«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з наукової роботи
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
Оксана ЖИЛІНСЬКА
08 вересня 2026 р.

ВИСНОВОК

Київського національного університету імені Тараса Шевченка про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Гудака Василя Михайловича на тему: «Моніторинг екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 103 Науки про Землю

Витяг

з протоколу № 2 засідання кафедри геоінформатики
ННІ «Інститут геології»
від «08» вересня 2026 року

Присутні: головуючий на засіданні – заступник директора за науково-педагогічної роботи, д. геол. н., доц. Шабатура О.В.; д. техн. наук, проф., Зацерковний В.І.; д. геогр. н., проф., Ляшенко Д.О.; д. геол. н., доц., Меньшов О.І.; д. геогр. н., доц., Гордєєв А.Ю.; канд. фіз.-мат. н., доц. Демидов В.К.; канд. техн. н., доц. Малік Т.В.; канд. геол. н., доц. Цюпа І.В.; канд. геол. н., асист. Стахів І.Р.; д-р. філ. з природн. наук, асист. Плічко Л.В.

Запрошені: д. геол. н., проф., Карпенко О.М., проф. кафедри геології нафти і газу; канд. геол. н., доц. Кравченко Д.В., завідувач кафедри загальної та історичної геології, канд. геол. н., доц. Онищук В.І., завідувач кафедри геофізики, канд. геол. н., асист. Гадяцька К.П., аспіранти та співробітники ННІ «Інститут геології».

Серед присутніх 3 доктори геологічних наук, 2 доктори географічних наук, 1 доктор технічних наук, 6 кандидатів геологічних наук, 1 кандидат технічних наук, 1 кандидат фізико-математичних наук, 1 д-р. філ. з Природничих наук, за профілем поданої дисертації.

Порядок денний:

Обговорення дисертаційної роботи аспіранта кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка Гудака Василя Михайловича (2023-2027 років навчання) на тему: «Моніторинг екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 103 «Науки про Землю».

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики Зацерковний Віталій Іванович.

Дисертація виконувалась на кафедрі геоінформатики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Виступили:

Здобувач Гудак Василь Михайлович представив презентацію за основними положеннями дисертації «Моніторинг екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 103 «Науки про Землю».

Гудак В. М. під час презентації повідомив, що інтенсивне освоєння урбанізованих територій змінює геологічне середовище та умови поверхневого й підземного стоку, сприяючи розвитку підтоплення, суфозійно-просадкових явищ і схилових деформацій. Особливого значення ця проблема набуває на територіях культурної спадщини. Києво-Печерська лавра є складною природно-техногенною системою, стан якої визначається взаємодією геологічної будови, рельєфу, гідрогеологічного режиму, підземних споруд, історичної забудови та інженерної інфраструктури.

Здобувач відзначив, що традиційне дослідження окремих екзогенних геологічних процесів не завжди забезпечує комплексну характеристику стану геологічного середовища. Зсувні, гідрогеологічні, суфозійні та просадкові процеси часто мають спільні передумови розвитку, просторово взаємодіють і можуть посилювати наслідки один одного. У зв’язку із цим у дисертаційному дослідженні обґрунтовано використання поняття «геологічна нестійкість» як інтегральної просторово-часової характеристики стану геологічного середовища, що відображає порушення або тенденцію до порушення його морфологічної, механічної та гідрогеологічної рівноваги під сукупним впливом природних і техногенних чинників.

Гудак В. М. наголосив, що геологічна нестійкість не є тотожною геологічному ризику, оскільки безпосередньо не охоплює експозицію, вразливість об’єктів та очікувані втрати. Запропонована категорія використовується для комплексного геоінформаційного оцінювання стану

геологічного середовища, картографування його просторової неоднорідності та визначення ділянок, що потребують поглибленого інженерно-геологічного й інструментального контролю.

Метою дисертаційної роботи є розроблення комплексного геоінформаційного підходу до моніторингу екзогенних геологічних процесів та оцінювання геологічної нестійкості урбанізованої території на основі інтегрування різнорідних просторових і часових даних, автоматизованого виявлення геопросторових аномалій та нейромережевого моделювання.

Перед здобувачем було поставлено такі завдання:

- узагальнити теоретико-методологічні підходи до класифікації, моніторингу й оцінювання екзогенних геологічних процесів в умовах урбанізованих територій;
- обґрунтувати поняття «геологічної нестійкості» як інтегральної характеристики стану геологічного середовища та визначити концептуальні засади її оцінювання;
- проаналізувати можливості й обмеження польових, інженерно-геологічних, геодезичних, геофізичних, гідрогеологічних, дистанційних і геоінформаційних методів моніторингу;
- охарактеризувати природні й техногенні умови формування геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври;
- систематизувати матеріали геоінформаційної бази «LAVRA-GEO», багаторічних режимних спостережень, інженерно-геологічних і геофізичних досліджень, дистанційного зондування Землі та моніторингу нерухомих пам’яток;
- сформувати уніфікований геопросторовий набір природних, техногенних, гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних ознак;
- розробити програмний інструмент для автоматизованого статистичного виявлення, векторизації та атрибутивного опису геопросторових аномалій;
- виконати апробацію розробленого інструмента на різнотипних растрових даних і застосувати його для аналізу території Києво-Печерської лаври;
- сформувати інтегральну цільову оцінку геологічної нестійкості на основі природних і техногенних факторів;
- адаптувати, налаштувати та навчити просторово орієнтовану нейромережеву модель для оцінювання геологічної нестійкості території, сформувати її картографічне представлення та виконати змістову верифікацію отриманих результатів за незалежними матеріалами спостережень.

Усі поставлені завдання виконано, а отримані результати представлено у виступі та презентації.

За результатами теоретичного аналізу здобувачем сформовано концептуальну структуру оцінювання геологічної нестійкості, що передбачає спільне врахування відносно сталих, динамічних і тригерних показників. Обґрунтовано комплексний методичний підхід, заснований на

багаторівневому поєднанні дистанційних, геодезичних, геофізичних, гідрогеологічних та інженерно-геологічних методів, геоінформаційному інтегруванні отриманих матеріалів і змістовій перевірці дистанційно виявлених змін.

Встановлено, що геологічна нестійкість території Києво-Печерської лаври формується внаслідок взаємодії природних і техногенних чинників. До основних природних передумов належать просадкові лесові ґрунти, слабколітифіковані піщані відклади, делювіально-зсувні комплекси, круті схили, нерівна поверхня водотривких глин і неглибоке залягання ґрунтових вод на окремих ділянках. Техногенний вплив пов'язаний з історичною забудовою, печерними комплексами, заглибленими конструкціями, інженерними мережами та порушеннями водовідведення. За матеріалами багаторічних спостережень систематизовано прояви підтоплення, провалів і просідань земної поверхні, схилових деформацій, обрушень порід у печерних комплексах та пошкоджень історичних споруд.

Інформаційну основу дослідження сформовано за матеріалами геоінформаційної бази «LAVRA-GEO» (розроблену та надану для даного дослідження Інститутом геологічних наук НАН України), режимних гідрогеологічних спостережень, цифрових моделей рельєфу, супутникових зображень Landsat і Sentinel-2. Різнорідні матеріали приведено до єдиної просторової основи.

Сформований геопросторовий набір містить 22 вхідні ознаки: одинадцять природних і шість техногенних факторів, три характеристики рівнів ґрунтових вод, ознаку деформаційного стану та дистанційну ознаку. Часові ряди рівнів ґрунтових вод представлено середнім значенням, коефіцієнтом лінійного тренду й амплітудою коливань, що забезпечило врахування типового стану, спрямованості довготривалих змін і діапазону часової мінливості гідрогеологічного режиму.

Статистичне обґрунтування набору даних виконано за показниками просторової мінливості, рангової кореляції, методом головних компонент і факторним аналізом. Не встановлено ознак із критично низькою мінливістю або повним інформаційним дублюванням. Перші три головні компоненти техногенного блоку пояснили 84,2 % його сукупної дисперсії.

Для автоматизованого аналізу дистанційних матеріалів здобувачем розроблено QGIS-плагін «Anomalies to Contours», який забезпечує статистичне виявлення аномальних значень у числових растрах, формування бінарної маски, векторизацію аномальних зон та розрахунок їх основних атрибутивних характеристик. Алгоритм ґрунтується на оцінюванні нормованого відхилення значень растра від фонового розподілу.

Працездатність плагіна перевірено на інтерферометричних, теплових і багатоспектральних даних Sentinel-1, Landsat 8/9, Sentinel-2 та PlanetScope. Для території Києво-Печерської лаври за різночасовими матеріалами Landsat і Sentinel-2 автоматизовано виділено площинні аномальні зони, окремі з яких просторово узгоджуються з ділянками перезволоження, порушення поверхневого стоку та задокументованих деформацій.

За результатами дистанційного аналізу сформовано ознаку, яку включено до вхідного набору даних після змістової перевірки. Статистично виявлені аномалії розглядаються як індикатори просторово неоднорідних ділянок, а не як безпосереднє підтвердження конкретного геологічного процесу.

Цільову оцінку сформовано на основі природних і техногенних факторів, представлених у трирівневій баловій шкалі. Після нормалізації та інтегрування факторів просторовим одиницям присвоєно класи геологічної нестійкості.

Для просторового моделювання адаптовано, налаштовано та навчено гібридну згортково-трансформерну модель. Згорткові блоки забезпечили врахування локальних і багатомасштабних просторових ознак, а трансформерний модуль врахував ширший просторовий контекст. Нейромережева модель не переобчислює експертно встановлені ваги, а виконує нелінійне просторове уточнення інтегральної оцінки з урахуванням моніторингових характеристик. Для обмеження перенавчання й просторового витоку інформації застосовано блоковий поділ даних, регуляризацію та контроль якості на відокремленій вибірці. За результатами моделювання сформовано карту класів геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври. Також змістову верифікацію отриманих карт виконано за задокументованими проявами екзогенних геологічних процесів та матеріалами супутникової радарної інтерферометрії. Інтерферометричні дані не використовувалися під час навчання моделі, що забезпечило незалежність цього джерела перевірки. Зіставлення засвідчило просторову узгодженість окремих ділянок підвищеної геологічної нестійкості з проявами перезволоження, деформаціями та інструментально зафіксованими зміщеннями.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні геологічної нестійкості як інтегральної просторово-часової характеристики стану геологічного середовища та розробленні комплексного підходу до її оцінювання на основі природних, техногенних, гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних даних. До завдання просторового оцінювання геологічної нестійкості досліджуваної території адаптовано гібридну згортково-трансформерну модель, що забезпечує врахування нелінійних залежностей, локальних ознак і просторового контексту.

Практичне значення результатів полягає у формуванні геоінформаційної основи для території Києво-Печерської лаври за класами геологічної нестійкості, визначення ділянок першочергового контролю та обґрунтування подальших інженерно-геологічних досліджень. Геопросторова база може актуалізуватися за новими моніторинговими даними, що створює передумови для оновлення моделі стану території.

Окремі наукові результати дисертаційного дослідження впроваджені та використовуються у науково-дослідному відділі моніторингу нерухомих пам’яток та території Національного заповідника Києво-Печерська лавра, а також в роботі Департаменту державного геологічного контролю Державної служби геології та надр України. Також отримані результати можуть використовуватися науковими й проєктними установами, органами охорони

культурної спадщини та міськими службами під час організації моніторингу геологічного середовища й планування інженерно-захисних заходів.

Після закінчення презентації Гудаку В.М. присутніми на семінарі фахівцями були поставлені наступні запитання:

Кандидат фізико-математичних наук, доцент Демидов В.К.: У виступі ви сказали, що плагін векторизує полігони з растра, а на вхід моделі дані переводяться з вектора в растр. Тобто плагін векторизує дистанційну ознаку, а в моделі ми знову перетворюємо її з вектора в растр — як це пояснити? Все зрозуміло що ви робите але в плані формулювань потрібно детальніше акцентувати увагу

Гудак В.М.: Тут варто розмежувати два аспекти. Векторизацію полігонів із растра я наводив, щоб підкреслити універсальність плагіна — він може векторизувати будь-які аномалії. А в самому дослідженні на вхід у модель подавалися саме растрові дані, тож жодного зайвого перетворення для дистанційної ознаки з вектора у растр у пайплайні не було.

Кандидат фізико-математичних наук, доцент Демидов В.К.: Ви зазначили, що використовуєте різну кількість вхідних даних. Як ви обґрунтовуєте вибір саме такої кількості факторів, а не більшої чи меншої? Це потребує доведення. Чи проводили ви факторний аналіз?

Гудак В.М.: Так, вибір факторів не був довільним. Кількість і склад вхідних ознак обґрунтовані факторним аналізом: ми оцінювали значущість кожного фактора та їхню взаємну кореляцію, відкидаючи надлишкові й малоінформативні ознаки. Це дозволило залишити оптимальний набір факторів, який забезпечує найкращу якість моделі без надмірності..

Кандидат фізико-математичних наук, доцент Демидов В.К.: Ви всі фактори привели до комірки розміром 5×5 метрів? А якою є роздільна здатність радарного знімка? Як ви перетворили ознаку із супутникового знімка з роздільною здатністю 30 метрів до комірки 5×5 на вашій території — яким чином це зроблено?

Гудак В.М.: Ми застосували субпіксельні технології, які дозволяють підвищити просторову деталізацію знімка нижче за його номінальну роздільну здатність. За рахунок цього інформація з пікселя 30 метрів була перерозподілена й доповнена на дрібнішу сітку 5×5, з урахуванням сусідніх пікселів. Тобто відбулося не просте механічне "розтягування" пікселя, а субпіксельне уточнення значень, яке дало змогу узгодити всі фактори в єдиній комірці 5×5.

Доктор геологічних наук, професор Карпенко О.М.: У мене питання більше геологічного характеру: що саме ви розумієте під поняттям «геологічна нестійкість» саме для розвитку екзогенних процесів?

Гудак В.М.: Це стан, за якого геологічне середовище під впливом природних і техногенних чинників втрачає рівновагу й починає активно змінюватися, що створює загрозу для інженерних споруд і рельєфу. У нашому

дослідженні саме ступінь такої нестійкості й виступає параметром, який ми оцінюємо за сукупністю вхідних факторів.

Доктор геологічних наук, професор Карпенко О.М.: Чи визначали ви вплив окремих факторів не в комплексі, а поодинці — тобто наскільки кожен фактор окремо впливає на досліджувану територію?

Гудак В.М.: Частину окремих екзогенних процесів на території Лаври вже було детально проаналізовано в численних наукових дослідженнях. Їхні характеристики ретельно опрацьовано та внесено до наданої бази даних «LAVRA-GEO», яку ми використали як основу нашого дослідження. Тобто індивідуальний вплив цих процесів уже враховано на рівні вихідних даних, а наша модель спирається на ці опрацьовані характеристики.

Доктор геологічних наук, професор Карпенко О.М.: Підтоплення і просідання — це різні процеси. На мою думку, тут варто детальніше врахувати вплив ґрунтових вод і просідань, адже саме в цьому місці можуть виникати сумніви.

Гудак В.М.: Дякую за зауваження, воно слушне. Підтоплення і просідання ми враховуємо окремими факторами, проте погоджуюся, що вплив ґрунтових вод і механізм просідань варто деталізувати глибше — це один із напрямів подальшого доопрацювання та розширення моделі.

Доктор геологічних наук, старший дослідник Меньшов О.І.: У вашій презентації зовсім не наведено аналіз публікацій. Які об'єкти за кордоном досліджувалися за подібною методикою? І які саме геолого-геофізичні роботи проводилися безпосередньо на території Лаври?

Гудак В.М.: В основному тексті дисертації наведено детальний огляд і закордонних робіт на цю тематику — на слайди я його не виносив, щоб не перевантажувати презентацію. Що стосується лаври, то тут проводилися різноманітні дослідження такими науковцями, як Котлов Ф., Грубрин Ю., Матошко А., Рибін В., Черний Г., Куциба В., Левашов С., Демчишин М., Кріль Т., Черевко І. та інші. У межах проєктів ремонтно-реставраційних та відновлювальних робіт на окремих об'єктах виконувалися інженерно-геологічні та спеціалізовані дослідження низкою проєктних і науково-дослідних установ, зокрема «Київської зсувної партії», ТОВ «ГЕОЛОГ-БУД», КНУБА, ДП НДІБК та ін. Гідрогеологічні умови й режим ґрунтових вод детально вивчали фахівці Інституту геологічних наук НАН України та ННІ «Інститут геології» КНУ ім. Т. Шевченка.

Доктор геологічних наук, старший дослідник Меньшов О.І.: Які саме дослідження на території Лаври проводив Левашов С.? Наскільки я знаю, він обрав такий самий дискусійний метод — частотний метод, пов'язаний з електричними методами.

Гудак В.М.: С. Левашов на території Лаври застосовував геоелектричні методи, пов'язані з електричними полями, для виявлення розущільнених зон, порожнин і зволожених ділянок. Погоджуюся, що ця група методів є певною мірою дискусійною. Саме тому ми не спиралися виключно на ці результати, а використовували дані більш усталених інженерно-геологічних та геофізичних досліджень, які опрацьовано та систематизовано в базі «LAVRA-GEO».

Після відповідей на запитання виступили:

Науковий керівник – керівник – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики Зацерковний Віталій Іванович.

Проф. **Зацерковний В.І.:** Дисертаційна робота Гудака Василя Михайловича є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне завдання моніторингу екзогенних геологічних процесів та оцінювання геологічної нестійкості засобами геоінформаційних технологій. Теоретичні й методичні положення реалізовано на прикладі території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра».

Дослідження спрямовано на розроблення комплексного підходу до інтегрування природних, техногенних, гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних даних, автоматизованого виявлення геопросторових аномалій та моделювання стану геологічного середовища. Поставлені в дисертації завдання виконано, а отримані результати представлено в розділах роботи, висновках і наукових публікаціях.

Вагомим теоретичним результатом є обґрунтування геологічної нестійкості як інтегральної просторово-часової характеристики стану геологічного середовища. Запропонована концепція передбачає спільне врахування відносно сталих природних і техногенних умов, динамічних гідрогеологічних і деформаційних характеристик та чинників активізації екзогенних геологічних процесів.

Дослідження ґрунтується на значному обсязі фактичного матеріалу. Систематизовано дані геоінформаційної бази «LAVRA-GEO», багаторічних гідрогеологічних спостережень, геодезичного моніторингу, геофізичних досліджень, цифрових моделей рельєфу, супутникових матеріалів Landsat і Sentinel-2 та спостережень за станом нерухомих пам’яток. Різнорідні просторові й часові матеріали приведено до єдиної геоінформаційної основи та сформовано набір із вхідних ознак. Статистичний аналіз підтвердив просторову мінливість показників і відсутність їх критичної інформаційної надлишковості.

Вагомим практичним результатом є розроблений за участю здобувача інструмент «Anomalies to Contours», призначений для статистичного виявлення аномальних значень у числових растрах та обчислення їх атрибутивних характеристик. Інструмент апробовано на багатоспектральних, теплових та інтерферометричних даних. За результатами його застосування для території Києво-Печерської лаври сформовано дистанційну ознаку просторово локалізованих змін земної поверхні.

Для моделювання геологічної нестійкості адаптовано й навчено гібридну згортково-трансформерну модель, що забезпечила врахування нелінійних залежностей, локальних просторових ознак і ширшого контексту природних та техногенних умов. За результатами моделювання сформовано карти класів геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври.

Наукова новизна роботи полягає в розвитку теоретичних і методичних засад оцінювання геологічної нестійкості урбанізованих територій, удосконаленні способів інтегрування різночасових моніторингових даних та

адаптації просторово орієнтованої нейромережевої моделі до умов урбанізованої території. Самостійним результатом є також геоінформаційний інструмент автоматизованого виявлення й векторизації аномальних зон.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості районування території за класами геологічної нестійкості, визначення ділянок першочергового контролю та актуалізації просторової оцінки за новими моніторинговими даними.

У процесі виконання роботи Гудак Василь Михайлович продемонстрував належний рівень теоретичної підготовки, здатність самостійно формулювати й розв'язувати наукові завдання, опрацьовувати значні масиви просторових і часових даних та критично інтерпретувати отримані результати. Здобувач володіє сучасними методами геоінформаційного аналізу, дистанційного зондування Землі, статистичного опрацювання даних, програмування та нейромережевого моделювання.

Дисертаційна робота Гудака Василя Михайловича характеризується науковою новизною, теоретичним і практичним значенням та відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Хочу також зазначити, що по даній тематиці Гудак Василь був нагороджений премією Національної академії наук України для молодих вчених та студентів вищих навчальних закладів, а так стипендіат стипендії імені М.Г. Грушевського для аспірантів. Вважаю, що Гудак Василь Михайлович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 103 «Науки про Землю».

Рецензенти дисертаційної роботи, які наголосили на позитивних аспектах дослідження та висловили свої побажання і зауваження:

Доктор географічних наук, професор Ляшенко Д.О.: Рецензована дисертація є самостійною, завершеною та фундаментальною працею, що вирішує актуальне науково-практичне завдання — обгрунтування геоінформаційного моніторингу екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври. Дослідження має вагоме значення для прогнозування стану геологічного середовища та захисту пам'яток культурної спадщини у складних інженерно-геологічних умовах. Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації належним чином обґрунтовані результатами проведених досліджень. Зокрема, автором впорядковано термінологічний апарат та запропоновано авторське поняття геологічної нестійкості як «…інтегральної просторово-часової характеристики стану геологічного середовища, що відображає схильність території до розвитку екзогенних геологічних процесів під сукупним впливом природних і техногенних чинників», опрацьовано методологію створення уніфікованої інформаційної основи вивчення геологічної нестійкості на базі даних наземних та дистанційних спостережень та адаптовано гібридну модель U-Net–Transformer для просторової класифікації рівнів геологічної нестійкості. Достовірність отриманих результатів підтверджено статистичним оцінюванням і

зіставленням результатів із задокументованими проявами процесів та незалежними даними PS-InSAR.

Вважаю, що дисертаційна робота розширює науково-методичний і програмний інструментарій моніторингу геологічного середовища та має чітке методологічне спрямування. Запропонований автором підхід може бути використаний для моніторингу прояву небезпечних геологічних процесів на інших територіях, визначення ділянок першочергового інструментального контролю та обґрунтування необхідності детальних інженерно-геологічних досліджень. За актуальністю теми, науковою новизною, теоретичним і практичним значенням отриманих результатів, а також за повнотою їх висвітлення в наукових публікаціях, дисертація повною мірою відповідає вимогам, що висуваються до робіт такого рівня, і рекомендується до захисту на здобуття наукового ступеня.

Кандидат геологічних наук, доцент Цюпа І.В.: Достовірність результатів забезпечується комплексним використанням даних, приведених до єдиної геопросторової основи. Коректність моделювання та змістову обґрунтованість карт підтверджено за даними PS-InSAR та зіставленням із задокументованими деформаціями, зафіксованими на досліджуваній території.

Практична цінність роботи полягає в можливості періодичного оновлення оцінки геологічної нестійкості території дослідження. Вважаю, що здобувач успішно виконав поставлені завдання й отримав науково обґрунтовані та практично значущі результати, подальший розвиток яких доцільно пов’язати з накопиченням моніторингових даних і прогнозуванням гідрогеологічних та деформаційних змін.

В **обговоренні** дисертаційного дослідження взяли участь**:**

Кандидат геологічних наук, доцент Кравченко Д.В.: Хотів би прокоментувати щодо виведеного параметра геологічної нестійкості. Важливо розуміти його природу — чи є він динамічним, чи статичним. На мою думку, цей параметр варто розглядати як динамічний, адже він змінюється в часі під впливом природних і техногенних чинників. Було б доречно додатково окреслити закономірності його зміни та часові інтервали, у яких ці зміни проявляються — від сезонних коливань до довготривалих процесів, що розвиваються роками й десятиліттями. Загалом робота виконана на високому рівні й, безумовно, має всі шанси на успішний захист.

Доктор географічних наук, професор Ляшенко Д.О.: Дисертаційне дослідження характеризується науковою новизною та має вагому практичну цінність. Здобувач у повному обсязі виконав поставлені завдання, вільно володіє матеріалом і надає обґрунтовані, змістовні відповіді на поставлені запитання. Робота вирізняється комплексністю підходу й актуальністю обраної тематики, присвяченої моніторингу небезпечних екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври. Усе це засвідчує високий рівень фахової підготовки автора та його спроможність до самостійної наукової роботи.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Гудака Василя Михайловича «Моніторинг екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 – Науки про Землю

1. Обґрунтування вибору теми дослідження. Актуальність дисертаційної роботи зумовлена необхідністю забезпечення систематичного моніторингу геологічного середовища урбанізованих територій, у межах яких природні передумови розвитку екзогенних геологічних процесів поєднуються з інтенсивним техногенним навантаженням, складною інженерною інфраструктурою та наявністю підземних споруд.

Територія Києво-Печерської лаври характеризується розчленованим рельєфом, поширенням лесових і піщаних ґрунтів, наявністю печерних комплексів, схилів, ярів, історичної забудови, водонесучих комунікацій і дренажних систем. Зміни гідрогеологічного режиму, локальне перезволоження, порушення поверхневого та підземного стоку можуть сприяти розвитку суфозійних, просадкових, ерозійних і схилових деформацій.

За тривалий період вивчення території накопичено значний обсяг даних численних досліджень, які проводилися на ній різними науковими та проєктними установами. Наявні матеріали моніторингу представлені різними за формою подання, просторовим охопленням і часовою періодичністю інженерно-геологічними, гідрогеологічними, геодезичними, геофізичними та дистанційними даними. Це ускладнює їх комплексне використання й визначає потребу у формуванні єдиної геоінформаційної основи. Традиційні методи забезпечують інтегральне узагальнення природних і техногенних факторів, однак обмежено враховують нелінійні просторові залежності, взаємодію суміжних ділянок і динамічні характеристики геологічного середовища. Тому актуальним є розроблення підходу, що поєднує геоінформаційні технології, дистанційний моніторинг та нейромережеве моделювання.

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.

2. Зв’язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі геоінформатики Навчально-наукового інституту «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка в межах напрямів наукових досліджень кафедри. Здобувач брав 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». Дослідження також пов’язане з міжнародним проєктом

Horizon Europe Marie Skłodowska-Curie Actions Staff Exchanges «Localization in Geophysics, Geohazards and Geoengineering», LOC3G, № 101129729. Окремі результати дослідження пов'язані з виконанням наукової теми ІІІ-5-23 «Інженерно-геологічні засади міського розвитку та стратегічного освоєння підземного простору», державний реєстраційний номер 0123U100129.

3. Мета і завдання дисертаційного дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення науково-методичних засад і програмного інструментарію геоінформаційного моніторингу екзогенних геологічних процесів на основі інтегрування різнорідних просторових і часових даних, автоматизованого виявлення геопросторових аномалій та нейромережевого моделювання геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати сучасні методи геоінформаційного моніторингу екзогенних геологічних процесів;
- обґрунтувати систему факторів, індикаторів і критеріїв оцінювання геологічної нестійкості;
- розробити QGIS-інструментарій автоматизованого виявлення та векторизації геопросторових аномалій;
- сформувати уніфіковану геопросторову інформаційну основу шляхом інтегрування різнорідних моніторингових даних;
- обґрунтувати вибір, адаптувати й навчити гібридну модель U-Net–Transformer для класифікації рівнів геологічної нестійкості;
- побудувати та верифікувати карти просторового розподілу рівнів геологічної нестійкості;
- оцінити результативність і межі застосування розробленого підходу в системі геоінформаційного моніторингу.

4. Об'єктом дослідження є геологічне середовище території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» в умовах розвитку екзогенних геологічних процесів та природно-техногенного впливу.

5. Предметом дослідження є науково-методичні засади геоінформаційного моніторингу та оцінювання геологічної нестійкості, що охоплюють інтегрування природних, техногенних і моніторингових даних, автоматизоване виявлення геопросторових аномалій, формування інтегральної цільової оцінки та нейромережеве моделювання просторового розподілу рівнів геологічної нестійкості.

6. Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань використано комплекс взаємодоповнювальних методів.

Дані, отримані на основі інженерно-геологічного аналізу, гідрогеологічних спостережень, геодезичних та геофізичних методів застосовано для характеристики геологічної будови, гідрогеологічного режиму, деформаційного стану та просторової неоднорідності геологічного середовища.

Методи дистанційного зондування Землі використано для розрахунку та аналізу спектральних індексів, виявлення зон зміненого зволоження,

спектральних ознак засолення, ерозійних змін та інших геопросторових змін. Супутникову радарну інтерферометрію застосовано для незалежної просторової верифікації результатів моделювання.

Методи геоінформаційного аналізу забезпечили приведення різнорідних векторних, растрових і точкових матеріалів до єдиної системи координат, регулярної сітки досліджуваної території та спільної структури атрибутивних даних.

Методи математичної статистики використано для аналізу мінливості ознак, виявлення можливого інформаційного дублювання та формування інтегральної цільової оцінки.

Для просторового уточнення інтегральної оцінки адаптовано гібридну нейромережеву архітектуру U-Net–Transformer. Навчання здійснено із застосуванням просторового блокового поділу даних, оптимізатора AdamW, зваженої крос-ентропійної функції втрат і механізму ранньої зупинки.

Програмну реалізацію виконано із застосуванням QGIS, Python, PyTorch і Google Earth Engine

7. Наукова новизна дослідження. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розвитку методичних засад геоінформаційного моніторингу екзогенних геологічних процесів на урбанізованих територіях шляхом інтегрування факторних, режимних, деформаційних і дистанційних даних у єдиній просторово-часовій моделі.

Уперше обґрунтовано поняття «геологічна нестійкість» як інтегральну просторово-часову характеристику стану геологічного середовища, що відображає порушення або тенденцію до порушення його морфологічної, механічної та гідрогеологічної рівноваги під сукупним впливом природних і техногенних чинників. Для території Києво-Печерської лаври сформовано уніфіковану геопросторову інформаційну основу, яка поєднує природні та техногенні фактори із характеристиками мінливості рівнів ґрунтових вод, деформаційного стану та дистанційно виявлених геопросторових аномалій. Розроблено QGIS-плагін «Anomalies to Contours» для автоматизованого статистичного виявлення та атрибутивного опису аномальних зон у числових геоприв’язаних растрах.

Адаптовано гібридну архітектуру U-Net–Transformer до трикласового просторового оцінювання геологічної нестійкості за сукупністю природних, техногенних і моніторингових ознак. Реалізовано підхід до різночасового оцінювання стану геологічного середовища шляхом актуалізації гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних ознак та повторного застосування навченої моделі.

Удосконалено методичний підхід до комплексного моніторингу екзогенних геологічних процесів шляхом просторового інтегрування наземних, режимних, геофізичних і дистанційних даних.

8. Теоретичне значення. Теоретичне значення роботи полягає в розвитку методичних засад оцінювання стану геологічного середовища урбанізованих територій. Запропоноване поняття геологічної нестійкості дає змогу відокремити інтегральний стан середовища від окремих екзогенних

процесів, геологічної небезпеки, просторової схильності та ризику, який потребує додаткового врахування вразливості й можливих втрат.

Теоретично обґрунтовано поєднання відносно сталих природних і техногенних передумов із динамічними гідрогеологічними, деформаційними та дистанційними характеристиками. Це забезпечує перехід від статичного факторного районування до різночасового оцінювання інтегрального стану території та створює основу для адаптації підходу до інших урбанізованих територій і об'єктів культурної спадщини.

9. Практичне значення. Практичне значення роботи полягає у створенні геоінформаційного та програмного забезпечення для комплексного моніторингу території Києво-Печерської лаври. Сформована інформаційна основа забезпечує інтегрування різнорідних даних, побудову карт геологічної нестійкості, визначення ділянок першочергового контролю та планування деталізованих інженерно-геологічних, гідрогеологічних, геодезичних і геофізичних досліджень. Розроблений QGIS-плагін «Anomalies to Contours» автоматизує виявлення, векторизацію та атрибутивний опис геопросторових аномалій.

Адаптована модель U-Net–Transformer забезпечує просторово узгоджену класифікацію території за трьома рівнями геологічної нестійкості. Оновлення даних про рівні ґрунтових вод, деформаційний стан і дистанційні аномалії дає змогу формувати та зіставляти карти за різні періоди, забезпечуючи перехід від одноразового картографування до систематичного геоінформаційного моніторингу.

10. Особистий внесок здобувача. Особистий внесок автора полягає в обґрунтуванні концепції та методичної структури дослідження; інтегруванні й просторовому узгодженні різнорідних моніторингових даних; формуванні системи вхідних ознак; розробленні та апробації інструмента для програмного забезпечення QGIS; адаптації й навчанні моделі U-Net–Transformer; оцінюванні якості, картографуванні, інтерпретації та незалежній верифікації результатів; формулюванні наукових висновків і практичних рекомендацій.

У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать відповідні аналітичні, геоінформаційні, програмні та модельні дослідження. Використані положення й результати інших авторів супроводжуються належними посиланнями.

11. Апробація результатів дослідження. Результати наукових досліджень, викладених у дисертації, доповідались на наукових та науково-практичних конференціях, а саме: *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects* (м. Київ 2020, 2021); *International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (м. Київ 2021, 2025, 2026); *EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities* (м. Київ, 2025); *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace»* (м. Львів, 2025); *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів "Сучасні виклики геологічної освіти і науки* (м. Львів, 2024); *Всеукраїнська молодіжна наукова конференція-школа «Сучасні проблеми наук про Землю*» (м. Київ, 2025, 2026); *Міжнародна конференція Математичне*

та імітаційне моделювання систем. МОДС (м. Чернігів, 2025); *Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Молодь: наука та інновації»* (м. Дніпро 2025); *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Об'єднані наукою: перспективи міждисциплінарних досліджень»* (м. Київ, 2025).

12. Публікації. За результатами дослідження опубліковано 6 статтей у виданнях, з яких 4 проіндексованих в базах даних Web of Science Core Collection та Scopus, та 14 тез доповідей на наукових конференціях.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у періодичних наукових виданнях:

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. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.12 (*Стаття включена до міжнародної наукометричної бази* ***Scopus****).*

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*. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13. (*Стаття включена до міжнародної наукометричної бази* ***Scopus****).*

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 https://doi.org/10.17721/1728-2713.110.13 (*Стаття включена до міжнародної наукометричної бази* ***Scopus****).*

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). https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2025.6.13

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)* https://doi.org/10.17721/1728-2713.112.14 (*Стаття включена до міжнародної наукометричної бази* ***Scopus****).*

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). https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2026.7.14

Тези доповідей на наукових конференціях:

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****).*

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****).*

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****).*

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.*

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.*

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****).*

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****).*

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**).

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**).

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

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).

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.

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***).

13. Структура та обсяг дисертації.

Структура та обсяг дисертаційної роботи обумовлена метою та особливостями дослідження та складається із анотації, державною та англійською мовами, вступу, 5 розділів, висновків, додатків та списку із 204 використаних джерел. Обсяг – 231 сторінки (формату А4), у тому числі 171 сторінок основного тексту, містить 14 таблиць, 60 рисунків.

14. Характеристика особистості здобувача.

Гудак Василь Михайлович народився 21 вересня 1998 року. У 2023 р. отримав повну вищу освіту (магістратура) в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за спеціальністю «Геоінформаційні системи і технології». З 2023 року є аспірантом кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

На даний час працює на посаді провідного інженера у компанії АТ «Укрнафта».

Володіє українською та англійською мовами.

15. Оцінка мови та стилю дисертації. Дисертація виконана фаховою українською мовою, стиль викладення матеріалу відповідає прийнятому в науковій літературі.

16. Рецензенти рекомендують: відповідно до **п.15, 16** «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р., ***пропонується такий склад разової ради:***

Голова ради:

Карпенко Олексій Миколайович, доктор геологічних наук, професор, професор кафедри геології нафти і газу ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Рецензенти:

Іванік Олена Михайлівна, доктор геологічних наук, професор, професор кафедри загальної та історичної геології ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Ляшенко Дмитро Олексійович, доктор географічних наук, професор, професор кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Офіційні опоненти:

Шехунова Стелла Борисівна, доктор геологічних наук, професор, академік Національної академії наук України, директор Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Седлерова Ольга Володимирівна, кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник, Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України».

У результаті попередньої експертизи дисертації **Гудака Василя Михайловича** і повноти публікації основних результатів дослідження

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Гудака В.М. на тему: «Моніторинг екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем».

2. Констатувати, що за актуальністю, степенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Гудака Василя Михайловича відповідає спеціальності 103 Науки про Землю та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. №261, **пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

3. Рекомендувати дисертацію Гудака Василя Михайловича на тему: «Моніторинг екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем» до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 103 Науки про Землю.

4. Рекомендувати вченій раді ННІ «Інститут геології» затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Карпенко Олексій Миколайович, доктор геологічних наук, професор, професор кафедри геології нафти і газу ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Рецензенти:

Іванік Олена Михайлівна, доктор геологічних наук, професор, професор кафедри загальної та історичної геології ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Ляшенко Дмитро Олексійович, доктор географічних наук, професор, професор кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Офіційні опоненти:

Шехунова Стелла Борисівна, доктор геологічних наук, професор, академік Національної академії наук України, директор Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Седлерова Ольга Володимирівна, кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник, Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України».

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації Гудака Василя Михайловича:

«За» – 10
«Проти» – немає
«Утримались» – немає

Презентація Гудака Василя Михайловича на 19 стор. додається.

Директор ННІ «Інститут геології»
доктор геологічних наук, професор **Сергій ВИЖВА**

Головуючий на засіданні
доктор геологічних наук, доцент,
заступник директора
з науково-педагогічної роботи
ННІ «Інститут геології» **Олександр ШАБАТУРА**

Секретар засідання **Ірина СТАХІВ**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Навчально-науковий інститут «Інститут геології»
Кафедра геоінформатики

Моніторинг екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври засобами геоінформаційних систем

Аспірант: Гудак В. М.
Науковий керівник: д.т.н., проф.,
завідувач кафедри геоінформатики Зацерковний В. І.

Київ, 2026

Мета та завдання дослідження

Мета роботи полягає в розробленні науково-методичних засад і програмного інструментарію геоінформаційного моніторингу екзогенних геологічних процесів на основі інтегрування різнорідних просторових і часових даних, автоматизованого виявлення геопросторових аномалій та нейромережевого моделювання геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври.

Завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасні методи геоінформаційного моніторингу екзогенних геологічних процесів.
- Обґрунтувати систему факторів, індикаторів і критеріїв оцінювання геологічної нестійкості.
- Розробити QGIS-інструментарій автоматизованого виявлення та векторизації геопросторових аномалій.
- Сформувати уніфіковану геопросторову інформаційну основу шляхом інтегрування різнорідних моніторингових даних.
- Обґрунтувати вибір, адаптувати й навчити гібридну модель U-Net–Transformer для класифікації рівнів геологічної нестійкості.
- Побудувати та верифікувати карти просторового розподілу рівнів геологічної нестійкості.
- Оцінити результативність і межі застосування розробленого підходу в системі геоінформаційного моніторингу.

Обґрунтування поняття геологічна нестійкість

Геологічна нестійкість є інтегральною просторово-часовою характеристикою стану геологічного середовища, що відображає порушення або тенденцію до порушення його рівноваги під сукупним впливом природних і техногенних чинників.

Нормативне підґрунтя:

1. Моніторинг геологічного та навколишнього природного середовища:

- Закон України «Про державну геологічну службу України»;
- постанова Кабінету Міністрів України № 685 від 13.06.2024;
- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».

2. Охорона надр, культурної спадщини та інженерний захист:

- Кодекс України про надра;
- Закон України «Про охорону культурної спадщини»;
- правила експлуатації споруд інженерного захисту від зсувів та обвалів.

3. Геопросторові дані та інженерні вишукування:

- Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних»;
- технічні вимоги до специфікацій геопросторових даних НІГД;
- ДБН А.2.1-1:2014.

Термін	Обмеження застосування в дослідженні
Екзогенні геологічні процеси	Характеризують окремі процеси та механізми їх розвитку, але не інтегральний стан геологічного середовища
Небезпечні геологічні процеси	Акцентують увагу на небезпечних проявах і наслідках, але недостатньо відображають ранні стадії дестабілізації
Рухи мас гірських порід	Охоплюють переважно схилові процеси та не враховують підтоплення, суфозію і просідання
Landslide susceptibility	Стосується схильності до зсувів і характеризує переважно передумови, а не поточний стан середовища
Risk	Передбачає оцінювання небезпеки, експозиції, вразливості й очікуваних втрат, які в роботі безпосередньо не визначаються
Geohazard	Охоплює ширше коло геологічних явищ і не завжди характеризує інтегральну просторово-часову зміну стану середовища

Запропонований термін характеризує не окремий процес або його наслідки, а інтегральний стан геологічного середовища.

Методи дослідження

Вивчення геологічного середовища

- інженерно-геологічний аналіз;
- гідрогеологічні спостереження;
- геодезичні та геофізичні методи.

Дистанційний моніторинг

- дистанційне зондування Землі;
- цифрове опрацювання супутникових даних;
- супутникова радарна інтерферометрія.

Просторове моделювання

- машинне та глибоке навчання;
- гібридна архітектура U-Net–Transformer;
- оцінювання якості й незалежна верифікація

Геоінформаційне інтегрування даних

- просторове узгодження даних;
- растрово-векторне опрацювання;
- геопросторовий аналіз і картографування.

Статистичне оцінювання

- математична статистика;
- багатовимірний аналіз даних;
- багатокритеріальне оцінювання.

Програмне середовище: QGIS, Python, Google Earth Engine



Карта-схема Києво-Печерської лаври
(*Офіційний сайт Національного заповідника «Києво-Печерська лавра, 2026*)





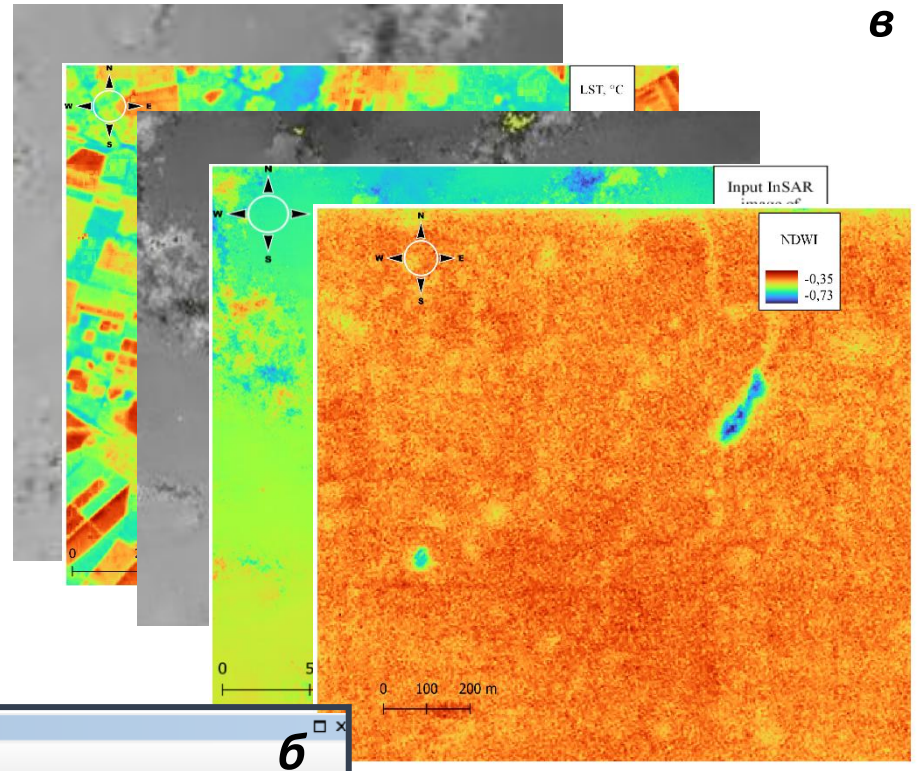
Екзогенні процеси на території дослідження
(*фото Черевко І.А, 2022-2023*)

Джерела вихідних даних

а

дата	2		3		4		5		6		7		8	
а.о.оголовка	191,73		188,31		188,43		189,81		189,58		187,27		172,57	
а.о.земли	191,35		187,41		188,20		189,30		188,52		186,40		172,22	
21.03.1996	10,65	181,08	14,26	174,05	17,28	171,15	14,07	175,74	16,95	172,63	17,80	169,47	3,30	169,27
02.04.1996	10,71	181,02	14,23	174,08	17,31	171,12	14,09	175,72	16,95	172,63	17,79	169,48	3,30	169,27
25.04.1996	10,62	181,11	14,16	174,15	17,30	171,13	14,06	175,75	16,95	172,63	17,77	169,50	3,31	169,26
07.05.1996	10,52	181,21	14,09	174,22	17,30	171,13	14,03	175,78	16,95	172,63	17,75	169,52	3,32	169,25
16.05.1996	10,47	181,26	14,11	174,20	17,29	171,14	14,01	175,80	16,95	172,63	17,70	169,57	3,32	169,25
21.05.1996	10,48	181,25	14,18	174,13	17,33	171,10	14,02	175,79	16,96	172,62	17,74	169,53	3,33	169,24
30.05.1996	10,54	181,19	14,24	174,07	17,36	171,07	14,04	175,77	16,97	172,61	17,77	169,50	3,34	169,23
12.06.1996	10,61	181,12	14,31	174,00	17,38	171,05	14,06	175,75	16,99	172,59	17,81	169,46	3,34	169,23
25.06.1996	10,68	181,05	14,37	173,94	17,40	171,03	14,08	175,73	17,00	172,58	17,84	169,43	3,35	169,22
09.07.1996	10,70	181,03	14,46	173,85	17,41	171,02	14,09	175,72	17,02	172,56	17,81	169,46	3,36	169,21
18.07.1996	10,75	180,98	14,55	173,76	17,45	170,98	14,13	175,68	17,04	172,54	17,79	169,48	3,37	169,20
01.08.1996	10,77	180,96	14,62	173,69	17,48	170,95	14,12	175,69	17,04	172,54	17,76	169,51	3,38	169,19
07.08.1996	10,80	180,93	14,68	173,63	17,47	170,96	14,12	175,69	17,05	172,53	17,74	169,53	3,38	169,19
21.08.1996	10,80	180,93	14,75	173,56	17,48	170,95	13,84	175,97	16,80	172,78	17,77	169,50	3,40	169,17
03.09.1996	10,80	180,93	14,80	173,51	17,49	170,94	13,66	176,15	16,59	172,99	17,82	169,45	3,41	169,16
12.09.1996	10,82	180,91	14,81	173,50	17,50	170,93	13,56	176,25	16,45	173,13	17,83	169,44	3,42	169,15
03.10.1996	10,62	181,11	14,80	173,51	17,48	170,95	13,40	176,41	16,26	173,32	17,82	169,45	3,43	169,14
10.10.1996	10,68	181,05	14,81	173,50	17,46	170,97	13,46	176,35	16,33	173,25	17,81	169,46	3,41	169,16
16.10.1996	10,66	181,07	14,84	173,47	17,49	170,94	13,50	176,31	16,40	173,18	17,82	169,45	3,42	169,15
23.10.1996	10,64	181,09	14,88	173,43	17,48	170,95	13,55	176,26	16,46	173,12	17,82	169,45	3,42	169,15
31.10.1996	10,63	181,10	14,90	173,41	17,55	170,88	13,60	176,21	16,50	173,08	17,82	169,45	3,43	169,14
05.11.1996	10,64	181,09	14,91	173,40	17,65	170,78	13,66	176,15	16,54	173,04	17,83	169,44	3,44	169,13
27.11.1996	10,61	181,12	14,94	173,37	17,82	170,61	13,77	176,04	16,66	172,92	17,83	169,44	3,45	169,12
04.12.1996	10,64	181,09	14,94	173,37	17,82	170,61	13,81	176,00	16,70	172,88	17,83	169,44	3,46	169,11
11.12.1996	10,62	181,11	14,93	173,38	17,82	170,61	13,82	175,99	16,74	172,84	17,85	169,42	3,44	169,13
27.12.1996	10,63	181,10	14,93	173,38	17,82	170,61	13,79	176,02	16,80	172,78	17,84	169,43	3,45	169,12
09.01.1997	10,64	181,09	14,94	173,37	17,81	170,62	13,81	176,00	16,81	172,77	17,85	169,42	3,46	169,11
16.01.1997	10,64	181,09	14,95	173,36	17,80	170,63	13,80	176,01	16,80	172,78	17,83	169,44	3,44	169,13

в



б

Table

Risk

FID	Shape *	Id	v 1	e 1	Area 1	v 2	e 2	Aera 2	v 3	e 3	Area 3	v 4	e 4	Area 4	v 5	e 5	Area 5	v	e	f v	f e	B 1	B 2	B 3	Haz	Risk
0	Polygon ZM	0	0	0	0	0,1	0,7	225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,7	0,1	0,7	1	3	1	0,166667	0,011667
1	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0,166667	0
2	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	1	0,25	0
3	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	1	0,416667	0
4	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	1	0,25	0
5	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	1	0,25	0
6	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	2	0,333333	0
7	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0,25	0
8	Polygon ZM	0	0	0	0	0,1	0,7	225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,7	0,1	0,7	2	3	1	0,25	0,0175
9	Polygon ZM	0	0	0	0	0,1	0,7	225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,7	0,1	0,7	1	3	1	0,166667	0,011667
10	Polygon ZM	0	0,1	0,5	1,15923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000515	0,002576	0,000515	0,002576	2	3	1	0,25	0
11	Polygon ZM	0	0,1	0,5	1,15923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000515	0,002576	0,000515	0,002576	1	3	1	0,166667	0
12	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0,166667	0
13	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0,166667	0
14	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	1	0,25	0
15	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	1	0,416667	0
16	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	2	0,5	0
17	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	5,012522	0	0	0	0,002228	0,002228	0,002228	0,002228	1	4	2	0,333333	0,000002
18	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	5,012522	0	0	0	0,002228	0,002228	0,002228	0,002228	1	2	2	0,166667	0,000001
19	Polygon ZM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	27,161737	0,2	0,7	0,044392	0,012111	0,01221	0,012111	0,01221	1	2	2	0,166667	0,000025

1 (0 out of 5669 Selected)

Risk

Вихідну інформаційну основу сформовано за матеріалами багаторічних режимних спостережень (а), бази «LAVRA-GEO»(б), та різночасових супутникових даних (в)

Структура та просторове узгодження вхідних даних

Природні та інженерно-геологічні фактори

Геоморфологічні:

F1 Тип рельєфу
F2 Морфометрія
F11 Негативні форми рельєфу

Геолого-літологічні:
F3 Неотектоніка
F5 Літологія
F6 Міцність ґрунтів
F7 Потужність техногенних відкладів

Гідрогеологічні та екзогенні:
F4 Глибина ґрунтових вод
F8 Зсувні процеси
F9 Підтоплення
F10 Просідання

Техногенні фактори

Забудова та підземні споруди:
F12 Навантаження забудови
F13 Підземні споруди

Інженерна інфраструктура:
F14 Інженерні мережі
F15 Щільність мереж
F16 Глибокі дренажні системи
F17 Мілкі дренажні системи

Гідрогеологічна динаміка (режимні спостереження рівнів ґрунтових вод)
F18 середнє значення
F19 коефіцієнт тренду
F20 амплітуда коливань

Сучасний стан території:
F21 Деформації, задокументований деформаційний стан
F22 Аномалії, дистанційно виявлена геопросторова аномалія

Векторні, растрові й точкові дані приведено до регулярної сітки з розміром комірки 5 × 5 м. Для кожної елементарної просторової одиниці сформовано узгоджений набір вхідних ознак

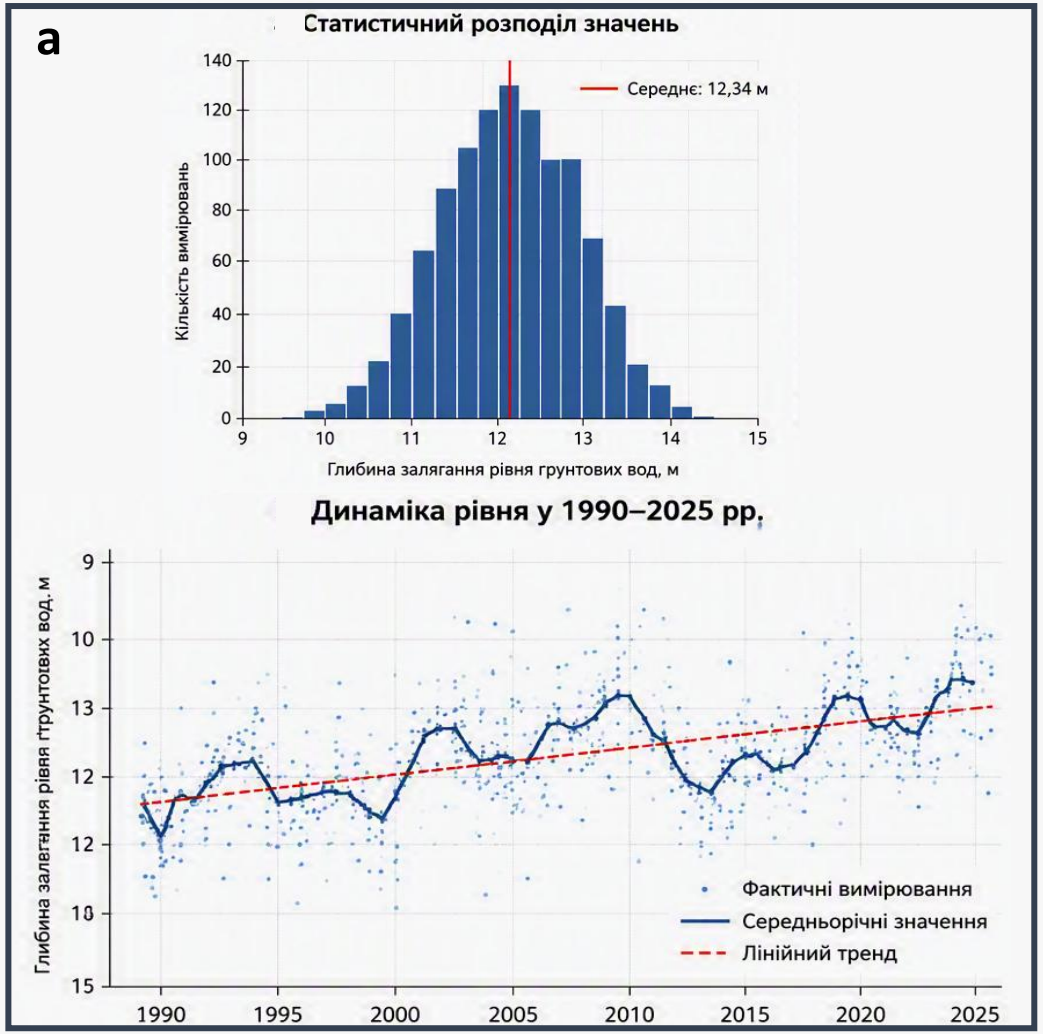


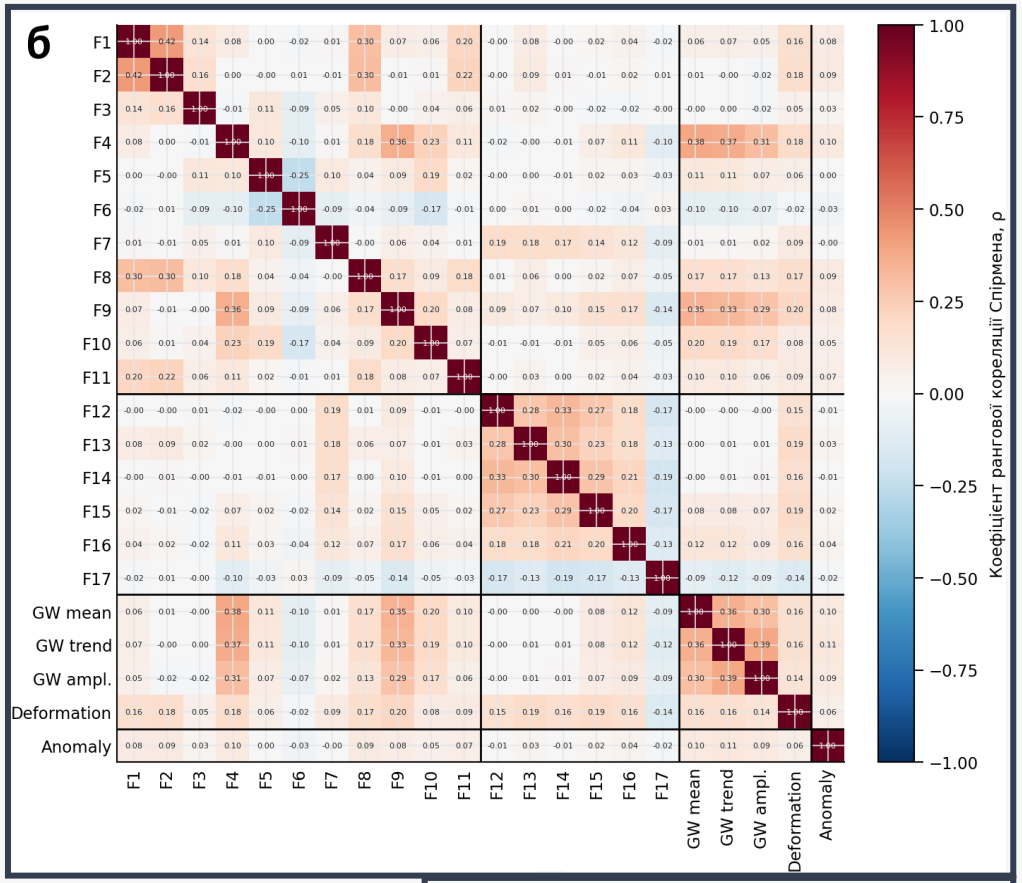
Векторний шар →
Растрове представлення

Статистичне обґрунтування складу вхідних ознак

Мета статистичного аналізу ознак:

- оцінювання просторової та часової мінливості;
- виявлення взаємозв’язків і можливого дублювання;
- перевірка внутрішньої структури техногенного блоку;
- обґрунтування складу вхідних даних моделі.





а - розподіл глибини залягання рівня ґрунтових вод та їх багаторічна динаміка;

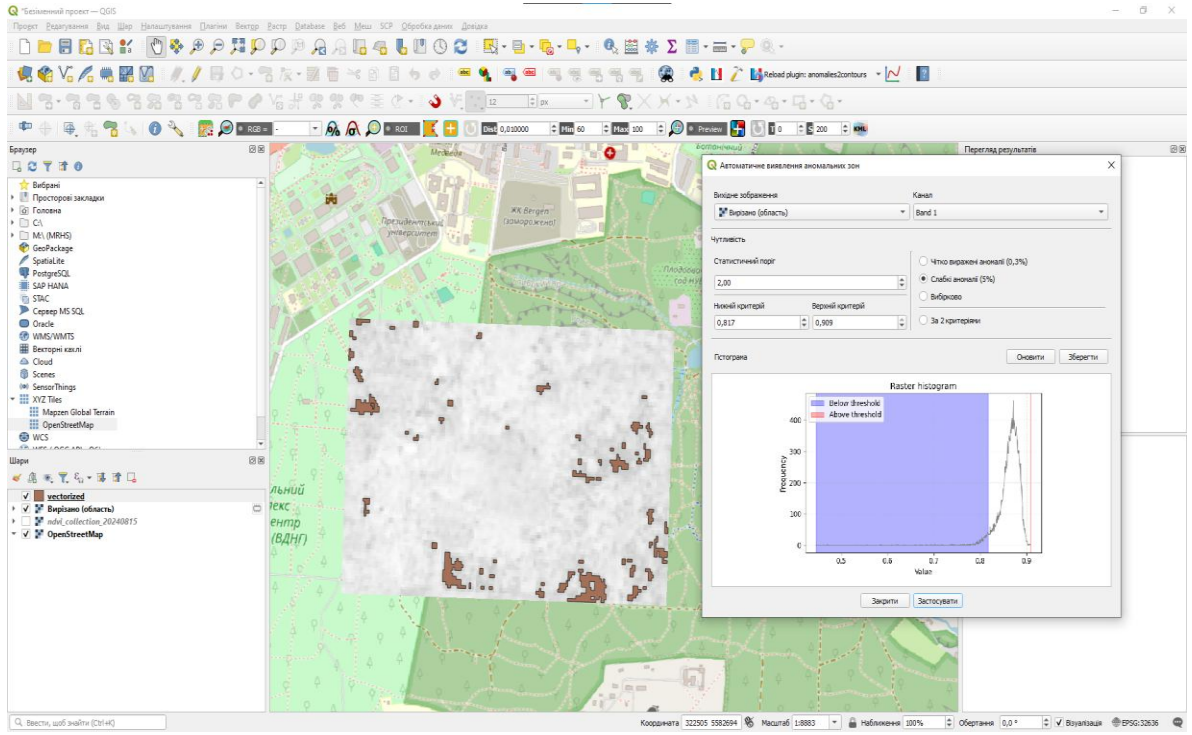
б - матриця коефіцієнтів рангової кореляції Спірмена між природними, техногенними, динамічними та дистанційними ознаками;

в - пояснена й накопичена дисперсія головних компонент техногенного блоку F12–F17



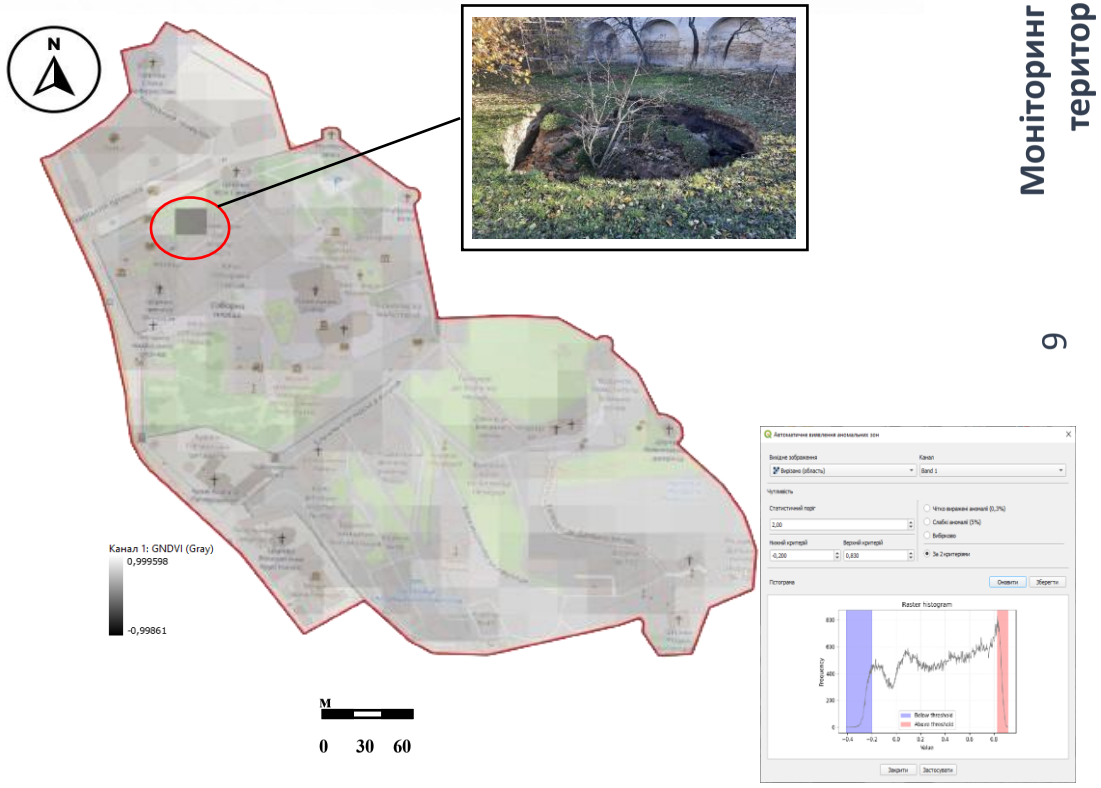
Розроблення QGIS-плагіна «Anomalies to Contours»

Вхідний растр
↓
Статистичний аналіз і визначення порогів
↓
Бінарна маска аномалій
↓
Полігонізація
↓
Векторний шар аномальних зон

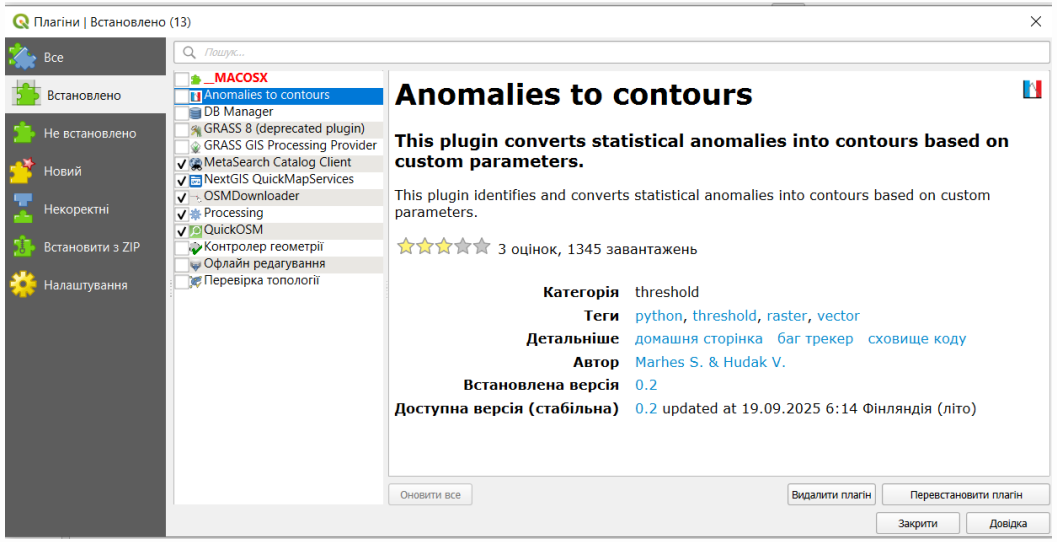




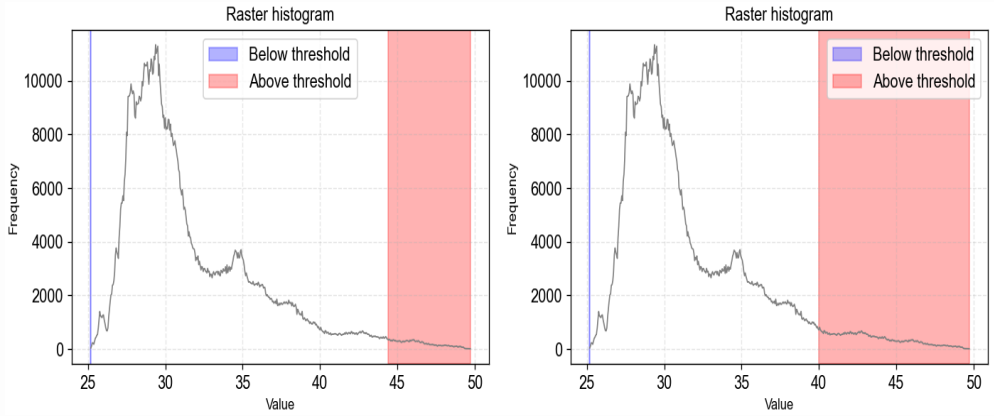
Задокументований провал у межах виявленої аномальної зони



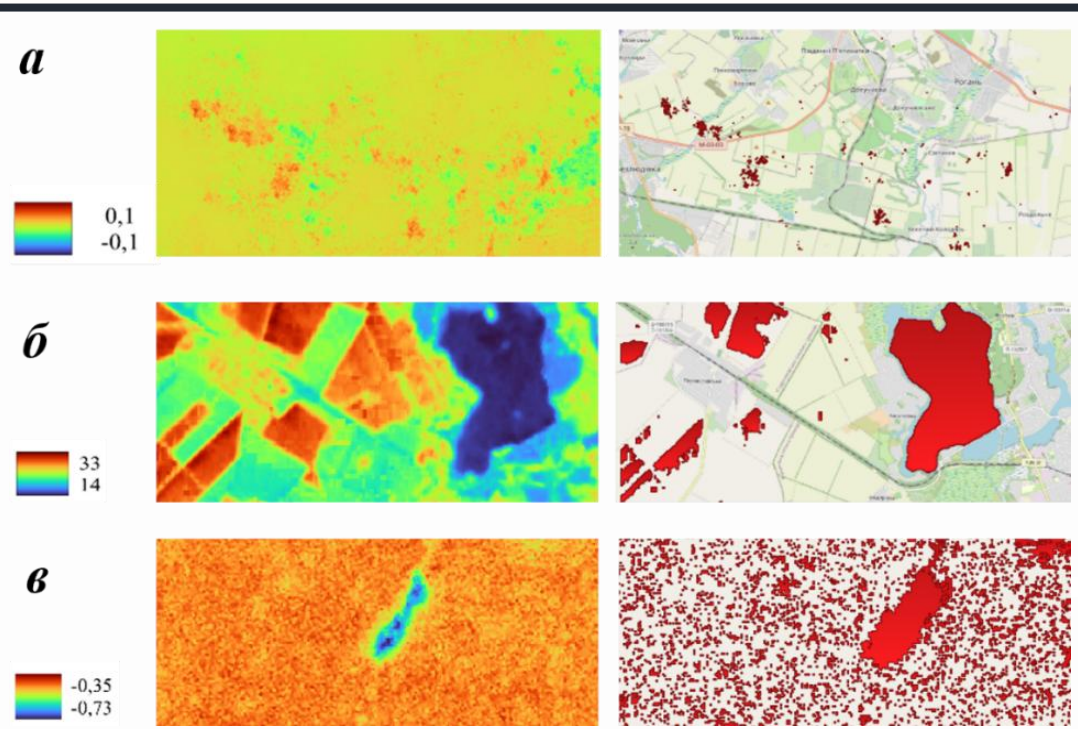
Універсальність QGIS-плагіна «Anomalies to Contours»



Плагін оприлюднено в каталозі розширень QGIS

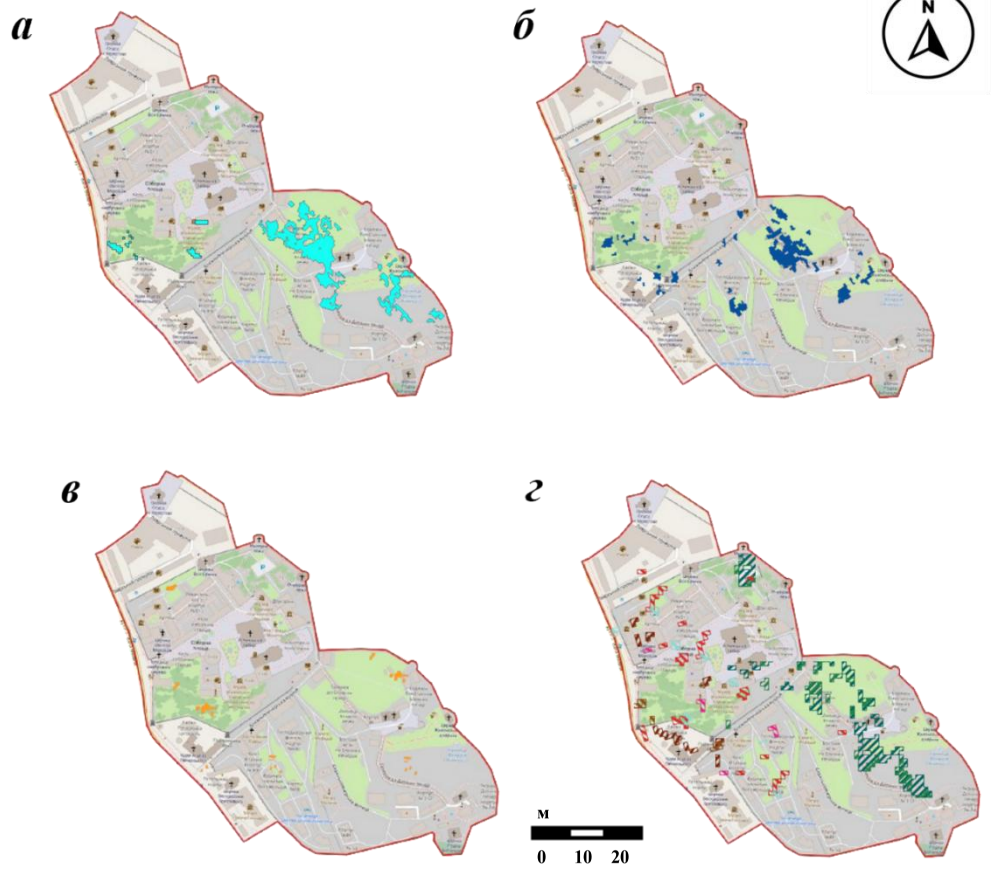


Для всіх типів даних застосовано однакову алгоритмічну процедуру. Фізична інтерпретація виділених аномалій визначається змістом вихідного показника



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

Результати застосування QGIS-плагіна на території Києво-Печерської лаври



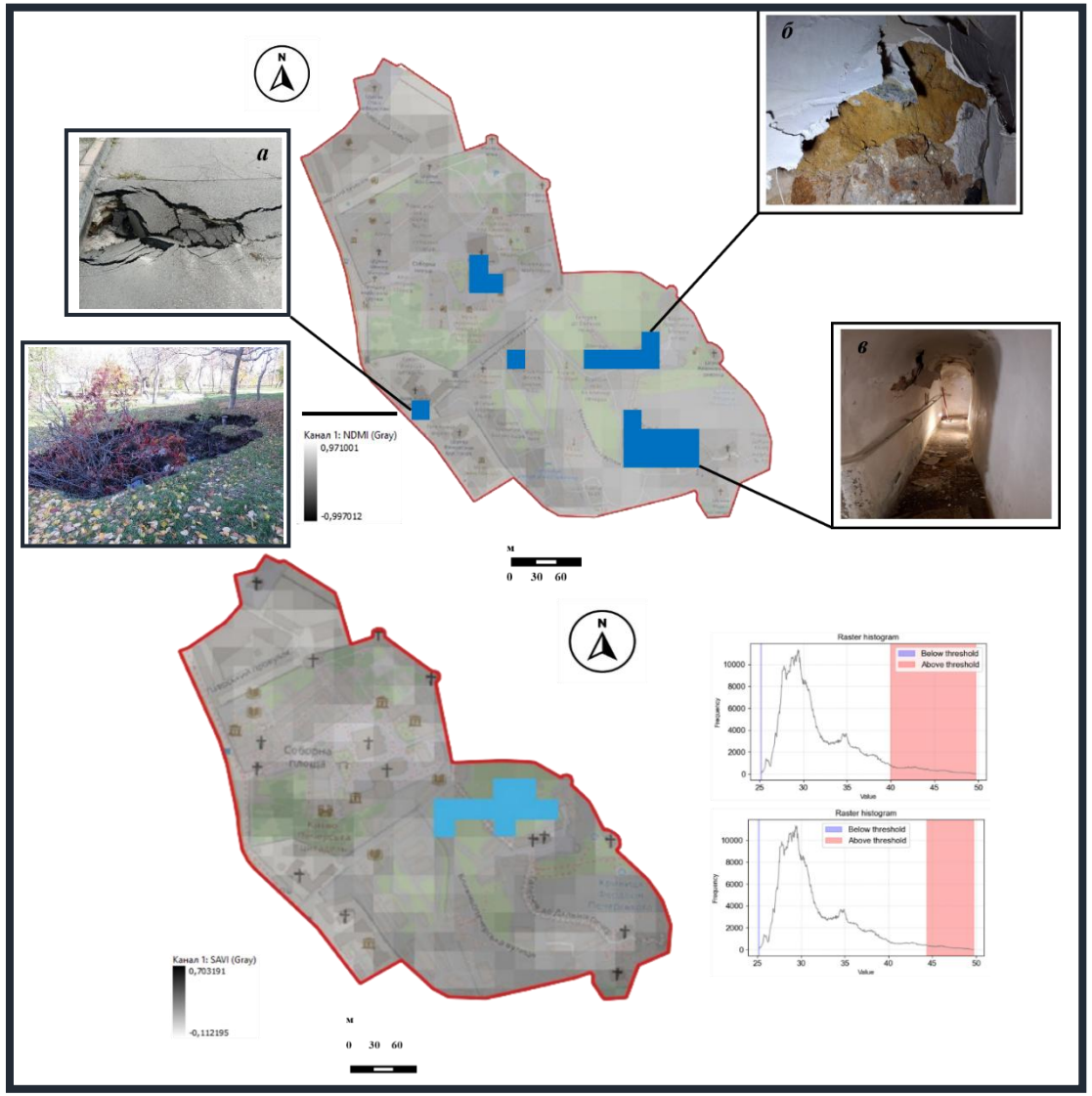
Результати автоматизованого виявлення геопросторових аномалій досліджуваної території:

а - зони підвищеного зволоження земної поверхні;

б - зони спектральних ознак засолення ґрунтів;

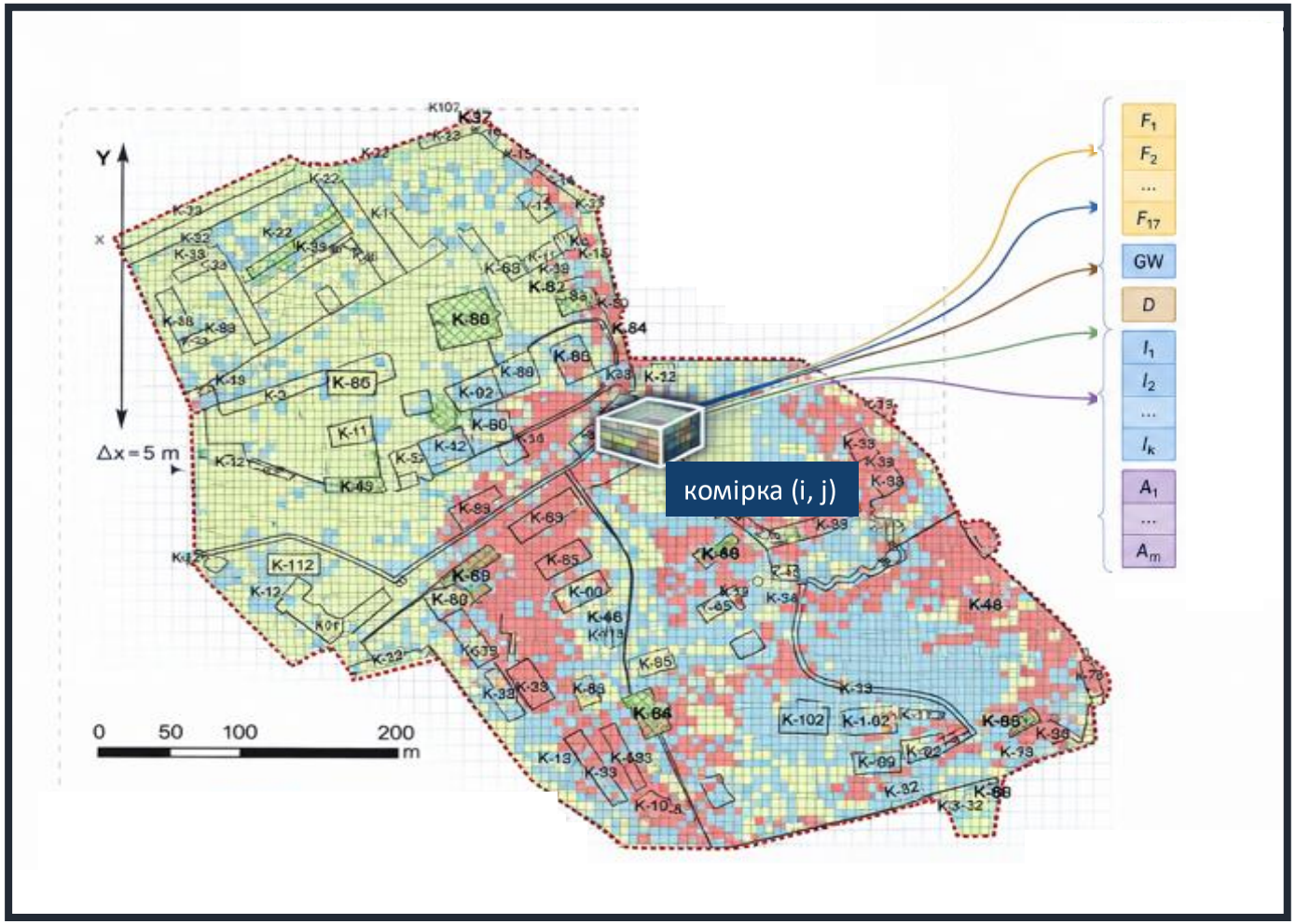
в - зони спектральних ознак активної водної ерозії;

г - зведені геопросторові аномалії за сукупністю спектральних показників.



Виявлені аномалії використано як індикатори просторово неоднорідного стану поверхні після змістової перевірки за незалежними матеріалами спостережень

Просторове представлення вхідних даних на регулярній сітці



Регулярна сітка забезпечує просторову сумісність різнорідних даних і збереження взаємного положення ознак

Формування вхідних даних моделі

1. Різнорідні дані приведено до єдиного формату та регулярної просторової сітки 5 × 5 м.
2. Векторні шари растеризовано, а точкові й растрові дані просторово узгоджено з комірками сітки.
3. Для кожної комірки сформовано вектор із 22 ознак: 17 природних і техногенних факторів; 3 характеристики рівнів ґрунтових вод; деформації; аномалії.
4. Кількісні ознаки нормалізовано, а просторово узгоджені канали об’єднано у вхідний багатоканальний просторовий масив

$$X \in \mathbb{R}^{B \times 22 \times H \times W},$$

де B є кількістю просторових фрагментів у пакеті (batch); H і W є їх просторовими розмірами в комірках сітки.

Адаптована архітектура моделі U-Net–Transformer

Функціональні складові

Кодер U-Net

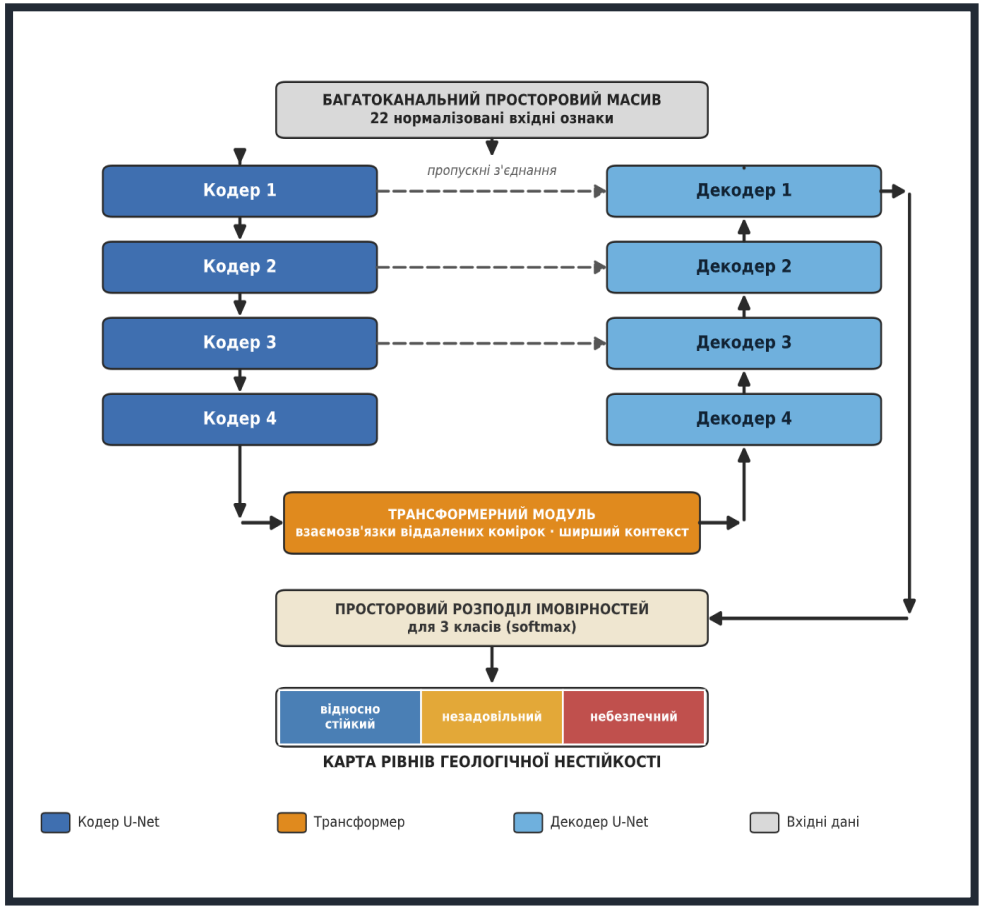
- виділяє локальні й багатомасштабні просторові ознаки;
- послідовно формує узагальнене представлення вхідних даних.

Transformer

- враховує залежності між просторово віддаленими комірками;
- забезпечує аналіз ширшого просторового контексту.

Декодер U-Net

- відновлює просторову деталізацію;
- формує оцінки належності кожної комірки до трьох класів.

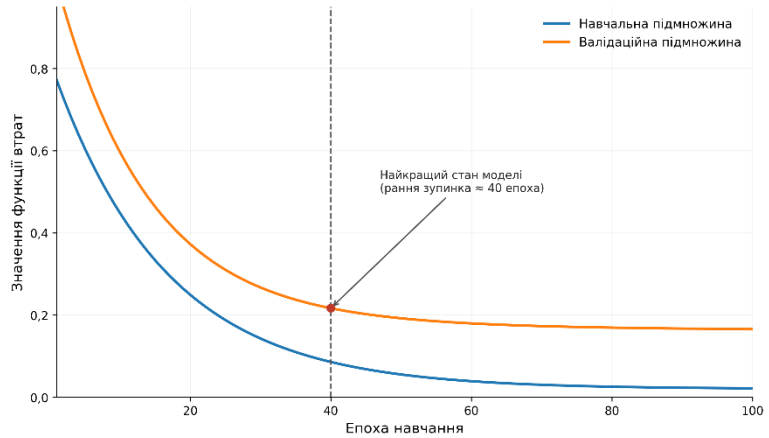


Гібридна архітектура поєднує локальну деталізацію U-Net із просторовим контекстом Transformer для класифікації кожної комірки регулярної сітки

Просторовий поділ даних і навчання нейромережевої моделі



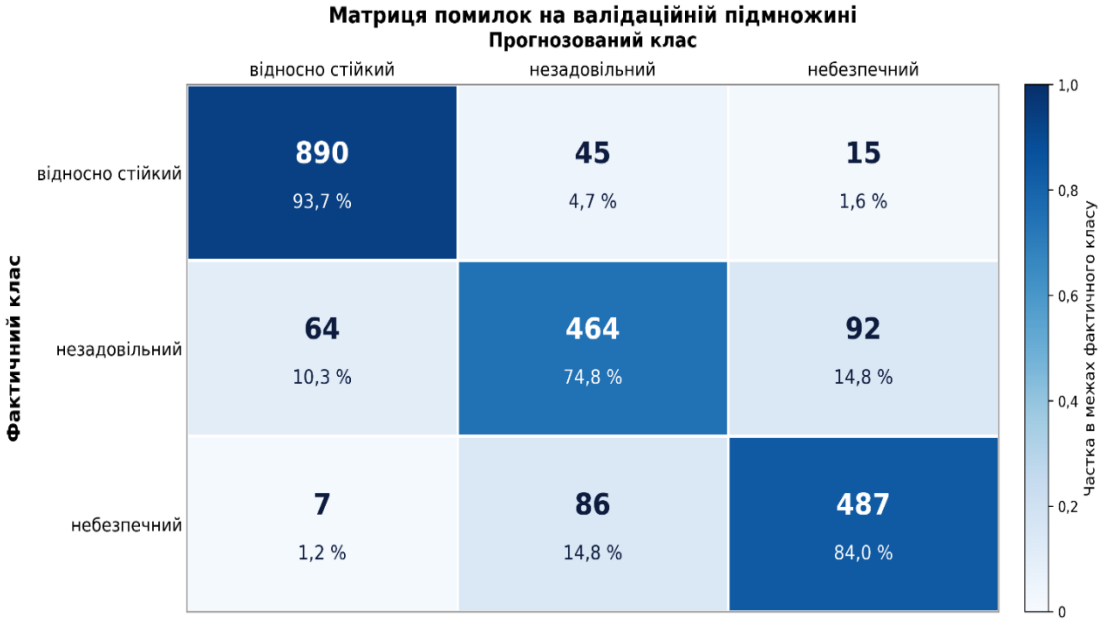
Параметри навчання:
просторовий поділ: 75 % навчальних і 25 % валідаційних даних;
оптимізатор: AdamW;
швидкість навчання: 1 x 10^{-4};
функція втрат: зважена крос-ентропія;
розмір пакета: 32 просторові фрагменти;
максимальна кількість епох: 100;
рання зупинка: після 40 епох без покращення.



Динаміка функції втрат на навчальній і валідаційній підмножинах

Просторове розділення підмножин зменшує вплив просторової автокореляції та забезпечує коректніше оцінювання узагальнювальної здатності моделі

Оцінювання якості нейромережевого моделювання

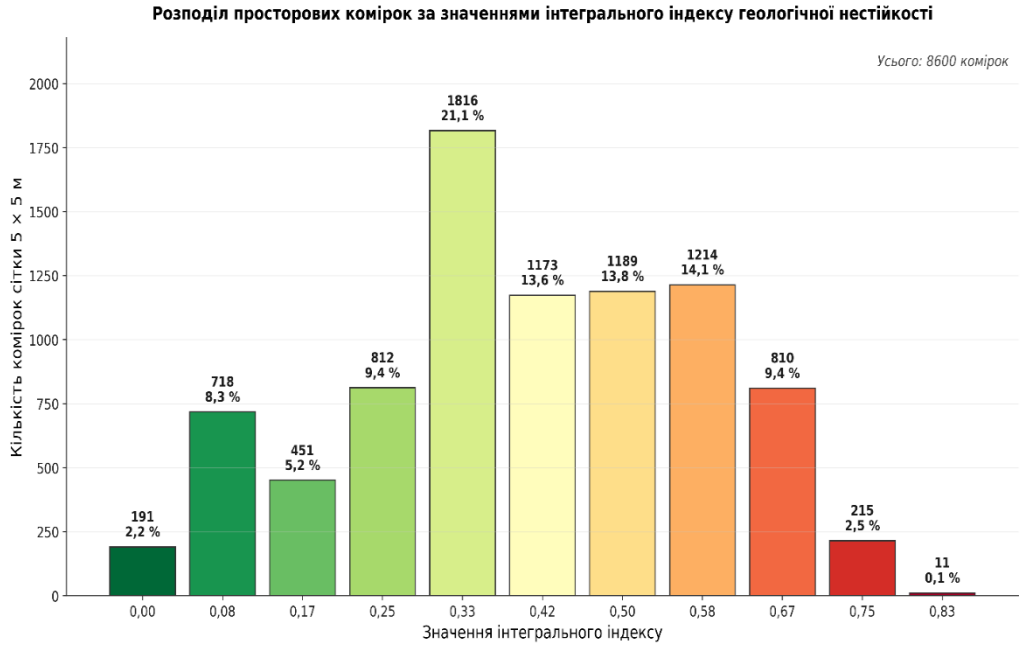


Результати оцінювання

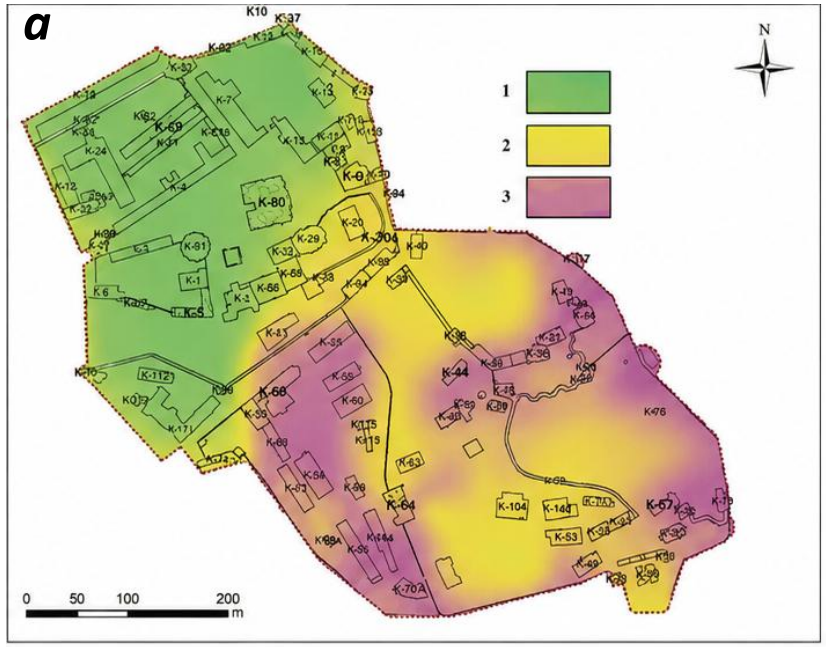
Загальна правильність класифікації, accuracy: 0,856
F1-міра небезпечного класу: 0,83
Макроусереднене значення ROC-AUC: 0,90
Середній коефіцієнт перетину та об’єднання, mean IoU: 0,733

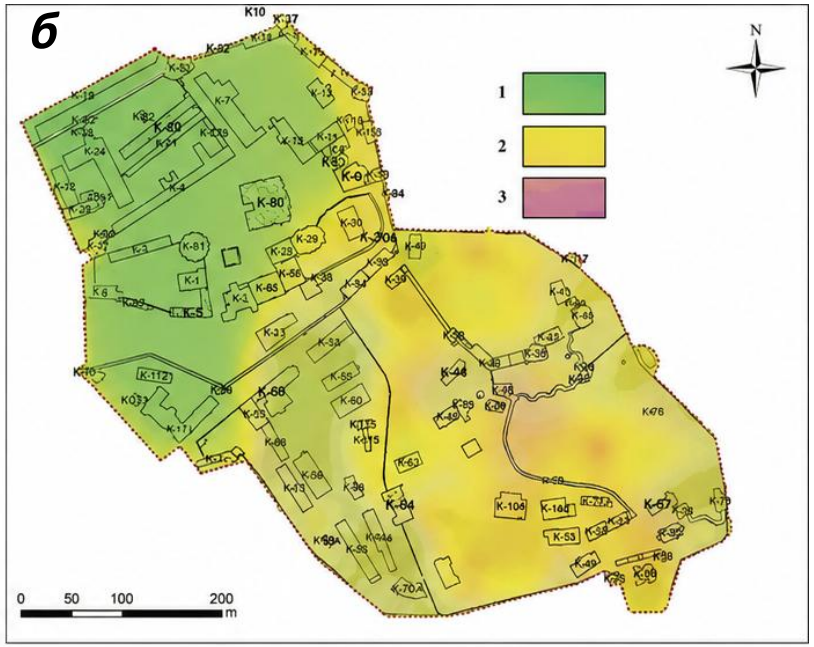
Правильно класифіковано
відносно стійкий рівень: 93,7 %;
незадовільний рівень: 74,8 %;
небезпечний рівень: 84,0 %.

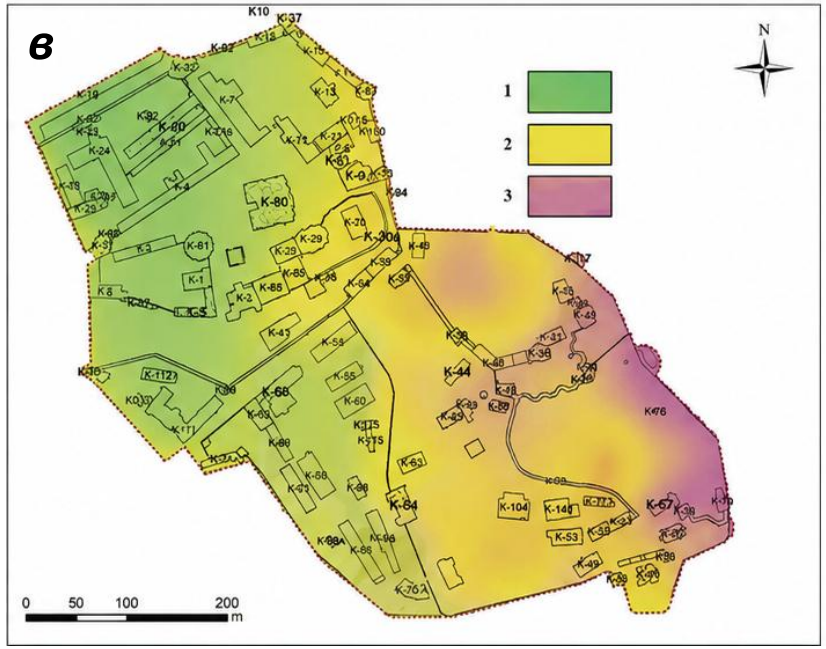
Основні помилки виникають між суміжними незадовільним і небезпечним класами, що відображає перехідний характер їх просторових меж.

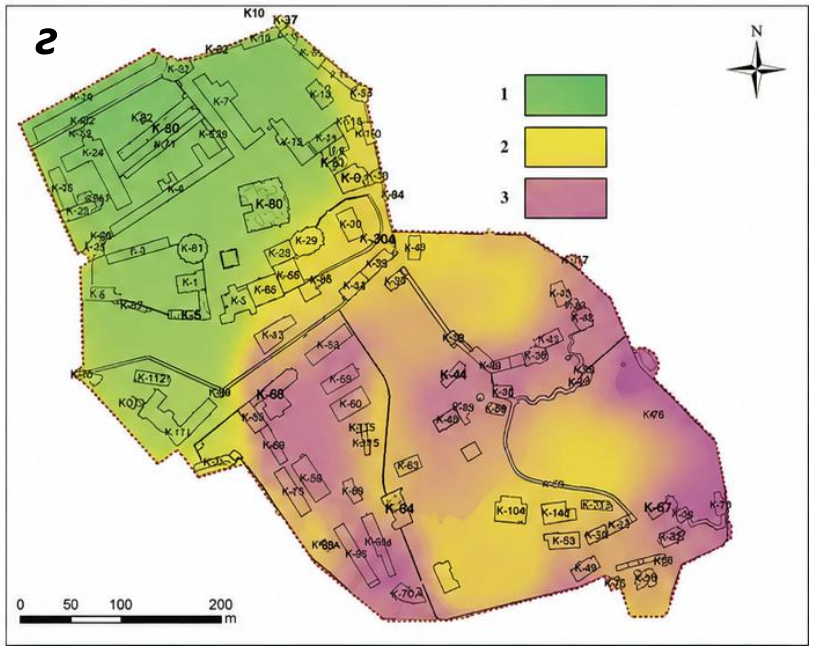


Різночасове оцінювання геологічної нестійкості









Різночасове оцінювання геологічної нестійкості:

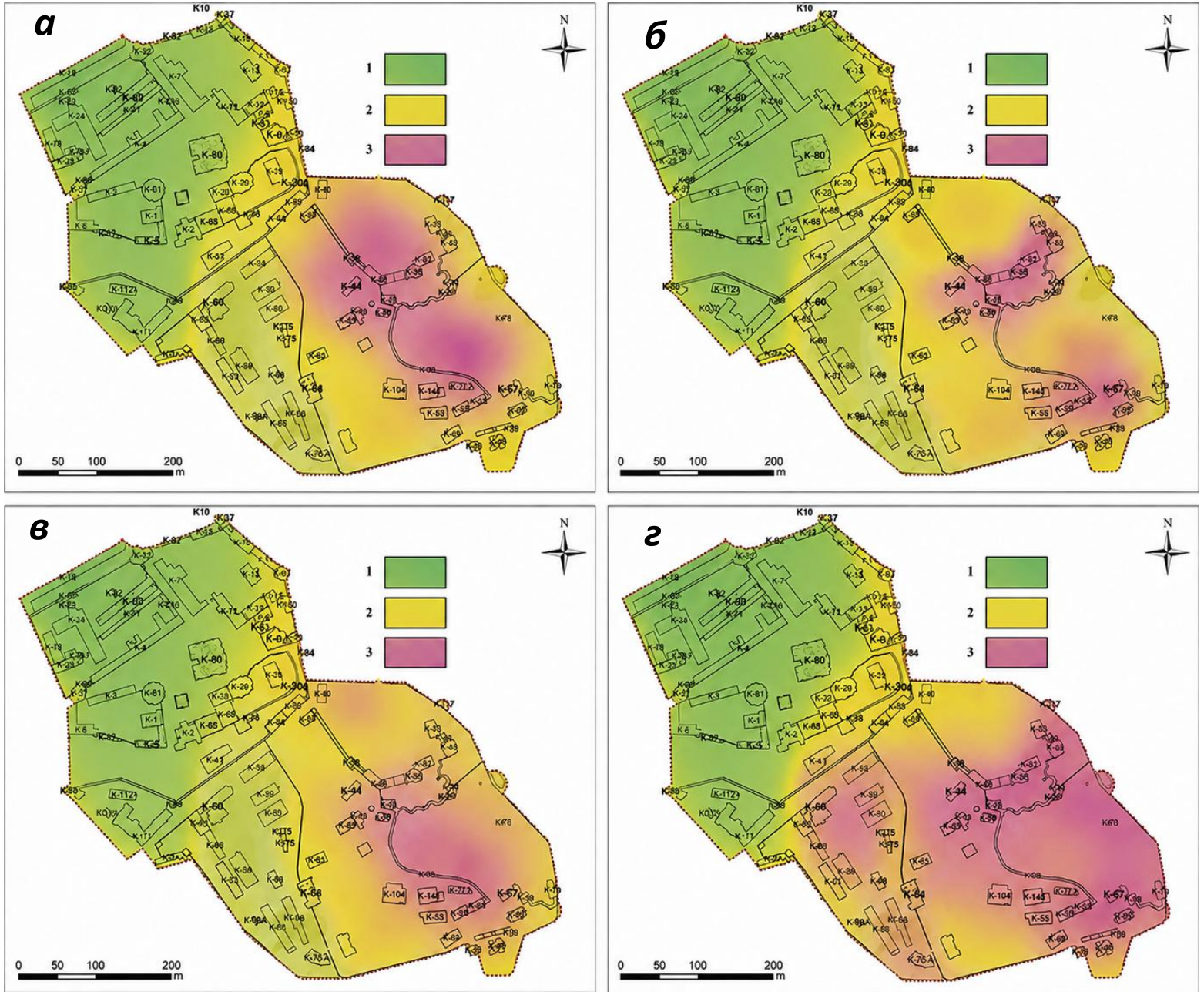
а - переважання відносно стійкого рівня у Верхній лаврі та незадовільного рівня в нижчих і схилових частинах території. (2019 р.)

б - локальне поширення незадовільного й небезпечного рівнів у межах Ближньо- та Дальньопечерного пагорбів і прилеглих схилів. (2022 р.)

в - збереження відносно стійкого рівня у Верхній лаврі та локальних ділянок підвищеної нестійкості поблизу інженерних об'єктів і зон порушеного водовідведення (2023 р.)

г - розширення ділянок незадовільного й небезпечного рівнів у Нижній лаврі за умов перезволоження, складного водообміну та техногенного навантаження (2024 р.)

Просторові зміни геологічної нестійкості за даними моніторингу



Карти просторового розподілу рівнів геологічної нестійкості:

а - локальні ділянки небезпечного рівня в межах печерних комплексів і прилеглих схилів (2017 р.)

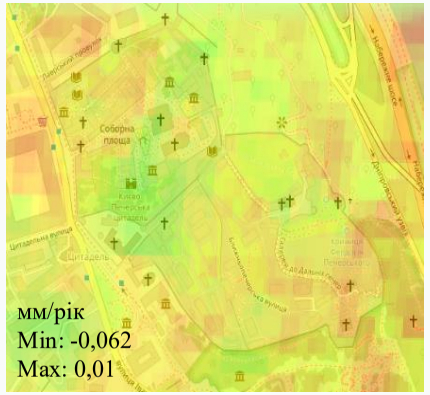
б - підвищена нестійкість на схилах Ближніх печер і в межах Лаврського яру (осінь 2015 р)

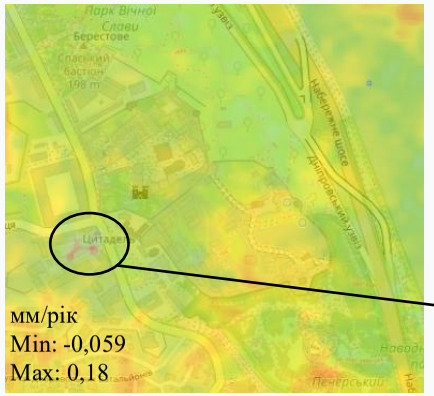
в - переважання відносно стійкого рівня за наявності локальних ділянок незадовільного й небезпечного класів (2013 р.)

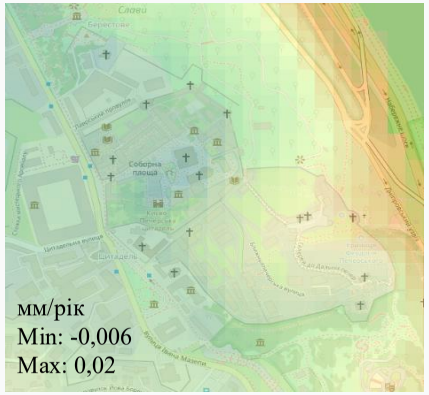
г - розширення ділянок підвищеної нестійкості за умов сезонного підвищення рівнів ґрунтових вод (весна 2009 р.)

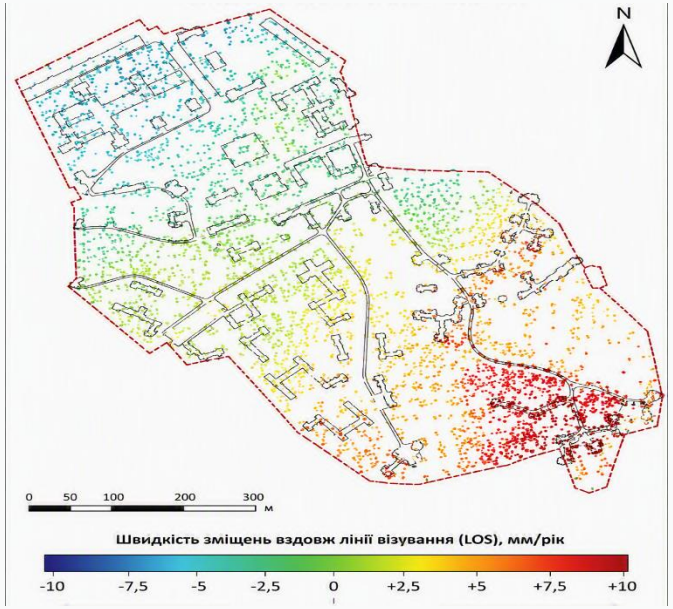
Верифікація результатів за даними PS-InSAR і задокументованими проявами процесів

Зміщення за даними PS-InSAR:









Зведена карта інтерферометричних зміщень вздовж лінії візування супутника, 2018–2024 рр.

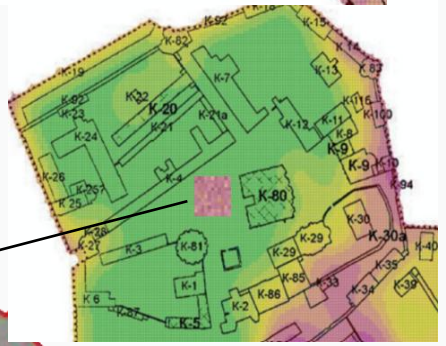
Дані PS-InSAR не використовувалися під час навчання моделі та залучені як незалежне джерело верифікації

Задокументований провал земної поверхні









Просторове положення прояву відносно модельних класів

Після фіксації провалу й актуалізації моніторингових ознак у межах переважно відносно стійкої території модель локалізувала ділянку підвищеної геологічної нестійкості, просторово узгоджену з даними PS-InSAR

Висновки

1. Обґрунтовано поняття геологічної нестійкості як інтегральної просторово-часової характеристики стану геологічного середовища, що відображає порушення або тенденцію до порушення його рівноваги під сукупним впливом природних і техногенних чинників.
2. Розроблено комплексний методичний підхід до геоінформаційного моніторингу, що поєднує інженерно-геологічні, гідрогеологічні, геодезичні, геофізичні та дистанційні дані. Сформовано уніфіковану інформаційну основу з 22 просторово узгоджених ознак.
3. Розроблено QGIS-плагін «Anomalies to Contours» для автоматизованого статистичного виявлення, векторизації та атрибутивного опису геопросторових аномалій. Апробація підтвердила можливість застосування єдиної алгоритмічної процедури до числових растрів різної фізичної природи.
4. Адаптовано й навчено гібридну модель U-Net–Transformer для просторового уточнення інтегральної оцінки геологічної нестійкості. На просторово відокремленій валідаційній підмножині отримано: accuracy, 0,856; F1 небезпечного класу, 0,83; macro ROC-AUC, 0,90; mean IoU, 0,733.
5. Сформовано та змістовно верифіковано карту рівнів геологічної нестійкості території Києво-Печерської лаври. Зіставлення із задокументованими проявами процесів та даними PS-InSAR засвідчило просторову узгодженість виділених ділянок із незалежними ознаками гідрогеологічного й деформаційного стану території.
6. Обґрунтовано процедуру актуалізації оцінки шляхом оновлення гідрогеологічних, деформаційних і дистанційних ознак та повторного застосування навченої моделі, що забезпечує формування й зіставлення карт за різні періоди спостережень.