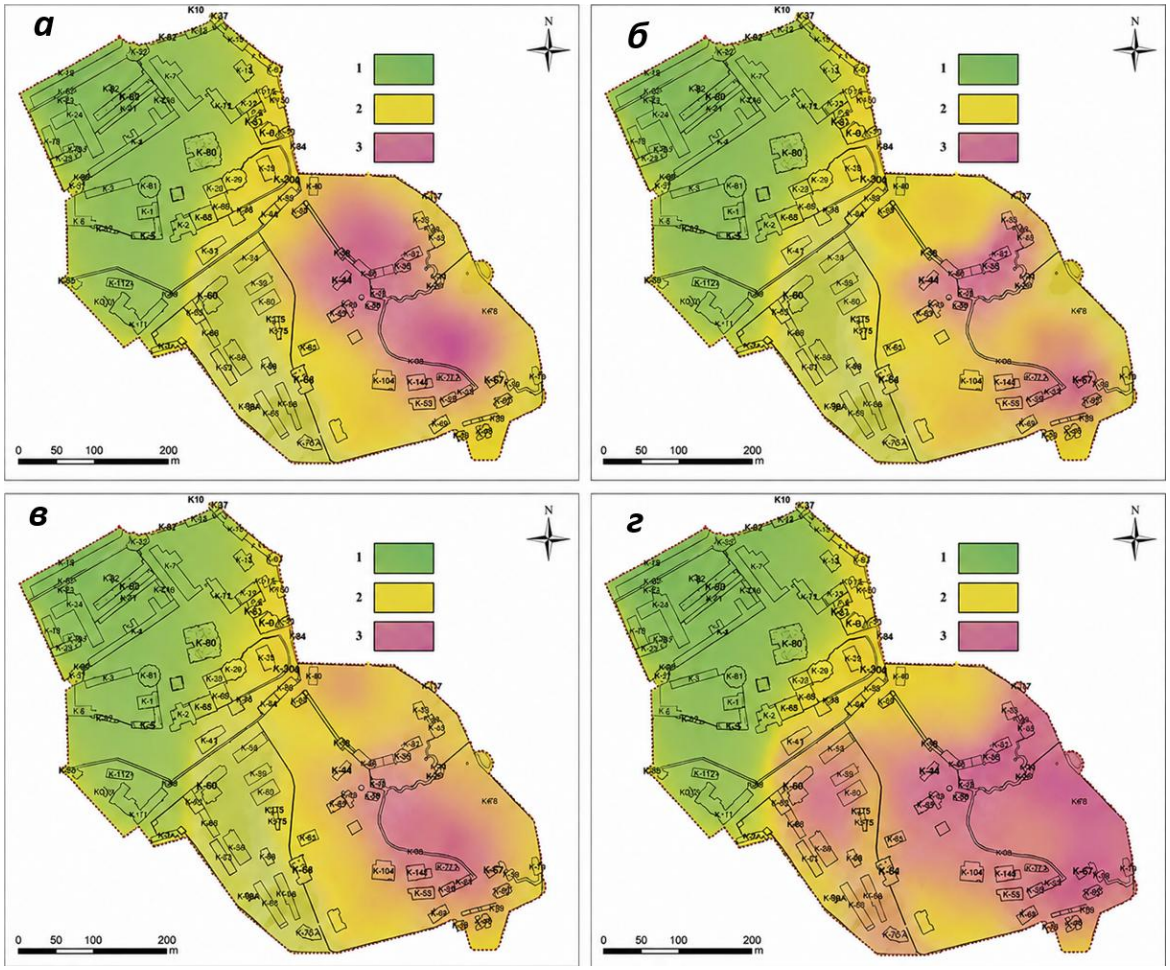


Рис. 5.10. Карти просторового розподілу класів геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври за окремими часовими зрізами (1, відносно стійкий клас; 2, незадовільний клас; 3, небезпечний клас): *а – локальні ділянки небезпечного рівня в межах печерних комплексів і прилеглих схилів, 2017 р.; б – підвищена нестійкість схилів Ближніх печер і Лаврського яру, осінь 2015 р.; в – переважання відносно стійкого рівня з локальними ділянками незадовільного та небезпечного класів, 2013 р.; г – розширення ділянок підвищеної нестійкості за сезонного підвищення рівнів ґрунтових вод, весна 2009 р.*

Розглянуті карти засвідчили відносну сталість просторового положення основних осередків небезпечного класу за одночасної зміни їх площі та конфігурації. Повторне виділення небезпечного класу в межах тих самих ділянок указує на збереження подібного несприятливого поєднання природних, техногенних і моніторингових характеристик. Натомість розширення,

скорочення або фрагментація відповідних зон відображають реакцію модельної оцінки на зміну часово залежних вхідних ознак.

За інформаційним станом даних на 2017 р. найбільш виразні локальні осередки небезпечного класу встановлено в межах печерних комплексів і прилеглих схилів. Їх просторове положення відповідає ділянкам поширення підземних виробок, складного водообміну та задокументованих порушень технічного стану печерних споруд (Черевко & Куциба, 2011; Левашов та ін., 2005, 2008; Hudak et al., 2021).

За часовим зрізом осені 2015 р. незадовільний і небезпечний класи поширені переважно на схилах Ближньопечерного пагорба та в межах Лаврського яру. Конфігурація цих зон відповідає ділянкам зі значними морфометричними градієнтами, складними умовами поверхневого й підземного стоку та локальним техногенним впливом. Отриманий розподіл характеризує сукупний результат взаємодії просторово сталих факторів із моніторинговими ознаками відповідного періоду, а не дію окремого домінантного чинника (Kril & Cherevko, 2023; Hudak et al, 2025a; Hudak et al, 2025b).

Наведені карти характеризують просторово-часову мінливість інтегральної модельної оцінки, а не безпосередню активізацію конкретних екзогенних геологічних процесів.

5.4. Верифікація результатів просторово-часового моделювання

Результати тестового оцінювання підтвердили здатність моделі відтворювати цільові класи на просторово відокремлених даних. Для додаткового обґрунтування геологічної змістовності сформованих карт виконано їх верифікацію за матеріалами, що характеризують фактичні зміни стану земної поверхні, ґрунтового масиву та інженерних об’єктів.

Верифікацію проведено за двома взаємодоповнювальними напрямами. Внутрішню узгодженість визначено шляхом порівняння нейромережевої та інтегральної факторної оцінок. Незалежну предметну перевірку виконано за

задокументованими деформаційними проявами, даними супутникової радарної інтерферометрії та результатами геофізичних досліджень.

До незалежної перевірки залучено лише матеріали, які не використовувалися під час формування відповідного часового зрізу, цільових класів або параметрів моделі. Для ретроспективних оцінок дотримано хронологічного принципу: модельні карти порівнювались з проявами та інструментально встановленими змінами, не включеними до відповідних вхідних масивів. Просторова відповідність незалежним контрольним матеріалам розглядалась як додаткове підтвердження змістової обґрунтованості виділених класів, але не як доказ причинно-наслідкового зв’язку або прогноз виникнення конкретного геологічного процесу.

5.4.1 Внутрішня узгодженість модельної та інтегральної оцінок

Внутрішню узгодженість результатів моделювання оцінено шляхом порівняння нейромережевої карти з класами, сформованими за інтегральним індексом геологічної нестійкості. Інформаційною основою інтегральної факторної оцінки слугували матеріали геоінформаційної бази «LAVRA-GEO» та результати комплексного дослідження території, у межах якого узагальнено інженерно-геологічні, гідрогеологічні, геодезичні, геофізичні й технічні матеріали щодо стану території та нерухомих пам’яток Києво-Печерської лаври (Бугай та ін., 2023; Комплексне дослідження, 2023).

Оскільки класи інтегральної оцінки використано як цільові мітки, проведене порівняння характеризує здатність моделі відтворювати прийняту класифікаційну схему. Аналіз виконано в однакових просторових межах для спільної сукупності валідних комірок. Для кожної комірки визначено відповідність між класом інтегральної оцінки та класом, встановленим нейромережевою моделлю (рис. 5.11).

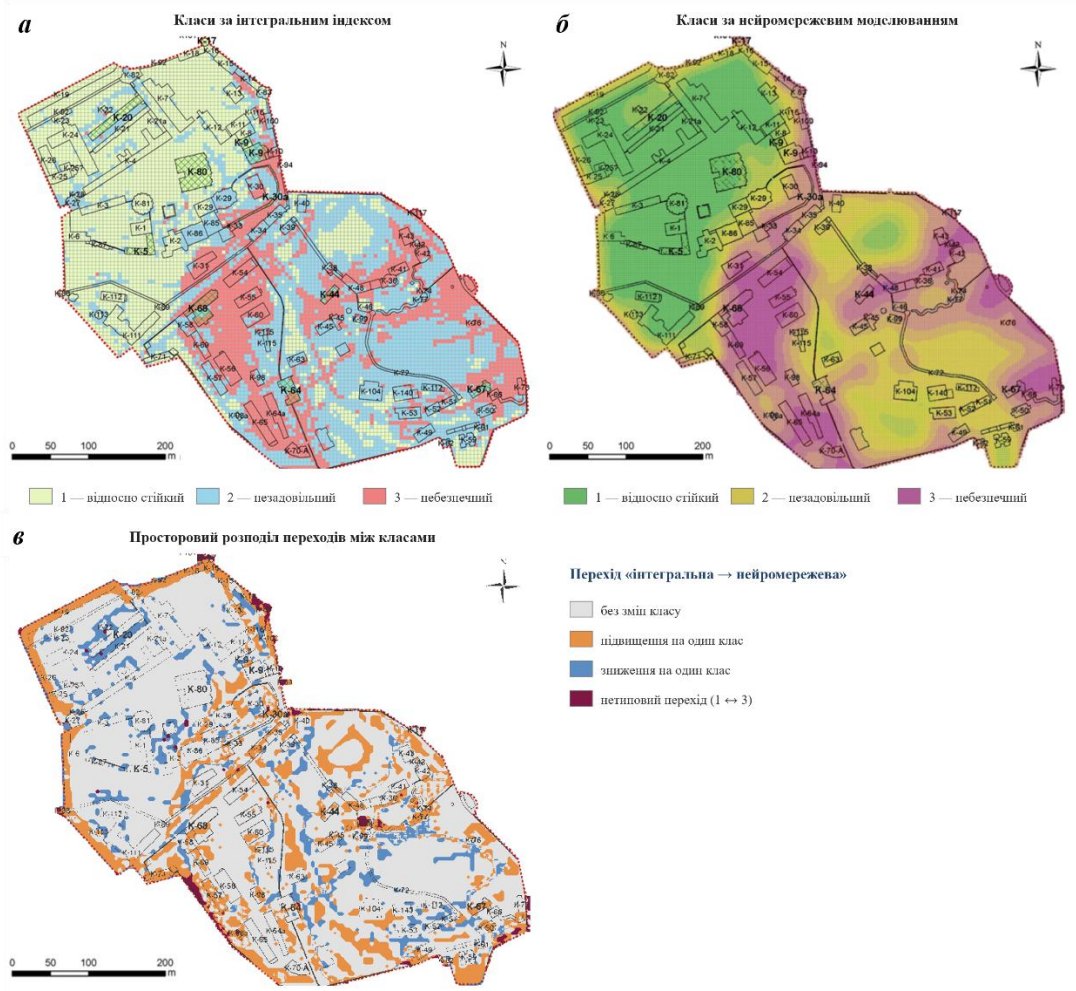


Рис. 5.11. Порівняння інтегральної факторної та нейромережевої оцінок геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври: *а – класи за інтегральним індексом; б – класи за результатами нейромережевого моделювання; в – просторовий розподіл переходів між класами*

Результати вказують на загальне збереження просторової структури інтегральної оцінки. Відмінності зосереджуються переважно поблизу меж класів і в межах просторово неоднорідних ділянок. Врахування просторового оточення та моніторингових ознак сприяло зменшенню кількості ізольованих комірок і формуванню просторово узгодженіших контурів незадовільного та небезпечного класів (Комплексне дослідження, 2023).

Для кількісної характеристики відмінностей сформовано матрицю переходів між класами інтегральної та нейромережевої оцінок (рис. 5.12). Матриця відображає частку комірок, що зберегли початковий клас, а також переходи між відносно стійким, незадовільним і небезпечним класами.

Найбільше інтерпретаційне значення мають переходи між суміжними класами. Безпосередні переходи між відносно стійким і небезпечним класами розглядали як нетипові випадки, що потребують перевірки вихідних даних і визначеності модельного рішення.

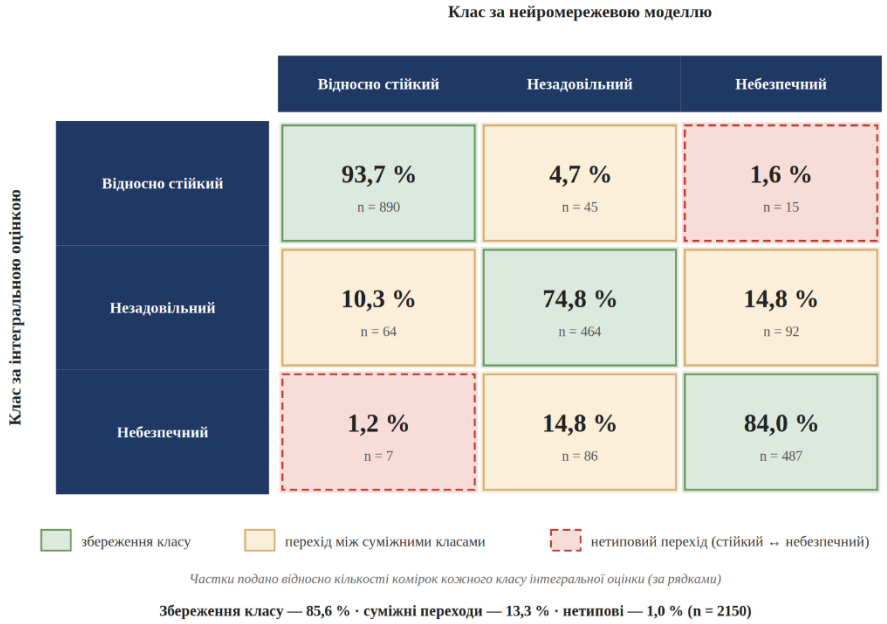


Рис. 5.12. Матриця переходів між класами інтегральної та нейромережевої оцінок геологічної нестійкості для валідних комірок досліджуваної території; частки нормовано відносно класів інтегральної оцінки

Для різночасових результатів порівняння виконано з інтегральною оцінкою, що відповідала інформаційному стану факторів F1–F17 у відповідний період. Якщо ретроспективні зміни окремих базових факторів не були документально підтверджені, відповідні фактори залишались незмінними. За таких умов відмінності між різночасовими нейромережевими картами характеризують передусім реакцію моделі на зміни часово залежних гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних ознак.

Збереження основних просторових закономірностей підтверджує внутрішню узгодженість модельного результату з прийнятою класифікаційною схемою. Виявлені переходи характеризують нелінійне просторове уточнення інтегральної оцінки, але не є незалежним підтвердженням зміни фактичного стану геологічного середовища.

5.4.2. Верифікація за фактичними проявами геологічних процесів

Незалежну предметну верифікацію результатів моделювання виконано за трьома взаємодоповнювальними групами контрольних матеріалів: задокументованими проявами деформацій, даними супутникової радарної інтерферометрії та наявними архівними результатами геофізичних досліджень. Зазначені матеріали характеризують відповідно поверхневі прояви порушень, зміщення земної поверхні й інженерних об’єктів та локальні неоднорідності стану ґрунтового масиву.

Контрольними даними про фактичні прояви слугували відомості щодо провалів, просідань, тріщин і деформацій земної поверхні та нерухомих пам’яток. Відповідні матеріали отримано в ході планових і позапланових обстежень, які регулярно проводяться працівниками Національного заповідника «Києво-Печерська лавра». Для просторової перевірки використано прояви, задокументовані у 2019–2025 рр. Відомості про стан території та об’єктів доповнено матеріалами проєкту (Комплексне дослідження, 2023).

До контрольного набору включено лише матеріали, які не використовувалися під час формування відповідного часового зрізу. Події, відомості про які вже було враховано у моделі, не розглядались як незалежні контрольні об’єкти. Для кожного прояву використовувалась модельну карту, сформована за інформаційним станом, що передував його документуванню або не містив відомостей про відповідну подію. Такий підхід забезпечив хронологічну незалежність перевірки та виключив повторне використання тієї самої інформації.

Просторовий аналіз виконано шляхом накладання локалізованих проявів на відповідні різночасові карти. Для кожного контрольного об’єкта визначено модельний клас комірки та його положення відносно меж незадовільного й небезпечного класів. З огляду на локальний характер окремих провалів і деформацій оцінювалась приуроченість прояву до модельної зони, а не точний збіг геометричних контурів.

Більшість незалежних контрольних проявів розташована в межах незадовільного й небезпечного класів або поблизу меж між ними. Характерним прикладом є територія поблизу корпусів № 6 і № 112, де задокументовано провал земної поверхні з оголенням підземних комунікацій (рис. 5.13). На ретроспективній модельній карті цю територію було віднесено до зони підвищеної геологічної нестійкості. Встановлена відповідність характеризує просторову приуроченість фактичного порушення до несприятливої модельної зони, але не визначає безпосередньої причини його виникнення (Черевко та ін., 2022; Zatserkovnyi, Hudak & Bohush-Zadnipriana, 2026).

Для інструментальної перевірки використано дані PS-InSAR, представлені часовими рядами зміщень постійних радарних розсіювачів. Із загального набору відібрано точки зі стійкими тенденціями зміщень, просторовий розподіл яких проаналізовано відносно модельних класів геологічної нестійкості (Liu et al., 2023; Hudak, Kril & Zatserkovnyi, 2025; Zatserkovnyi, Hudak & Bohush-Zadnipriana, 2026).

Точки з найбільш вираженими тенденціями зміщень переважно приурочені до незадовільного й небезпечного класів або розташовані поблизу меж між ними. Такий розподіл засвідчує просторову відповідність між модельний класом та інструментально встановленими зміщеннями. Водночас дані радарної інтерферометрії самостійно не визначають механізм деформування, оскільки їх інтерпретація потребує врахування геометрії знімання, стану об’єктів та локальних інженерно-геологічних умов (Hudak, Kril & Zatserkovnyi, 2025).

Геофізичну складову перевірки сформовано за результатами досліджень саду над Ближніми печерами та прилеглих ділянок. Визначені геофізичними методами зони розущільнення ґрунтового масиву, осередки підвищеного зволоження та напрями латеральної міграції підземних вод проаналізовано відносно просторового положення модельних класів. Основна частина встановлених неоднорідностей розташована в межах незадовільного й небезпечного класів або безпосередньо поблизу їхніх меж (Cherevko et al., 2025).

Для точкових контрольних даних визначено їх розподіл між класами геологічної нестійкості. Для геофізичних матеріалів, представлених площинними зонами, оцінено частку просторового перекриття з незадовільним і небезпечним класами. Застосування різних процедур зумовлене відмінностями просторового представлення контрольних матеріалів (Hudak, 2025).

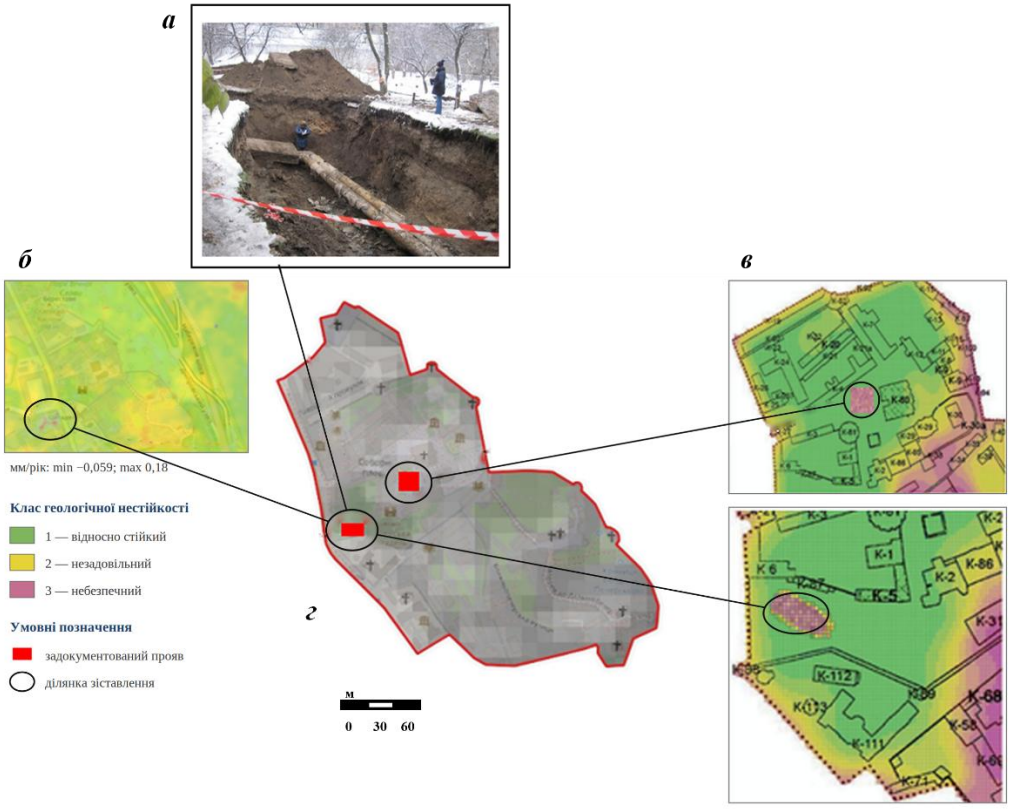


Рис. 5.13. Просторова відповідність незадовільного та небезпечного класів геологічної нестійкості задокументованим провалам, просіданням і деформаціям земної поверхні у 2019–2025 рр.: *а – задокументована зміна земної поверхні; б – зміщення земної поверхні за даними PS-InSAR; в – фрагменти модельної карти класів геологічної нестійкості; г – локалізація контрольних проявів, зафіксованих за допомогою плагіна, із виділенням відповідних пікселів модельної карти*

Просторова відповідність модельних класів задокументованим деформаційним проявам, радарним зміщенням і геофізично встановленим неоднорідностям додатково підтверджує змістову обґрунтованість результатів просторово-часового моделювання. Незалежні контрольні матеріали

характеризують різні складові стану території та взаємно доповнюють одне одного. Водночас проведена верифікація має підтверджувальний характер і не є прогнозом місця, часу або механізму виникнення конкретного геологічного процесу.

5.5. Практичне застосування результатів для моніторингу Києво-Печерської лаври

Практичне значення результатів моделювання полягає в можливості їх інтегрування до системи комплексного моніторингу території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра». Карта геологічної нестійкості може використовуватися як узагальнювальний просторовий шар, що забезпечує спільне представлення модельних класів, прогнозованих імовірностей та первинних даних спостережень у єдиному геоінформаційному середовищі.

Просторово неперервне представлення результатів дає змогу зіставляти різні за походженням матеріали, визначати ділянки зі стійким поширенням незадовільного й небезпечного класів, аналізувати зміни їх площі та конфігурації, оцінювати охоплення території мережею спостережень і обґрунтовувати пріоритети інструментального контролю. Водночас сформована карта не замінює спеціалізованих інженерно-геологічних, гідрогеологічних, геофізичних і геодезичних досліджень. Вона призначена для просторової систематизації моніторингової інформації та визначення ділянок, які потребують додаткового обстеження (Hudak, 2025).

Запропонована схема передбачає регулярне оновлення модельної оцінки за даними різного походження, приведеними до узгодженої просторової структури. Збереження системи координат, просторових параметрів, складу й послідовності каналів, а також процедури числового перетворення забезпечує зіставність карт, сформованих для різних періодів. Розроблену модель адаптовано до природно-техногенних умов Києво-Печерської лаври, тому її застосування до інших територій потребуватиме формування відповідної інформаційної основи,

навчальної вибірки та повторного оцінювання якості (Hudak & Zatserkovnyi, 2026).

Актуалізацію карти здійснюють шляхом оновлення часово залежних вхідних ознак. Для кожної нової дати картографування характеристики рівнів ґрунтових вод повторно обчислюють у межах п’ятирічного рухомого вікна, кінцева дата якого відповідає даті актуалізації. Ознаку *Deformation* оновлюють за відомостями про нові або повторно зафіксовані деформаційні прояви, а ознаку *Anomaly* формують за результатами опрацювання актуальних матеріалів дистанційного зондування Землі. Фактори F1–F17 переглядають лише за наявності документально підтверджених змін природних або техногенних умов території.

Оновлені дані проходять ту саму процедуру контролю якості, просторового узгодження та числового перетворення, що й вихідний модельний набір. Для нормалізації кількісних характеристик застосовують параметри, визначені за навчальною множиною. Збереження структури каналів, їх послідовності, просторових параметрів і числових шкал є необхідною умовою коректного повторного застосування моделі (Zatserkovnyi, Hudak & Bohush-Zadnipriana, 2026; Гудак та Богуш-Задніпряна? 2026).

Після підготовки актуалізованого масиву застосовують зафіксований стан навченої моделі без зміни її параметрів. У результаті формуються нова карта класів геологічної нестійкості та відповідні растрові шари прогнозованих імовірностей. Перед застосуванням моделі перевіряють відповідність статистичних характеристик нових даних розподілам і діапазонам, представленим у навчальній множині. Істотне зміщення розподілів, поява нових типів даних або значень, не представлених під час навчання, потребують додаткового оцінювання надійності модельних результатів.

Повторне навчання або адаптація моделі є доцільними в разі зміни складу чи способу формування вхідних каналів, істотної трансформації природно-техногенних умов, перегляду принципів визначення цільових класів або зниження якості моделі на нових контрольних даних. Таке навчання має

здійснюватися зі збереженням просторового принципу поділу даних на навчальну, валідаційну та тестову множини. Остаточне оцінювання оновленої моделі повинно виконуватися на просторово відокремленій тестовій множині, яка не використовувалася для оптимізації параметрів і вибору її конфігурації.

Актуалізовану карту порівнюють із результатами попередніх періодів за змінами площі та конфігурації класів, положенням їх меж, появою нових осередків і динамікою прогнозованої імовірності небезпечного класу. Зростання цієї імовірності розглядається як індикатор можливої несприятливої зміни стану території, що потребує перевірки за первинними режимними й інструментальними спостереженнями. Близькі значення імовірностей належності до кількох класів характеризують знижену однозначність модельного рішення, але не є самостійним підтвердженням перехідного стану геологічного середовища.

Послідовність актуалізації охоплює надходження нових спостережень, перевірку їх якості, оновлення часово залежних ознак, контроль відповідності нових даних навчальним діапазонам, застосування зафіксованої моделі, формування нової карти та її зіставлення з попереднім часовим зрізом (рис. 5.14).

Інтеграція результатів моделювання до геоінформаційної системи забезпечує перехід від роздільного аналізу режимних, інструментальних і дистанційних спостережень до їх узгодженої просторово-часової інтерпретації. Методичний внесок полягає у формуванні відтворюваної процедури просторового оцінювання, яка поєднує різні компоненти моніторингової інформації та створює основу для систематичного контролю змін модельної геологічної нестійкості території.

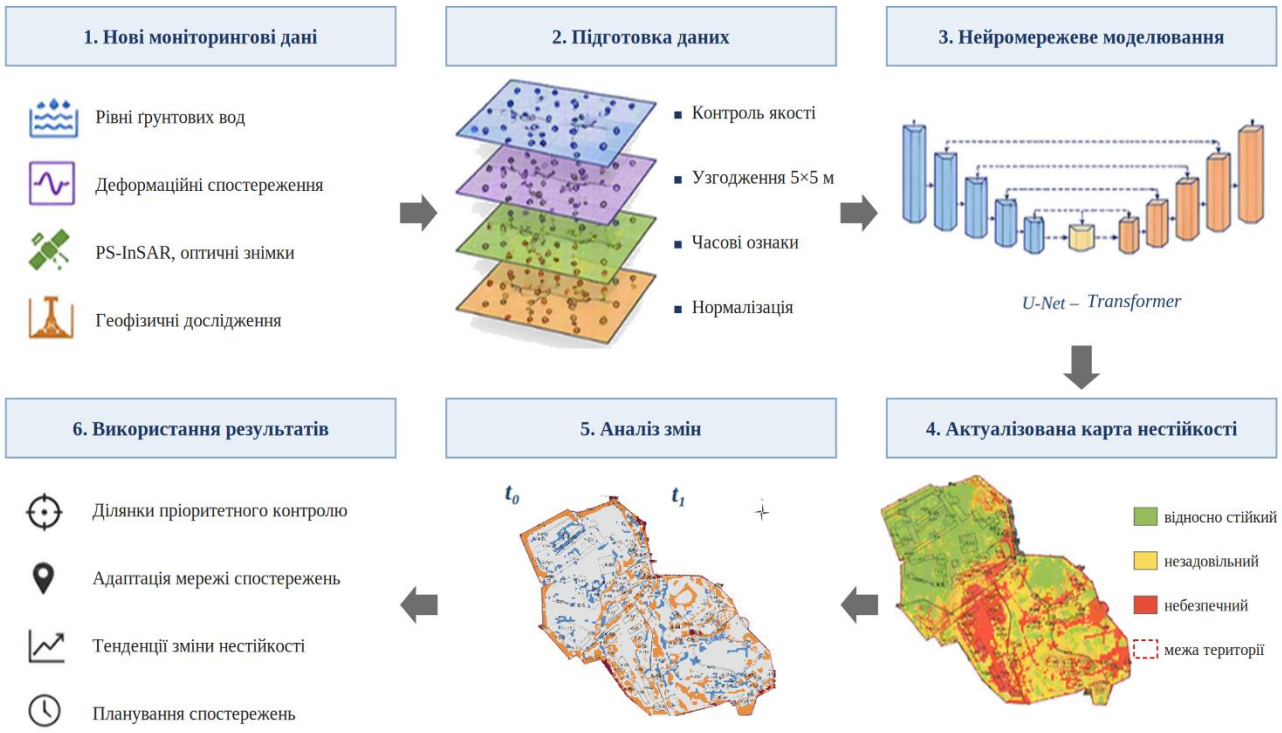


Рис. 5.14. Послідовність актуалізації карти геологічної нестійкості території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» за результатами нових моніторингових спостережень

Перспективним напрямом розвитку запропонованого підходу є поєднання просторового моделювання з прогнозуванням часових рядів рівнів ґрунтових вод і радарно встановлених зміщень. Прогнозовані значення часово залежних характеристик можуть використовуватися для формування сценарних вхідних масивів і побудови карт можливої зміни просторового розподілу модельних класів (Гудак, 2025). Зміст прогнозованого показника радарних зміщень має відповідати типу вихідного продукту: зміщенням уздовж лінії візування супутника або вертикальній складовій, якщо її визначено за відповідною процедурою опрацювання.

Сценарні карти не слід трактувати як прогноз місця й часу виникнення конкретного провалу, зсуву, просідання або пошкодження нерухомої пам’ятки. Вони характеризуватимуть можливу зміну модельно оцінених умов геологічної нестійкості за прийнятого сценарію динаміки вхідних показників. Їх практичне застосування потребуватиме перевірки за спостереженнями наступних періодів, урахування сезонності та кількісного оцінювання невизначеності прогнозу.

Отже, інтеграція й періодична актуалізація карти забезпечують формування зіставного просторово-часового ряду модельних оцінок. Його використання створює основу для визначення ділянок зі стійким несприятливим класом, виявлення негативної динаміки, оцінювання просторової репрезентативності мережі спостережень, коригування програми моніторингу та обґрунтування напрямів подальших інструментальних досліджень (Гудак, 2025).

Інтеграція результатів моделювання до геоінформаційної системи моніторингу забезпечує перехід від окремого аналізу режимних, інструментальних і дистанційних спостережень до їх узгодженої просторово-часової інтерпретації. Авторський внесок у цьому контексті полягає у формуванні відтворюваної просторової оцінки, яка поєднує різні компоненти моніторингової інформації та створює основу для систематичного контролю змін геологічної нестійкості території.

Перспективним напрямом розвитку запропонованого підходу є поєднання просторового моделювання з прогнозуванням часових рядів рівнів ґрунтових вод і радарно встановлених зміщень. Прогнозовані значення часово залежних характеристик можуть використовуватися для формування сценарних вхідних масивів і побудови карт можливої зміни просторового розподілу модельних класів. Такі карти мають розглядатися як сценарні оцінки геологічної нестійкості, а не як прогноз місця й часу виникнення конкретного провалу, зсуву, просідання або пошкодження нерухомої пам’ятки (Hudak, 2025). Їх практичне застосування потребуватиме перевірки за спостереженнями наступних періодів, урахування сезонності та кількісного оцінювання невизначеності прогнозу

Отже, інтеграція й періодична актуалізація карти забезпечують формування відтворюваного просторово-часового ряду модельних оцінок. Його використання створює основу для визначення ділянок зі стійким несприятливим класом, виявлення змін модельної оцінки, коригування програми моніторингу та обґрунтування напрямів подальших інструментальних досліджень.

Висновки до розділу 5

У розділі розроблено та апробовано нейромережевий підхід до просторового відтворення й різночасового картографування інтегральної оцінки геологічної нестійкості території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра».

1. Сформовано цільову оцінку геологічної нестійкості на основі зваженого агрегування природних і техногенних факторів геоінформаційної бази «LAVRA-GEO». Підготовлено 22-канальний просторовий масив ознак у межах регулярної сітки, до якого включено характеристики часової мінливості рівнів ґрунтових вод, деформаційного стану та дистанційно виявлених геопросторових аномалій.

2. Обґрунтовано застосування гібридної архітектури U-Net–Transformer, що забезпечує спільне врахування локальних просторових особливостей і контекстних залежностей ширшого масштабу. Для зменшення просторового витоку інформації застосовано блоковий поділ даних на навчальну, валідаційну й тестову підмножини, а нерівномірну представленість класів ураховано за допомогою зваженої функції втрат. За результатами оцінювання на просторово відокремленій тестовій підмножині загальна частка правильних класифікацій перевищила 0,85, а F1-міра для небезпечного класу становила близько 0,83. Отримані показники підтвердили здатність моделі відтворювати цільові класи на ділянках, не залучених до навчання та вибору остаточного стану моделі.

3. На основі зафіксованого стану моделі сформовано серію різночасових карт геологічної нестійкості з виділенням відносно стійкого, незадовільного та небезпечного класів. Зміни площі й конфігурації класів у різних часових зрізах відображають реакцію моделі на мінливість гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних ознак.

4. Додаткову змістову верифікацію результатів виконано за задокументованими провалами, просіданнями й деформаціями земної поверхні, даними PS-InSAR та матеріалами геофізичних досліджень. Просторова відповідність модельних класів різним за фізичною природою контрольним матеріалам підтвердила обґрунтованість виділення ділянок першочергового

моніторингового контролю, але не розглядалася як доказ причин виникнення або прогноз конкретного геологічного процесу.

5. Обґрунтовано інтегрування результатів моделювання до геоінформаційної системи комплексного моніторингу як регулярно оновлюваного узагальнювального просторового шару. Уніфікована структура вхідних даних і застосування зафіксованого стану моделі забезпечують формування порівнюваних карт після надходження нових режимних, деформаційних і дистанційних спостережень. Це створює основу для виявлення ділянок зі стійким збереженням незадовільного або небезпечного класу, аналізу просторово-часової мінливості модельних оцінок, оцінювання репрезентативності мережі спостережень та обґрунтування деталізованого інструментального контролю.

Список використаних джерел до розділу 5:

Бугай, Д. О., Щербина, С. В., Кріль, Т. В., Черевко, І. А., & Шехунова, С. Б. (2023). Огляд сучасних технологій «моніторингу структурного здоров'я» історичних будівель у складних інженерно-геологічних умовах: сенсори, методи аналізу даних та перспективи застосування в НЗ «Києво-Печерська лавра». *Збірник наукових праць ІГН НАН України, 16*(2), 76–86. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.293237

Вижва, З. О. (2011). Статистичне моделювання випадкових процесів та полів. Київ: *ВГЛ Обрії*.

Гудак, В. (2025). Нейромережеве прогнозування геологічних ризиків історико-культурних об'єктів. Авторська редакція збірника тез *XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Об'єднані наукою: перспективи міждисциплінарних досліджень»*, Київ, 20-21 листопада 2025.

Гудак, В., та Богуш-Задніпряна А. (2026). Оцінювання просторової нестійкості геологічного середовища урбанізованих територій на основі комплексного аналізу геоданих. Авторська редакція збірника тез *XVI Всеукраїнської молодіжної наукової конференції - школи «Сучасні проблеми наук про Землю»*, Київ, 9-10 квітня 2026. URI: https://geology.knu.ua/static/docs/conf/2026/conf_univ_young_2026.pdf

Жуков, М. Н. (2008). Математична статистика та обробка геологічних даних. Київ: *Видавничо-поліграфічний центр Київського національного університету імені Тараса Шевченка*.

Комплексне дослідження геоекологічного стану збереження об'єктів історико-культурної спадщини Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах воєнних дій. (2023). Наук. кер. Д. О. Бугай. Науковий звіт. Київ.

Левашов, С. П., Піщаний, Ю. М., & Корчагін, І. М. (2005). Геофізичні вишукування ділянки саду Свято-Успенської Києво-Печерської лаври: *звіт про НДР*. Київ.

Левашов, С. П., Піщаний, Ю. М., & Корчагін, І. М. (2008). *Геофізичне обстеження території Свято-Успенської Києво-Печерської лаври в районі саду над Ближніми печерами: звіт про НДР*. Київ.

Черевко, І. А., & Куциба, В. О. (2011). Дослідження мікроклімату та інженерно-геологічних умов Ближніх печер. *Дива печер лаврських* (2-ге вид., с. 225–237). Київ.

Черевко, І., Зацерковний, В., Трофименко, П., Пампуха, І., Попков, Б., & Гудак, В. (2022). Застосування бази геоданих режимних спостережень за гідрогеологічними умовами території Києво-Печерської лаври та її аналіз. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, *3*(98), 92-103. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.12

Alorf, A. (2025). Transformer and convolutional neural network: A hybrid model for multimodal data in multiclass classification of Alzheimer's disease. *Mathematics, 13*(10), 1548. https://doi.org/10.3390/math13101548

Cherevko, I., Kril, T., Bugai, D., & Shekhunova, S. (2025). Impact of hydrogeological factors on geotechnical conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: Lessons from three decades of monitoring. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater, 13*(3). https://doi.org/10.7343/as-2024-765

Cherevko, I., Kril, T., & Stanisz, J. (2026). Geotechnical study of the linear structures on the slopes of the Kyiv-Pechersk Lavra. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1630/1/012059

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., et al. (2021). An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929

Hejmanowska, B., Michałowska, K., Kramarczyk, P., & Głowienka, E. (2025). The potential of U-Net in detecting mining activity: Accuracy assessment against GEE classifiers. *Applied Sciences, 15*(17), 9785. https://doi.org/10.3390/app15179785

Hudak, V., Zatserkovnyi, V., Cherevko, I., Ilchenko, A., & Ilyin, L. (2021). Monitoring of monuments of the Kyiv-Pechersk Lavra in the conditions of flooding processes

development. *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Jan 2021, Volume 2021, p.1 – 5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2074

Hudak, V. (2025). Data-Driven Neural Network Approach to Geohazard Classification and Risk Evaluation. Авторська редакція збірника тез *XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Молодь: наука та інновації»*, Дніпро, 12–14 листопада 2025 (у 3-х томах) (Т. 1, с. 289-290). URI: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2025/molod-2025-vol1.pdf

Hudak, V., & Kril, T. (2025a). 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*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510054

Hudak, V., & Kril, T. (2025b). Automated reconstruction of missing geospatial data at the pre-modeling stage of exogenous geological processes. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025"*, Lviv, Ukraine. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552081

Hudak, V., & Zatserkovnyi, V. (2026). Data-driven assessment of geological environment stability in urbanized areas: A case study of the Kyiv-Pechersk Lavra. *Geographical Journal of Lesya Ukrainka Volyn National University, 7*. https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2026.7.14

Hudak, V., Kril, T., & Zatserkovnyi, V. (2025). Remote sensing analysis of vertical surface displacements as an indicator of underground structure deformations. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology, 1*(108), 94–102. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13

Hudak, V., Marhes, S., Zatserkovnyi, V., & De Donatis, M. (2025a). Methodology for the automated detection of anomalous geospatial zones in satellite imagery using statistical analysis and a custom QGIS plugin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology, 3*(110), 117–126. https://doi.org/10.17721/1728-2713.110.13

Hudak, V., Semeniaka, V., Zatserkovnyi, V., Stakhiv, I., Ilyin, L., & Pastushenko, T. (2025b). Integrative landslide prediction model in Transcarpathia. *Fifth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520016

Hudak, V., Zatserkovnyi, V., Cherevko, I., Ilchenko, A., & Ilyin, L. (2021). Monitoring of monuments of the Kyiv-Pechersk Lavra in the conditions of flooding processes development. *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2074

Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and Practice* (3rd ed.). OTexts. https://otexts.com/fpp3/

Ivanik, O., Fonseca, J., Shabatura, O., Khomenko, R., Hadiatska, K., & Kravchenko, D. (2022). An integrated approach for landslide hazard assessment: A case study of the Middle Dnieper Basin, Ukraine. *Journal of Water and Land Development, 52*, 81–86. https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139947

Kavya M. & Saravanan K. (2025). Evaluating hybrid and machine learning models for landslide susceptibility mapping in a high-risk region of the Western Ghats, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1), 2595694. https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2595694

Kril, T., & Cherevko, I. (2023). Identification of unstable (landslide hazard) areas on Lavra Far-Caves Hill. *4th EAGE Workshop on Landslide Hazards*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500017

Kril, T., Shekhunova, S., & Cherevko, I. (2023). Identification of potentially unstable areas by engineering and geological processes monitoring. *17th EAGE Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520203

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature, 521*, 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Lin, T.-Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2017). Focal loss for dense object detection. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2980–2988. https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324

Liu, M., Yang, W., Yang, Y., Guo, L., et al. (2023). Identify landslide precursors from time series InSAR results. *International Journal of Disaster Risk Science, 14*, 963–978. https://doi.org/10.1007/s13753-023-00532-8

Loshchilov, I., & Hutter, F. (2019). Decoupled weight decay regularization. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

Ma, Z., & Mei, G. (2021). Deep learning for geological hazards analysis: Data, models, applications, and opportunities. *Earth-Science Reviews, 223*, 103858. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103858

Mahoney, M. J., Johnson, L. K., Silge, J., Frick, H., Kuhn, M., & Beier, C. M. (2023). Assessing the performance of spatial cross-validation approaches for models of spatially structured data. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.07334

Noroozi, M., & Riahi, M. A. (2025). Using deep learning for facies classification in geological exploration: Feedforward neural network vs. convolutional neural network approaches. *Bulletin of Geophysics and Oceanography, 66*(3), 269–280. https://doi.org/10.4430/bgo00495

Roberts, D. R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M. S., Elith, J., Guillera-Arroita, et al. (2016). Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography, 40*(8), 913–929. https://doi.org/10.1111/ecog.02881

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015* (LNCS Vol. 9351, pp. 234–241). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process: What it is and how it is used. *Mathematical Modelling, 9*(3–5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process. *McGraw-Hill.*

Stock, A. (2025). Choosing blocks for spatial cross-validation: Lessons from a marine remote sensing case study. *Frontiers in Remote Sensing, 6*, 1531097. https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1531097

Sun, K., Hu, Y., Lakhanpal, G., & Zhou, R. Z. (2023). Spatial cross-validation for GeoAI. In *Handbook of Geospatial Artificial Intelligence* (pp. 201–214). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003308423-10

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A., et al. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems, 30*, 5998–6008.

Wang, Y., Khodadadzadeh, M., & Zurita-Milla, R. (2023). Spatial+: A new cross-validation method to evaluate geospatial machine learning models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 121*, 103364. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103364

Wolf, T., Debut, L., Sanh, V., Chaumond, J., Delangue, C., Moi, et al. (2020). Transformers: State-of-the-art natural language processing. *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*, 38–45. https://aclanthology.org/2020.emnlp-demos.6/

Zatserkovnyi, V., Hudak, V., & Bohush-Zadnipriana, A. (2026). Data-driven assessment of geological environment instability in urban heritage areas using a hybrid U-Net-Transformer neural network. *19th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, Ukraine. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202655070

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язано наукове завдання щодо розроблення методичного та геоінформаційного забезпечення комплексного моніторингу екзогенних геологічних процесів території Києво-Печерської лаври на основі інтегрування різнорідних даних, автоматизованого виявлення геопросторових аномалій і нейромережевого моделювання геологічної нестійкості.

1. Узагальнено теоретико-методологічні засади дослідження екзогенних геологічних процесів на урбанізованих територіях. Геологічну нестійкість обґрунтовано як інтегральну просторово-часову характеристику стану геологічного середовища, що відображає його схильність до розвитку небезпечних процесів під впливом природних і техногенних чинників. Це поняття розмежовано з ризиком, оцінювання якого потребує врахування експозиції, вразливості та можливих втрат.

2. Обґрунтовано комплексний методичний підхід до моніторингу, що поєднує інженерно-геологічні, гідрогеологічні, геодезичні, геофізичні, дистанційні та геоінформаційні методи. Для території Києво-Печерської лаври сформовано уніфіковану геопросторову інформаційну основу, яка містить природні й техногенні фактори, характеристики гідрогеологічного режиму, деформаційного стану та дистанційно виявлених аномалій.

3. Розроблено авторський QGIS-плагін для автоматизованого статистичного виявлення, векторизації та атрибутивного опису геопросторових аномалій. Апробація на різнотипних супутникових даних підтвердила універсальність математичної основи алгоритму. Для території Заповідника виявлено стійкі зони зміненого зволоження та простежено їх просторово-часову динаміку.

4. Сформовано інтегральну цільову оцінку геологічної нестійкості та побудовано гібридну модель U-Net–Transformer для її нелінійного просторового уточнення. Просторовий блоковий поділ даних і зважування функції втрат забезпечили коректне врахування автокореляції та нерівномірної

представленості класів. Загальна точність класифікації перевищила 0,85, а F1-міра для небезпечного класу становила близько 0,83.

5. За результатами моделювання побудовано карту з виділенням відносно стійкого, незадовільного та небезпечного рівнів геологічної нестійкості. Змістову обґрунтованість карти підтверджено зіставленням із задокументованими провалами, просіданнями та деформаціями земної поверхні, даними PS-InSAR і результатами геофізичних досліджень. Узгодженість цих джерел засвідчила відповідність виділених ділянок особливостям деформаційного та гідрогеологічного стану території.

6. Обґрунтовано інтеграцію результатів моделювання до системи комплексного моніторингу Заповідника. Періодична актуалізація карти за новими режимними, деформаційними та дистанційними даними дає змогу зіставляти стан території за різні періоди, виявляти несприятливу динаміку та визначати потребу в деталізованих дослідженнях. Перспективи розвитку підходу пов’язані з прогнозуванням часових рядів рівнів ґрунтових вод і вертикальних зміщень земної поверхні.

ДОДАТКИ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Генеральний директор
Національного заповідника
«Києво-Печерська лавра»



_____ Максим ОСТАПЕНКО

«28» серпня 2026 р.

АКТ

впровадження наукових результатів дисертаційного дослідження
ГУДАКА Василя Михайловича

(аспіранта кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка)

Ми, що нижче підписалися, працівники Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» (далі – Заповідник): учений секретар Заповідника, кандидат історичних наук, доцент Олександр СТАРУХ та завідувач науково-дослідного відділу моніторингу нерухомих пам'яток та території Олександр РОМАНЧЕНКО, склали цей Акт про те, що окремі наукові результати дисертаційного дослідження Василя ГУДАКА на тему **«Моніторинг екзогенних геологічних процесів Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем»**, виконаного в межах підготовки здобувача ступеня доктора філософії на кафедрі геоінформатики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, впроваджені та використовуються у науково-дослідній діяльності Заповідника, пов'язаній із моніторингом стану його території, а саме:

– запропонований у дослідженні геоінформаційний підхід використовується під час організації та проведення моніторингу території Заповідника і забезпечує інтеграцію матеріалів дистанційного зондування Землі та даних польових спостережень у єдиному геоінформаційному середовищі, що сприяє підвищенню повноти й оперативності аналізу даних;

– розроблений програмний інструментарій, реалізований у середовищі QGIS, використовується для обробки геопросторових даних, виконання просторового аналізу та формування інформаційно-аналітичних матеріалів, необхідних для оцінювання стану та динаміки екзогенних геологічних процесів на окремих ділянках території Заповідника;

– розроблені методичні підходи використовуються для аналізу просторового поширення інженерно-геологічних процесів та визначення

ділянок із підвищеним рівнем ризику, що потребують детальнішого обстеження й подальшого моніторингу.

Використання результатів дисертаційного дослідження сприяє підвищенню ефективності моніторингу території Заповідника, забезпечує більш обґрунтоване оцінювання її геотехнічного стану та створює інформаційну основу для планування заходів зі збереження нерухомих об'єктів культурної спадщини. Запропоновані методичні та програмні рішення можуть бути адаптовані для виконання аналогічних робіт на інших територіях зі складними інженерно-геологічними умовами. Впровадження дисертаційних результатів проводиться в межах академічної співпраці.

Учений секретар Олександр СТАРУХ

Завідувач відділу Олександр РОМАНЧЕНКО

Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження Гудака Василя Михайловича

Методичні та програмно-аналітичні розробки, виконані в межах дисертаційного дослідження Гудака Василя Михайловича на кафедрі геоінформатики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, впроваджено у діяльності Департаменту державного геологічного контролю Державної служби геології та надр України.

Використання результатів дослідження спрямоване на підвищення ефективності інформаційно-аналітичного забезпечення шляхом застосування сучасних геоінформаційних технологій і матеріалів дистанційного зондування Землі.

Основу впроваджених розробок становлять методичні підходи до комплексної інтеграції даних дистанційного зондування Землі, геологічної, інженерно-геологічної та геопросторової інформації, а також алгоритми автоматизованого просторового аналізу територій.

Впровадження зазначених розробок дозволило:

- удосконалити геоінформаційне забезпечення заходів державного геологічного контролю та підвищити оперативність виявлення потенційно небезпечних змін геологічного середовища за матеріалами дистанційного зондування Землі;
- автоматизувати аналіз і картографування територій із проявами екзогенних геологічних процесів, а також процес виділення аномальних зон за заданими статистичними порогами;
- скоротити час обробки геопросторових даних і підвищити відтворюваність результатів за рахунок використання єдиних алгоритмів статистичного оцінювання;
- підвищити обґрунтованість оцінювання геологічних ризиків та забезпечити автоматичне обчислення статистичних характеристик виділених об'єктів;
- забезпечити комплексне використання різнорідних просторових даних для підтримки прийняття управлінських рішень.

Практичне застосування впроваджених рішень підтвердило їх ефективність для дистанційного моніторингу, просторового аналізу, тематичного дешифрування растрових даних та інформаційно-аналітичного супроводу державного геологічного контролю у сфері користування надрами.

Заступник директора Департаменту-
начальник відділу контролю за геологічним
вивченням та використанням надр
Департаменту державного геологічного контролю
Державної служби геології та надр України **Микола БУРЛУЦЬКИЙ**
канд. геол. наук

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ГЕОЛОГІЇ ТА НАДР УКРАЇНИ
СЕКТОР ПО РОБОТІ З ПЕРСОНАЛОМ ТА ДЕРЖАВНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ
УКРАЇНА

Підпис Бурлуцького М.
засвідчую: Старш. (Скороход В.)
гол. спец. сектору по роботі з персоналом
та державними підприємствами

Natural Resources Canada
Geological Survey of Canada

Ressources naturelles Canada
Commission géologique du Canada

601 Booth Street
Ottawa, ON K1A 0E9
Canada

September 1, 2026

To: Specialized Academic Council
Taras Shevchenko National University of Kyiv
60 Volodymyrska Street,
City of Kyiv, Ukraine, 01033

Re: Review of Research Results and the QGIS Plugin "Anomalies to Contours"

I have reviewed the research results presented by **Vasyl Hudak**, PhD candidate in the Department of Geoinformatics, Educational and Scientific Institute "Institute of Geology," Taras Shevchenko National University of Kyiv, as part of his dissertation entitled *"Monitoring of Exogenous Geological Processes within the Territory of the Kyiv-Pechersk Lavra Using Geographic Information Systems."*

The research presents an interesting application of geographic information systems to the monitoring and interpretation of exogenous geological processes. In particular, the development of the QGIS software module **"Anomalies to Contours"** represents a potentially useful approach for facilitating the identification and delineation of spatial anomalies and reducing the amount of manual interpretation required.

Although I have not conducted an independent technical evaluation or hands-on testing of the plugin itself, the methodology and research results presented indicate that the developed approach has potential practical relevance for geohazard monitoring, engineering geology, GIS-based analysis, and Earth observation and remote sensing.

The research also demonstrates potential applicability beyond the specific study area of the Kyiv-Pechersk Lavra. The concepts and methodological approach may be relevant to other studies involving spatial anomaly detection and the monitoring of geological processes.

Overall, I consider the research to be interesting and to have practical potential, particularly in demonstrating how GIS-based tools can support geological monitoring and spatial interpretation.

Kind regards,

Mohammad Parsa, PhD
Research Scientist
Geological Survey of Canada
Natural Resources Canada
mohammad.parsasadr@nrcan-rncan.gc.ca

Canada