

Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту
геологічних наук Національної академії наук України”

Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту
геологічних наук Національної академії наук України”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОРЛЕНКО ТЕТЯНА АНАТОЛІЇВНА

УДК 528.8: 551.3

ДИСЕРТАЦІЯ

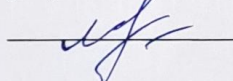
МЕТОДИКА ДИСТАНЦІЙНОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ
ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРИКЛАДІ ПРАВОБЕРЕЖЖЯ КАНІВСЬКОГО
ВОДОСХОВИЩА

Спеціальність 103 – Науки про Землю

Галузь знань – 10 – Природничі науки

Подается на здобуття ступеня **доктора філософії**

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

 Т.А. Орленко

Науковий керівник Седлєрова Ольга Володимирівна, кандидат геологічних наук,
старший науковий співробітник

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Орленко Т.А. Методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів на прикладі правобережжя Канівського водосховища. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 – Науки про Землю, галузь знань 10 – Природничі науки. Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», м. Київ, 2024.

Природним процесом є постійна денудація схилів, що полягає у сповзанні, зсуванні, обвалюванні, ерозійному розмиві. На сьогодні активний розвиток зсувів на території України відбувається внаслідок впливу геолого-географічних, геоморфологічних, тектонічних та неотектонічних факторів. Моніторинг екзогенних геологічних процесів (ЕГП) за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є джерелом отримання достовірних даних про об'єкти земної поверхні з широким діапазоном охоплення територій, за короткі часові проміжки.

До небезпечних геологічних явищ належать зсуви, селі та обвали, які спостерігаються на будь-якій території, де є яри, круті береги водойм, пагорби, гори. Зсуви утворюються у різних гірських породах у результаті порушення їх рівноваги, послаблення міцності, спричиняються як природними, так і антропогенними чинниками.

До природних причин зсувів належать збільшення крутості схилів та їх підмив, процеси вивітрювання та землетруси, до антропогенних – будівельні та вибухові роботи, руйнування схилів надмірним виносом ґрунту, вирубка лісів, знищення рослинного покриву на схилах або їх розорювання, надмірний полив розташованих на схилах сільськогосподарських угідь, засмічення місць виходу підземних вод тощо. Зсуви можуть відбуватися при крутості схилу 10° і більше, але на глинястих ґрунтах, при їх надмірному зволоженні, вони можуть виникати й при крутості схилу $5\text{--}7^\circ$.

Причиною зсуву на берегах водосховищ можуть бути – перезволоження ґрунтового покриву дощовими та сніговими опадами, підмив схилів, вплив кліматичних змін та понаднормове антропогенне навантаження. Активізація зсувів залежить від інтенсивності руйнування ґрунтового покриву. Часто причиною зсувів є відсутність рослинного покриву та зміни рельєфу території. Об'єм ґрунту, який зміщується під час зсуву, може становити від декількох сотень до тисяч мільйонів кубометрів, а швидкість коливатися від декількох метрів на рік до декількох метрів на секунду. Найбільш зсувонебезпечними є правобережні схили долини р. Дніпро та схили правосторонніх приток, борти балок і ярів. Активізація гравітаційних процесів, що почалася з другої половини ХХ сторіччя на Канівщині (нині – території Ржищівської ОТГ), в тому числі, викликана штучною зміною гідрологічного режиму Дніпра, інтенсивною забудовою схилів та будівництвом відповідних комунікацій.

Метою дисертаційної роботи є підвищення оперативності та достовірності прогнозування виникнення нових або активізації стабілізованих зсувів узбережжя шляхом розробки методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувонебезпечних схилів та створення алгоритму прогнозування на основі комплексного аналізу даних радарної інтерферометрії, супутникового оптичного знімання, наземних кліматологічних, літологічних, ландшафтних даних.

В дисертаційному дослідженні проведено аналіз науково обґрунтованих висновків про вплив геолого-геофізичних чинників активізації зсувів, біофізичних факторів та впливу кліматичних змін, в тому числі підвищеної вологості ґрунтового покриву, на зсувні процеси; показано як можна фіксувати ділянки підвищеної сприйнятливості території до зсувів. Саме на цих теоретичних та практичних результатах базується методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів.

Дані дистанційного зондування Землі широко використовуються у дослідженні ЕГП, в тому числі процесів зсувоутворення. У дисертаційному дослідженні на основі аналізу та підбору оптимальних супутникових даних та

методів їх обробки запропоновано алгоритми та процедуру комплексного аналізу для визначення зсувонебезпечності території.

Для встановлення ділянок активізації зсувних процесів супутникові дані повинні мати високу просторову розрізненість та часову періодичність. Супутникові знімальні системи дозволяють здійснювати моніторинг зсувів в оптичному та радарному діапазонах для своєчасного виявлення змін рельєфу та стану ґрунтового покриву. Проте застосування оптичних даних має значні обмеження, порівняно з радіолокаційними. На відміну від оптичних знімальних систем, радіолокаційні забезпечують здійснення зйомки земної поверхні в періоди значної хмарності та в нічний час доби.

Таким чином дані радарного супутника Sentinel-1 з просторовою розрізненістю 10 м використано для обчислення величини зміщень земної поверхні та встановлення рівня сприйнятливості території до зсувів. Радарні зображення, містять дані у форматі дискретних цілочисельних значень (DNSAR), були оброблені у відкритому програмному середовищі Sentinel Application Platform (SNAP). Багатоспектральні оптичні супутникові дані, отримані супутником Sentinel-2, з просторовою розрізненістю 10 м, використано як основу для дослідження стану рослинності та вологі ґрунтового покриву території дослідження. В методиці дистанційного геоecологічного моніторингу, розробленої в рамках даного дослідження, враховано вплив топографічних особливостей місцевості з використанням ЦМР SRTM-30 м та геолого-географічних історичних карт.

Проведено моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні правобережжя Канівського водосховища на ділянці Витачів-Стайки з використанням методики диференціальної радарної інтерферометрії (DinSAR). За результатами спостережень протягом весняного періоду з 2015 по 2023 роки закартовано активні зсувні ділянки. Виявлено високий рівень кореляції даних, отриманих попередніми дослідниками, і результатів диференціальної радарної інтерферометрії, отриманих у цьому дослідженні. Підтверджено наявність зон активних зміщень на правобережжі Канівського водосховища.

Поширення та інтенсивність проявів зсувів зумовлені особливостями геологічної та геоморфологічної будови території, її тектонічних, неотектонічних та сейсмічних режимів, а також гідрологічними та кліматичними умовами. Визначено обмеження методу, що виникають внаслідок часової декореляції радіолокаційного сигналу в районах з великою кількістю рослинності. Через значну декореляцію отриманих результатів заліснених та обводнених ділянок у методику дистанційного геоecологічного моніторингу зсувних процесів об'єднано метод DinSAR, аналіз цифрової моделі рельєфу (DEM), аналіз карт базисних поверхонь та результати обчислення спектральних індексів, для виявлення ділянок активних зсувів, спричинених перезволоженням породних комплексів дніпровських схилів.

Одним із результатів дослідження є створення карти сприйнятливості території до зсувів на регіональному рівні для Ржищівської об'єднаної територіальної громади Київської області. Для проведення цього аналізу обрано вісім факторів, які впливають на розвиток зсувів або можуть бути визначені, як індикатори зсувних процесів.

Зсуви на території Київської області мають відмінні характеристики та різні стадії розвитку. Масштабність розвитку зсувів зростає в умовах високої енергії рельєфу, крутизни та висоти схилів, коливання рівня водоймищ та близького розташування до субпаралельних крупних розломів. Гідрометеорологічний фактор визначається як один із основних тригерів зсувів, зокрема, причиною підвищеною активності зсувів протягом 2013 року стали понаднормова кількість опадів та перенасичення ґрунтового покриву вологою. Рослинність, особливо деревна, покриває значну частину правобережжя Канівського водосховища, роблячи стабілізовані зсувні тіла візуально непомітними на оптичних знімках. Вертикальні стінки зсувів з відслоненнями можна спостерігати лише з нижніх терас або заплави. Застосування супутникових даних, порівняно з традиційними методами дослідження зсувів, дає перевагу, яка полягає у дистанційній доступності об'єкту, оглядовості для проведення спостережень та можливості моніторингу геологічних процесів з високою періодичністю.

У роботі розроблено алгоритм та описано процедуру створення карти сприйнятливості території до зсувів з використанням методу аналізу ієрархій, що є завершальним етапом розробленої методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів, застосованої для правобережжя Канівського водосховища на ділянці Витачів-Стайки. Загалом методика базується на алгоритмах отримання даних, головним із яких є алгоритм створення карто-схеми вертикальних зміщень земної поверхні за методом радарної інтерферометрії.

Для визначення відносної ваги зазначених факторів використано метод аналізу ієрархій (MAI) (*Saaty, 1980*), за яким встановлено пріоритет факторів та субфакторів, що стають причиною зсувів на правобережжі Канівського водосховища. Фактори, що були визначені як значущі для оцінювання зсувонебезпечності, в оцінюванні сприйнятливості виступають в ролі індикаторів, які об'єднані в групи за генезисом або способом отримання інформації. Попарні порівняння проводилися в термінах домінування одних індикаторів над іншими. Порівняння проводилося експертами за дев'ятибальною порядковою шкалою “відносної важливості”.

Застосування методу аналізу ієрархій дає можливість сконструювати необхідну цільову функцію й оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи. Аналіз факторів впливу на зсуви реалізовано в кілька послідовних кроків, таких як: розробка ієрархічної структури поставленої задачі, виконання двійкових порівнянь критеріїв, встановлення порівняльної матриці суджень, обчислення векторів пріоритетів, оцінювання значення індексу узгодженості (CI), створення таблиці ступенів важливості критеріїв моделі та прийняття остаточного рішення на основі узагальненого критерію.

В процесі застосування MAI визначено два потенційні сценарії стану території дослідження – сприятливий та несприятливий, також укладено карти сприйнятливості території до зсувів за визначених умов. Встановлено, що найбільший вплив на розвиток зсувів мають такі чинники як вертикальні зміщення земної поверхні (які відображають величину зсувів в конкретній точці, території дослідження), крутизна схилів, наступним чинником впливу є літологічна основа

та вологість ґрунтового покриву. Карти базисних поверхонь та щільність лінеamentів демонструють зони найбільшого ризику утворення нових зсувів. Значення розподілу вегетаційного індексу NDVI та типи земного покриття на території дослідження мають найнижчий рівень впливу на розвиток зсувів. Водночас біофізичні параметри території дослідження дозволяють визначити ділянки, що не піддаються впливу зсувних процесів.

Отриманий результат дає уявлення про різну схильність ділянок досліджуваної території до розвитку зсувних процесів, окреслено ділянки найбільших загроз, що, своєю чергою, сприятиме раціональному прийняттю управлінських рішень.

Одним із етапів методики дистанційного геоекологічного моніторингу є проведення польових досліджень на дев'яти тестових ділянках. В межах ділянок спостерігаються прояви екзогенних геологічних процесів, таких як зсуви та ерозія, що впливають на рельєф схилів; вплив природних факторів, таких як опади, водні потоки та вітер, що є загальними чинниками впливу на досліджуваній території. Для завірки сталого рівня земної поверхні обрано контрольні ділянки, які є ідеальним прикладом для вимірювання сталого рівня земної поверхні, оскільки вони не використовуються в сільському господарстві, не обробляються та не зазнають антропогенного впливу, тому їх рельєф залишається незмінним упродовж часу.

У дисертаційному дослідженні розглядаються актуальні проблеми геоекологічного стану території, вивчається вплив факторів, що спричиняють утворення нових або стабілізацію вже відомих зсувів. Для проведення дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів запропонована методика, яка дозволяє аналізувати сучасний стан та прогнозувати розвиток зсувів на певній території. Розроблена методика базується на використанні даних дистанційного зондування Землі, а також геоінформаційних систем. Використовуються інноваційні технології обробки та аналізу геоданих для ефективного визначення зон потенційного ризику зсувів та їхнього впливу на навколишнє природне середовище.

Автором проаналізовано та обґрунтовано чинники активізації зсувів, виконано побудову карти сприйнятливості території до зсувів та проведено поділ території на класи за ступенем сприйнятливості до зсувних процесів.

Власне методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів, складається з таких етапів:

- визначення потенційного ризику небезпеки – встановлення найбільш сприйнятливих до зсувів ділянок;
- визначення структурних особливостей території дослідження – основні характеристики будови, включно з геологічними формаціями та природними ландшафтними комплексами;
- визначення топографічних особливостей ділянки дослідження – рельєфу території, включаючи різницю висот, наявність водойм, долин, ярів та балок;
- створення карти сприйнятливості території до зсувів – аналіз геологічної структури території дослідження, топографічних та біофізичних властивостей для визначення ступеня сприйнятливості території до зсувів, аналіз достовірності побудованої карти сприйнятливості, з використанням наявної інформації регіону дослідження.

Наукова новизна

Вперше розроблено методику дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів на основі даних радарної інтерферометрії та аналізу геологічних, геоморфологічних та біофізичних факторів, яка відрізняється від відомих новим кількісним ранжуванням чинників зсувонебезпеки та забезпечує більш достовірне та оперативне виявлення і картування зсувних процесів.

Вперше створено карту сприйнятливості до зсувів території правобережжя Канівського водосховища в межах Ржищівської ОТГ на ділянці Витачів-Стайки, яка базується на визначенні локалізації активних зсувних ділянок за результатами комплексного аналізу даних радарної інтерферометрії, оптичного дистанційного зондування, геологічних, геоморфологічних і біофізичних особливостей ландшафту, що дозволило виявити та підтвердити польовими дослідженнями додаткові, не закартовані раніше зсувонебезпечні ділянки.

Набула подальшого розвитку методологія локального прогнозування зсувної небезпеки, що дозволило враховувати додаткові ознаки цих процесів та визначити потенційно активні ділянки зсувів в межах території дослідження на основі сучасних методів дистанційного зондування Землі, а також запропонувати комплекс превентивних заходів щодо їх усунення.

За результатами досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 1 глава у монографії (проіндексована в базі даних Web of Science); статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до Переліку наукових фахових видань України – 5 (з них 2 проіндексовані в базах даних Web of Science та Scopus); 7 – у збірниках та матеріалах тез доповідей вітчизняних та міжнародних конференцій, з яких 7 – міжнародні, що проіндексовані в базі даних Scopus. Додатково представлено 5 матеріалів всеукраїнських та міжнародних конференцій (в Україні) як матеріали апробації результатів, отриманих в дисертаційній роботі.

Ключові слова: зсуви, дистанційне зондування Землі, радарна інтерферометрія, сприйнятливість території до зсувів.

ABSTRACT

Orlenko T.A. Remote geoecological monitoring technique for landslide processes: an example of the right bank of the Kaniv Reservoir. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in speciality 103 – Earth Sciences, field of knowledge 10 – Natural Sciences. State institution "Scientific Center for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, 2024.

The constant denudation of slopes, a natural process involving landslide, shifting, collapse, and erosion, is a pressing issue. The active development of landslides on Ukraine's territory results from various factors, including geological, geographical, geomorphological, tectonic, and neotectonic. Monitoring of exogenous geological processes based on remote sensing data is a source of obtaining reliable data about objects on Earth's surface with a wide range of coverage of territories in short time intervals.

Landslides, mudslides, and crumbling are dangerous geological phenomena that can be observed in any region with ravines, steep banks, hills, and mountains. Landslides form in various rocks due to their imbalance and weakening of strength caused by natural and anthropogenic factors.

The natural causes of landslides include an increase in the steepness of slopes and their washing away, weathering processes and earthquakes, and anthropogenic causes include construction and blasting works, destruction of slopes by excessive removal of soil, felling of forests, destruction of vegetation on slopes or their ploughing, increased irrigation of agricultural lands located on slopes, clogging of groundwater outlets, etc. Landslides can rise at a steepness of the slope of 10° or more, but on clay foundations, with their high moisture, they can also occur at a steepness of the slope of $5-7^\circ$.

Landslides on the banks of reservoirs can be caused by overwetting of the soil by rain and snow, slope wash, climate change and overtime-anthropogenic influence. The activation of landslides depends on the intensity of the destruction of soil cover.

Landslides are often caused by the lack of vegetation and changes in the region's topography. The volume of soil mass in a landslide can range from several hundred to thousands of cubic meters, and the speed varies from several meters per year to several meters per second. The right-bank slopes of the Dnipro River valley and the slopes of the right-hand tributaries, sides of streams and ravines are the most prone to landslides. The activation of gravity processes, which began in the second half of the 20th century in the Kaniv region (now the territory of the Rzhyschiv United Territorial Community of the Kyiv Region), was caused, among other things, by an artificial change in the hydrological regime of the Dnipro River, intensive slopes development and the construction of relevant communications.

The thesis aims to increase the efficiency and reliability of forecasting the occurrence of new or intensified stabilised coastal landslides by developing a technique for remote geoecological monitoring of landslide-prone areas. It creates a forecasting algorithm based on a comprehensive analysis of radar interferometry data, optical images of the Earth, and terrestrial climatological, lithological, and landscape data.

This thesis analyzes scientifically based conclusions on the influence of geological and geophysical factors on landslide activation, biophysical factors, and the influence of climatic change. High-level soil moisture on landslide processes was carried out; it is shown how it is possible to fix areas of increased susceptibility to landslides. The technique of remote geoecological monitoring of landslide processes is based on these theoretical and practical results.

Remote sensing data plays a crucial role in our study of exogenous processes, particularly in understanding the processes of landslide formation. In this thesis, we propose a methodology with a direct practical implementation of comprehensive landslide hazard assessment analysis. These methodologies are based on selecting optimal remote sensing data and their processing methods.

Remote sensing data should possess both high spatial and temporal resolution in order to delineate areas of landslide process activation. Satellite surveys allow timely monitoring of landslides in the optical and radar ranges to detect changes in the relief of territory and the state of the soil cover. However, the use of optical data has significant

limitations compared to radar data. In contrast to optical imaging systems, radar systems provide imaging of the Earth's surface during periods of substantial cloudiness and at night.

Sentinel-1 radar data with a spatial resolution of 10 m were used to calculate the Earth's surface displacements and establish the region's landslide susceptibility. Radar images containing discrete integer value (DNSAR) data were processed in the Sentinel Application Platform (SNAP) open-source software environment. Multispectral data from the Sentinel-2 satellite, with a spatial resolution of 10 m, were used to study the region's vegetation and soil moisture state. The remote geoecological monitoring technique, developed within this study's framework, considers the influence of the area's topographic features using SRTM-30 m DEM, geological, geographical, and historical maps.

Monitoring vertical displacements of the Earth's surface on the right bank of the Kaniv Reservoir in the Vytachiv-Stajky region, conducted using the differential radar interferometry (DinSAR) technique, has yielded significant results. Over the spring of 2015 to 2023, we successfully mapped active landslide-prone areas. Importantly, our findings have shown a high level of correlation with the data obtained by previous researchers, further validating the results of this study. This confirms the presence of active displacement zones on the right bank of the Kaniv Reservoir, a crucial discovery in landslide processes.

The spread and intensity of landslide manifestations are intricately linked to the geological and geomorphological structure of the territory, its tectonic, neotectonic and seismic activity, and hydrological and climatic conditions. The method's limitations, such as temporal decorrelation of the radar signal in areas with a large amount of vegetation, have been carefully considered. A comprehensive technique was developed to overcome the significant correlation between the obtained results in forested and watered areas. This methodology combines the DinSAR method, the analysis of a digital relief model (DEM), the study of base surface maps, and the results of calculating spectral indices. This approach has proven effective in remote geoecological monitoring of landslide processes,

particularly in identifying areas of active landslides caused by the overwetting of rock complexes on the Dnieper slopes.

One of the study's results is the creation of a susceptibility landslide map of the territory at the regional level for the Rzhyschiv United Territorial Community of the Kyiv Region. Eight factors that affect the development of landslides or can be defined as indicators of landslide processes were selected for this analysis.

In the Kyiv region, landslides manifest in various characteristics and stages of development. The severity of landslide development intensifies under conditions of high relief energy, steep and high slopes, fluctuating reservoir levels, and proximity to sub-parallel faults. The hydrometeorological factor significantly triggered the heightened landslide activity in 2013, particularly excessive precipitation and soil oversaturation. Vegetation, notably trees, conceals a substantial portion of the right bank of the Kaniv Reservoir, rendering stabilised landslide bodies invisible on optical images. Vertical walls of landslides with outcrops are only visible from lower terraces or floodplains. Our study leveraged remote sensing data to depart from conventional landslide research methods. This data offers a unique advantage regarding remote accessibility, observation visibility, and the ability to monitor geological processes with high periodicity, thereby enhancing our understanding of landslide activity.

The dissertation developed an algorithm and described the technique for creating a landslide susceptibility map using the hierarchy analysis method, which is the final stage of the developed methodology for remote geoecological monitoring of landslides, applied to the right bank of the Kaniv Reservoir in the Vytachiv-Stayka region. In general, the technique is based on algorithms for obtaining data, the main one being the algorithm for creating a mapping scheme of vertical displacements of the earth's surface using radar interferometry.

The analytic hierarchy process (AHP), a well-established approach introduced by Saaty in 1980, was used to determine the factors' relative weight. This method allowed us to establish the priority of factors and subfactors that cause landslides on the right bank of the Kaniv Reservoir. The factors found to be significant for assessing landslide hazards as indicators grouped according to the genesis or the method of obtaining information.

Our team of experts, who used a nine-point ordinal «relative importance» scale, carried out the pairwise comparisons, which were crucial in this process.

The AHP tool in our study enables us to construct an objective function and evaluate the influence of each system characteristic. The analysis of factors affecting landslides is a step-by-step process involving the development of a hierarchical structure, binary comparisons of criteria, establishment of a comparative matrix, calculation of priority vectors, evaluation of the consistency index, creation of a table of importance, and final decision making based on a generalised criterion.

Using the AHP, we determined two potential scenarios for the study area: stable and unstable. We also created maps of the area's susceptibility to landslides under these conditions. Our findings revealed that vertical displacements, slope steepness, lithology, and soil moisture are the most influential factors in landslide activation. Using maps of base surfaces and lineament density, we also identified the zones at the highest risk for new landslide formation. Interestingly, the biophysical parameters of the study area allowed us to identify regions unaffected by landslides, underscoring the practical value of our research.

The result is significant as it clearly explains the varying susceptibility of different areas in the studied region to developing landslide processes. This understanding is crucial as it helps us identify the areas with the greatest threats, thereby paving the way for the rational adoption of management decisions.

One of the meticulous stages in the method of remote geoecological monitoring involves conducting field research at nine carefully selected test sites. Here, we observe manifestations of exogenous geological processes, such as landslides and erosion, which significantly impact the topography of the slopes. We also study the influence of natural factors, such as precipitation, water flows, and wind, which are common in the study area. To ensure the accuracy of our findings, we chose control plots that serve as ideal examples for measuring the stable level of the Earth's surface. These plots are untouched by agriculture, remain unprocessed, and are free from anthropogenic influence, ensuring their relief remains unchanged.

The thesis delves into the region's current geocological issues, investigating the factors that trigger the formation or stabilisation of landslides. It introduces a novel technique for remote geocological monitoring of landslides, enabling the analysis of the present state and prediction of landslide development in a specific area. This innovative approach is founded on using remote sensing data and geoinformation systems. The application of up-to-date remote sensing data processing and analysis technologies facilitates the efficient identification of potential landslide risk regions and their environmental impact.

The author meticulously analyzed and substantiated the factors that trigger landslide activity. This comprehensive study led to constructing a susceptibility map of the region to landslides and subsequently dividing the area into classes based on the degree of susceptibility to landslide processes.

Remote geocological monitoring technique of landslides consists of the following stages:

- determination of the potential risk of danger - identification of the area's most susceptible to landslides;
- determination of the structural features of the study area - the main characteristics of the structure, including geological formations and natural landscape complexes;
- determination of the topographic features of the study area - the relief of the territory, including the difference in heights, the presence of reservoirs, valleys, ravines and streams;
- creating a map of the territory's susceptibility to landslides, analysing the geological structure of the study area and its topographic and biophysical properties to determine the degree of susceptibility to landslides; analysing the reliability of the constructed susceptibility map using the available information of the study region.

Scientific novelty

Remote geocological monitoring technique for landslide processes was developed **for the first time** based on radar interferometry data and the analysis of geological, geomorphological, and biophysical factors. This technique differs from the known ones

by a new quantitative ranking of landslide hazard factors and provides more reliable and prompt detection and mapping of landslide processes.

For the first time, a landslide susceptibility map of the territory of the right bank of the Kaniv Reservoir within the boundaries of the Rzhyschiv United Territorial Community of the Kyiv Region in the Vytachiv-Stajky region was created, which is based on the determination of the localisation of active landslide regions based on the results of a complex analysis of radar interferometry data, optical remote sensing data, geological, geomorphological and biophysical features of the landscape, which allowed to identify and confirm additional, previously unmapped landslide-prone areas by field research.

The local landslide hazard prediction technique **was further developed**, which made it possible to consider additional signs of these processes, identify potentially active landslide areas within the study area based on modern remote sensing data methods, and propose preventive measures.

According to thesis materials 13 works were published, in particular: 1 chapter in a monograph (indexed in the Web of Science database); articles in scientific publications included on the date of publication in the List of scientific specialized publications of Ukraine 5 (of which 2 are indexed in the Web of Science and Scopus databases); 7 in collections and abstracts of reports of domestic and international conferences, of which 7 are international, indexed in the Scopus database. In addition, 5 materials from all Ukrainian and international conferences (in Ukraine) are presented as materials for the approbation of the results obtained in the dissertation work.

Keywords: landslides, remote sensing data, radar interferometry, landslide susceptibility mapping.

Список публікацій за темою дисертації

Матеріали, опубліковані в періодичних виданнях:

1. Орленко Т. (2023) Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні правобережжя Канівського водосховища. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(103), 5-13. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.103.01>
2. Орленко Т. (2023) Методика дистанційного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні за даними радарної інтерферометрії. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10(3), 16– 20. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.247>
3. Орленко Т.А., Седлєрова О.В., Лубський М.С., Голубов С.І., Хижняк А.В. (2023) Картування зсувонебезпечних районів із застосуванням методу аналізу ієрархій на прикладі правобережжя Канівського водосховища. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10(4), 17- 21. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.4.251> (Особистий внесок: обробка та аналіз дистанційних даних, підготовка топографічних, морфометричних та літологічних даних, застосування геоінформаційних методів дослідження, проведення експериментальних досліджень).
4. Лялько В.І., Дугін С.С., Сибірцева О.М., Дорофєй Є.М., Голубов С.І., Орленко Т.А. (2023) Про можливості визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі. *Геологічний журнал*. 4 (385), 61–78. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929> (Особистий внесок: розрахунок вегетаційних індексів для ділянки дослідження за супутниковими даними, з використанням хмарного сервісу Google Earth Engine).
5. Лубський М. С., Орленко Т. А., Пєстова І. О., Андрєєв А. А., Лисенко А. Р. (2023) Оцінка індикаторів опустелювання регіону Олешківські піски за довготривалими часовими рядами даних супутникового знімання Landsat. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10(1), 17– 28. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.1.229> (Особистий внесок: відбір індикаторів вологи

земного покриву, опис доцільності застосування даних дистанційного зондування Землі, розрахунок вегетаційних та водних індексів, побудова картографічного матеріалу, статистична обробка даних).

Апробація матеріалів дисертації:

6. Kril, T. and Orlenko, T. (2022) Surface Dynamics Assessment as a landslide hazard factor by Remote Sensing Data. Conference Proceedings *16th International Conference Monitoring of Geological*, Nov 2022, Volume 2022, 1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580246> (Особистий внесок: оцифрування картографічних матеріалів геологічного стану території, дешифрування та картування ділянок зсувів ґрунтових товщ, побудова карто-схеми вертикальних зміщень)

7. Orlenko, T., Tomchenko, O., Lischenko, L., Sedlerova, O. (2023) Landslide Hazard Assessment Using Radar Data in the Staiky, Rzhyschiv Urban Hromada Ukraine. Conference Proceedings *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, Sep 2023, Volume 2023, 1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500027> (Особистий внесок: оброблення та аналіз отриманих результатів даних дистанційного зондування, у тому числі радарної інтерферометричної зйомки, розрахунок та створення карто-схеми зсувів)

8. Piestova, I., Dugin, S., Orlenko, T. and Svideniuk, M. (2020) Assessing and forecasting landslide hazards of the Right Bank of the Kanev reservoir based on radar remote sensing data with corner reflectors using. Conference Proceedings, *XIV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*, Nov 2020, Volume 2020, 1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056082> (Особистий внесок: інтерпретація результатів польових досліджень, опис геологічного стану досліджуваної ділянки, написання висновків)

9. Lubskyi, M., Orlenko, T., Piestova, I., Lysenko, A., Andreiev, A. et al. (2022) Using Landsat satellite time series for desertification processes mapping: Case study for Oleshky sands, Ukraine. Conference Proceedings *16th International Conference*

Monitoring of Geological, Nov 2022, Volume 2022, 1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580194> (Особистий внесок: відбір індикаторів вологи земного покриття, розрахунок вегетаційних та водних індексів, побудова картографічного матеріалу)

10. Yelistratova, L., Apostolov, A., Romanciuc, I., Orlenko, T., Tymchyshyn, M. et al. (2021) Application of remote sensing data for detection the landslide areas in Ukraine, Conference Proceedings *Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*, Sep 2021, Volume 2021, p.1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215k1017> (Особистий внесок – обробка супутникових даних, застосування методики радарної інтерферометрії)

Праці, що додатково розкривають зміст дисертаційної роботи:

11. Khodorovskyi, A.Y., Apostolov, A.A., Yelistratova, L.A., Orlenko, T.A. (2023) Study on Irrigated and Nonirrigated Lands in Ukraine Under Climate Change Based on Remote Sensing Data. In: Pande, C.B., Moharir, K.N., Singh, S.K., Pham, Q.B., Elbeltagi, A. (eds) *Climate Change Impacts on Natural Resources, Ecosystems and Agricultural Systems*. Springer Climate. Springer, Cham, 391–411. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19059-9_15 (Особистий внесок: обробка супутникових даних, застосування методики радарної інтерферометрії, побудова картографічного матеріалу).

12. Alexander Apostolov, Lesya Yelistratova, Artur Hodorovsky, Tetiana Orlenko, Maksym Tymchyshyn (2023) Geo-ecological consequences of the closure of coal mines of Donbas (based on radio-location satellite surveying materials), *SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Conference Proceedings*. 23(2.1), 1-8. <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s10.37> (Особистий внесок: розрахунок радарної інтерферометрії за даними супутника Sentinel-1, формування результуючої карти зміщень земної поверхні).

13. Khodorovskyi, A. Y., Apostolov, A. A., Yelistratova, L. A., Orlenko, T. A. (2023) Satellite-based technology assessing Ukraine's ecology under the War. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1254(1), 012115, 1-10.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012115> (Особистий внесок: побудова картографічного матеріалу).

14. Орленко Т.А., Гусєва А.В. (2019) Лінеаментний аналіз території в межах функціонування гірничовидобувного підприємства з використанням даних ДЗЗ. *Ідеї та інновації в системі наук про Землю. Матеріали VIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції*, Київ, 10-12 квітня 2019 р., 56-57. Retrieved from: http://gc.igs-nas.org.ua/wp-content/uploads/2019/04/ZB_2019.pdf (Особистий внесок: автор ідеї, застосування методики лінеаментного аналізу, побудова картографічного матеріалу, тематична інтерпретація отриманих результатів).

15. Orlenko T.A. (2020) Landslide detection and mapping by geological and remote sensing data. *Сучасні проблеми гірничої геології та геоекології: Міжнародна наукова конференція*, Київ, 2020, 71-72. Retrieved from: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=108011581181107&set=pcb.108011374514461>

16. Орленко Т.А. (2020) Дослідження зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища. *XXII Міжнародна наукова конференція Астрономічна школа молодих вчених*, Україна, Київ. 1, 50-51. Retrieved from: <http://astro.nau.edu.ua/uk/school/2020.html>

17. Орленко Т.А. (2021) Супутниковий моніторинг зсувної активності Правобережжя Канівського водосховища. *Екологічна безпека держави: XV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів*, 1, 85-86. Retrieved from: <https://febit.nau.edu.ua/kafedry/kafedra-ekolohii/vseukrainska-naukovo-praktychna-konferentsiia-molodykh-uchenykh-i-studentiv-ekolohichna-bezpeka-derzhavy/>

18. Orlenko T.A. (2022) Використання супутникової радіолокаційної інтерферометрії для оцінки небезпеки зсувної активності. *Ідеї та новації в системі наук про Землю: Збірник матеріалів IX Всеукраїнської молодіжної наукової конференції*, Київ, 50-51. Retrieved from: <http://gc.igs-nas.org.ua>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	24
ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 Теоретичні засади дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів.....	32
1.1 Загальна характеристика та класифікація зсувних процесів.....	32
1.2 Поширення зсувних процесів в межах території України.....	37
1.2.1 Поширення зсувів за даними інженерно-геологічного та геоструктурного районування.....	37
1.2.2 Поширення зсувів за даними фізико-географічного районування.....	38
1.3 Активність зсувних процесів на території Київської області та правобережжя Канівського водосховища.....	40
1.4 Чинники та фактори впливу на зсувні деформації схилів.....	43
1.5 Вплив екзогенних процесів на формування зсувів.....	46
1.6 Методи дослідження зсувних процесів.....	48
1.6.1 Послідовність дослідження зсувів стаціонарними методами.....	49
1.6.2 Дослідження зсувів з використанням методів та засобів дистанційного зондування Землі.....	50
1.7 Основні методи боротьби із зсувами.....	52
1.8 Постановка завдання дослідження.....	53
Висновки до першого розділу.....	56
Список використаних джерел до першого розділу.....	57
РОЗДІЛ 2 Вплив геолого-географічних та кліматичних факторів на зсувні процеси правобережжя Канівського водосховища.....	62
2.1 Геолого-геоморфологічні особливості будови правого берега Канівського водосховища.....	64
2.2 Інженерно-геологічна будова території правобережжя Канівського водосховища.....	68

2.3 Гідрогеологічні умови формування зсувів на території правобережжя Канівського водосховища.....	75
2.4 Ґрунтовий покрив території дослідження.....	77
2.5 Аналіз впливу кліматичних умов на вологість ґрунтів та зсувні процеси.....	78
Висновки до другого розділу.....	81
Список використаних джерел до другого розділу.....	82
РОЗДІЛ 3 Методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища	87
3.1 Алгоритм розрахунку вертикальних зміщень земної поверхні за методом радарної інтерферометрії.....	87
3.2 Аналіз геолого-геоморфологічних факторів активізації зсувних процесів.....	92
3.3 Аналіз біофізичних факторів активізації зсувних процесів за даними дистанційного зондування Землі.....	98
3.4 Застосування методу аналізу ієрархій при створенні карти сприйнятливості території до зсувів.....	101
3.5 Підходи до проведення польових досліджень.....	105
3.6 Розробка загальної методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища.....	107
Висновки до третього розділу.....	110
Список використаних джерел до третього розділу.....	112
РОЗДІЛ 4 Перевірка розробленої методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища та рекомендації щодо її застосування.....	118
4.1 Результати польових досліджень.....	118
4.2 Результати застосування методу радарної інтерферометрії.....	124
4.3 Результати визначення зон активізації зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища.....	129

4.4 Результати аналізу геолого-геоморфологічних факторів активізації зсувних процесів.....	131
4.5 Результати аналізу біофізичних факторів активізації зсувних процесів за даними дистанційного зондування Землі.....	136
4.6 Результати застосування методу аналізу ієрархій.....	139
4.7 Результати розробленої методики створення карти сприйнятливості території до зсувів.....	146
4.8 Оцінка точності та достовірності розробленої методики.....	151
4.9 Рекомендації щодо застосування методики.....	156
Висновки до четвертого розділу.....	158
Список використаних джерел до четвертого розділу.....	160
ВИСНОВКИ.....	161
ДОДАТКИ.....	163
ДОДАТОК А.....	164
ДОДАТОК Б.....	167
ДОДАТОК В.....	168
ДОДАТОК Г.....	173
ДОДАТОК Д.....	174
ДОДАТОК Е.....	178
ДОДАТОК Ж.....	179
ДОДАТОК З.....	182

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГІС	геоінформаційні системи
ДЗЗ	дистанційне зондування Землі
ЕГП	екзогенні геологічні процеси
КА	космічний апарат
КЗ	космічний знімок
МАІ	метод аналізу ієрархій
ОТГ	об'єднана територіальна громада
ЦМР	цифрова модель рельєфу
АНР	Analytic Hierarchy Process
ArcGIS Pro	Premier desktop geographic information system application
DEM	Digital Elevation Model
DinSAR	Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
GEE	Google Earth Engine
LOS	line of sight
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLC	Single Look Complex
SNAP	Sentinel Applications Platform
SSM	Surface soil moisture
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню актуального наукового завдання – створенню та науковому обґрунтуванню методики дистанційного геоекологічного моніторингу та прогнозування зсувних процесів у межах правобережжя Канівського водосховища із комплексуванням різномасштабних гетерогенних даних дистанційного зондування Землі та даних, отриманих кліматичними, геологічними, геоморфологічними методами.

Києво-Стайківський зсувний район характеризується широким розвитком зсувів різних типів, що негативно впливає на функціонування інфраструктурних об'єктів, розвиток громад, економічне освоєння територій. Активізація гравітаційних зсувних процесів даної території відбувається за рахунок перезволоження лесових та глинистих ґрунтів, значного перепаду висот, зміни базису ерозії, абразійних процесів на берегах Канівського водосховища та антропогенного навантаження, спричиненого господарською діяльністю Ржищівської ОТГ.

Спостереження зсувів, фіксація їх розвитку у просторі та часі, аналіз чинників, що впливають на розвиток зсувних процесів, прогнозування зсувної небезпечності стають актуальними при плануванні діяльності та розвитку територіальних громад. Важливим при спостереженні за станом території є охоплення значної площі при можливості здійснювати оперативну кількісну і якісну оцінку.

В дослідженні розглядається комплексний дистанційний геоекологічний моніторинг зсувних процесів з використанням космічних знімків радарного супутника з синтезованою апертурою Sentinel-1, просторовою розрізненністю 10 м, даних супутника Landsat – 8, просторовою розрізненністю 30 м та використанням інформаційних продуктів, отриманих при обробці даних дистанційного зондування Землі.

На основі аналізу геологічних чинників, результатів обробки радарних даних за багаторічний весняний період та факторів впливу на вологість ґрунтів досліджуваної території – температури повітря, кількості опадів та супутнього антропогенного навантаження визначено ділянки активізації зсувів. Надано оцінку кожного фактору та зведено їх значення у комплексний показник ймовірності розвитку зсувних процесів.

Результати, що отримані в процесі дослідження можуть використовуватися для прогнозування зсувної небезпеки, завчасного попередження зсувів при розробці протизсувних заходів.

Отже, *актуальним науковим завданням* є розробка методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувонебезпечних схилів та створення алгоритму прогнозування виникнення нових або активізації стабілізованих зсувів за допомогою методів дистанційного зондування Землі, зокрема, з використанням радарних даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень, що проводились у Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» за такими темами: «Розробка теоретико-методичних основ використання матеріалів космічних і полігонних спектро- та газометричних зйомок для забезпечення раціонального природокористування в умовах сталого розвитку суспільства» (державний реєстраційний номер 0116U003032); «Уточнення впливу кліматичних змін на довкілля і соціо-економічний стан сталого розвитку в Україні та розробка рекомендацій по мінімізації негативних наслідків цього впливу на основі матеріалів аерокосмічних зйомок та полігонних досліджень» (державний реєстраційний номер 0121U100410); «Дистанційні методи виявлення та аналізу розвитку загрозливих природних та природно-техногенних процесів та явищ в задачах геоінформаційного забезпечення прийняття управлінських рішень щодо сталого розвитку територій» (державний реєстраційний номер 0122U002085); «Методика оцінювання динаміки опустелювання на основі даних супутникового

знімання на прикладі піщаного масиву «Олешківські піски»» (державний реєстраційний номер 0121U111862).

Мета і завдання дисертаційного дослідження: *Метою дисертаційної роботи є підвищення оперативності та достовірності прогнозування виникнення нових або активізації стабілізованих зсувів шляхом розробки методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувонебезпечних схилів та створення алгоритму прогнозування на основі комплексного аналізу даних радарної інтерферометрії, супутникового оптичного знімання, наземних кліматологічних, літологічних, ландшафтних даних.*

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз досвіду вивчення процесів зсувоутворення на правобережжі Канівського водосховища за історичними та дистанційними даними, встановлення статистичної активізації або затухання цих процесів;
- проаналізувати тектонічну будову, неотектонічну активність, пов'язану з ландшафтоутворюючим впливом Канівського водосховища на правому березі та визначити локальні геологічні, геоморфологічні, біофізичні, та структурні фактори, що обумовлюють активізацію зсувного процесу;
- з використанням радарних даних побудувати карту вертикальних зміщень досліджуваної території;
- з використанням даних дистанційного зондування Землі створити карту сприйнятливості території до зсувів;
- провести валідацію методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів на дослідному полігоні, одержати точні координати зсувів;
- надати рекомендації щодо застосування методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів.

Об'єкт дослідження: фактори та чинники зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища.

Предмет дослідження: методи дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів.

Методи дослідження. В процесі розв’язання поставлених задач використовувалися: метод супутникової радарної інтерферометрії – для побудови карто-схеми вертикальних зміщень земної поверхні, дані оптичного дистанційного зондування – для отримання фізичних та біофізичних характеристик стану земної поверхні; лінеаментний аналіз – для створення карто-схеми щільності лінеаментів; структурно-геоморфологічний аналіз – для побудови карто-схеми базисних поверхонь території дослідження, геоінформаційні технології – для обробки, інтерпретації та комплексного аналізу гетерогенних геопросторових даних; метод аналізу ієрархій – для ранжування чинників зсувонебезпеки різної фізичної природи; методи математичної статистики – для обробки отримуваних кількісних вибірок даних та оцінювання їх достовірності.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

Вперше розроблено методику дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів на основі даних радарної інтерферометрії та аналізу геологічних, геоморфологічних та біофізичних факторів, яка відрізняється від відомих новим кількісним ранжуванням чинників зсувонебезпеки та забезпечує більш достовірне та оперативне виявлення і картування зсувних процесів.

Вперше створено карту сприйнятливості до зсувів території правобережжя Канівського водосховища в межах Ржищівської ОТГ на ділянці Витачів-Стайки, яка базується на визначенні локалізації активних зсувних ділянок за результатами комплексного аналізу даних радарної інтерферометрії, оптичного дистанційного зондування, геологічних, геоморфологічних і біофізичних особливостей ландшафту, що дозволило виявити та підтвердити польовими дослідженнями додаткові, не закартовані раніше зсувонебезпечні ділянки.

Набула подальшого розвитку методологія локального прогнозування зсувної небезпеки, що дозволило враховувати додаткові ознаки цих процесів та визначити потенційно активні ділянки зсувів в межах території дослідження на основі сучасних методів дистанційного зондування Землі, а також запропонувати комплекс превентивних заходів щодо їх усунення.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів підтверджується коректним застосуванням сучасних апробованих методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу для дослідження зсувних процесів; узгодженістю розроблених положень дослідження із загальноприйнятими науковими поглядами на природу та чинники активізації зсувів земної поверхні, сумісністю одержуваних результатів з даними польових завіркових досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування розробленої методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів для підвищення інформованості планувальних установ та осіб, що приймають рішення, щодо вживання важливих кроків в управлінні та захисті ґрунтів і природних ресурсів, а також визначення земель, придатних для розширення міст і сіл у межах певної територіальної громади. Укладені карти сприйнятливості території до зсувів можуть бути використані для визначення ймовірних ділянок зсувонебезпеки. Ця інформація є корисною для адміністрації територіальної громади або окремих підприємств, що здійснюють господарську діяльність на зазначеній території.

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що основні результати дисертаційного дослідження отримані здобувачем особисто. Автором проаналізовано методи визначення та оцінки зсувної небезпеки за допомогою застосування радарної супутникової зйомки, розроблено методику комплексного геоекологічного проведення дослідження, яка включає поєднання даних дистанційного зондування та матеріалів наземних завірок.

Проведено комплексні дослідження геологічних умов території, оцінено вплив погодних факторів та обсягів антропогенного впливу на досліджувану ділянку, здійснено аналіз геологічної будови території та розвитку зсувів.

Створено карто-схему вертикальних зміщень та виявлено небезпечні ділянки за величиною обертового переміщення та нахилу поверхні, проаналізовано закономірність вертикальних зміщень та крутизни поверхні правого берега Канівського водосховища. Всі наукові результати дисертаційної роботи викладено

у наукових публікаціях. Серед праць опублікованих у співавторстві внесок здобувача полягає у наступному:

- у роботі [3] на основі обробки та аналізу дистанційних даних, зокрема застосування методики радарної інтерферометрії з метою оцінки динаміки зсувів, обґрунтовано застосування геоінформаційних методів дослідження;
- у роботах [6-8, 10] описано методику укладання карт вертикальних зміщень на базі супутника з синтезованою апертурою Sentinel-1;
- у роботах [4, 5, 9] здійснено відбір індикаторів вологи земного покриву, опис доцільності застосування даних дистанційного зондування Землі, розрахунок вегетаційних та водних індексів, статистична обробка даних;
- у роботах [10, 14] розглянуто, проаналізовано та інтерпретовано неотектонічну складову як фактор впливу та чинник зсувонебезпечності;
- у роботах [11-13] проаналізовано вплив кліматичних змін на сучасні геологічні умови території України.

Апробація результатів. Результати дисертаційних досліджень апробовані на наукових конференціях:

Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities, Львів, Україна, 2023; 23rd SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings, Албена, Болгарія, 2023; International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2023), Кривий Ріг, Україна, 2023; 16th International Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, Київ, Україна, 2022; XIV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, Київ, Україна, 2020; Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, Одеса, Україна, 2021; Ідеї та новації в системі наук про Землю: Матеріали VIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції, Київ, Україна, 2019 та 2022; Сучасні проблеми гірничої геології та геоекології: Міжнародна наукова конференція, Київ, Україна, 2020; XXII Міжнародна наукова конференція, Астрономічна школа молодих вчених, Київ, Україна, 2020; Екологічна безпека

держави: XV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів, Київ, Україна, 2021.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 1 глава у монографії (проіндексована в базі даних Web of Science); статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до Переліку наукових фахових видань України – 5 (з них 2 проіндексовані в базах даних Web of Science та Scopus); 7 – у збірниках та матеріалах тез доповідей вітчизняних та міжнародних конференцій, з яких 7 – міжнародні, що проіндексовані в базі даних Scopus. Додатково представлено 5 матеріалів всеукраїнських та міжнародних конференцій (в Україні) як матеріали апробації результатів, отриманих в дисертаційній роботі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури (156 найменувань на 19 сторінках) та 8 додатків на 22 сторінках. Робота викладена на 185 сторінках, що містять 108 сторінок основного тексту, 50 рисунків і 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЗСУВІВ

Усі явища та процеси, що відбуваються на земній поверхні тісно пов'язані між собою. Землі властиві внутрішні та зовнішні планетарні геологічні процеси, які упродовж всього геологічного розвитку планети призводять до її змінення. Швидкість та масштаби геологічних процесів змінюються у часі та просторі під впливом, в тому числі кліматичних змін (*Лялько та ін., 2015; Abbass et al., 2022*). Зміни поділяються на тривалі та миттєві, які спричиняють катастрофічні явища, зокрема зсуви. Важливою складовою геоекологічних досліджень є моніторинг зсувних процесів (*Scaioni et al., 2014; Macciotta and Hendry, 2021; Zhao and Lu, 2018*) з використанням даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Дослідження зсувних процесів в режимі дистанційного геоекологічного моніторингу з використанням супутникової радіолокаційної інтерферометрії надають можливість оперативно, на великих площах, з досить високою точністю та мінімальними економічними витратами розв'язувати задачі природоохоронного напрямку для забезпечення сталого розвитку довкілля та суспільства.

1.1 Загальна характеристика та класифікація зсувних процесів

Зсуви – це один із видів зміщень гірських порід на схилах, що виникають внаслідок порушення стійкості схилів (*Палієнко 2010*). Схили можуть бути як природними, тобто схили гір, так і штучними, тобто борти кар'єрів та водосховищ. Зсуви поділяються на природні зсуви та природно-техногенні, спричинені антропогенним впливом. (*Лялько та ін., 2017*). В основі зсувного тіла переважають незмінні або слабко змінні елементи сформованого геологічного комплексу схилу, частина його корінного масиву або елювіальний покрив.

Зсуви виникають внаслідок втрати рівноваги ґрунтами та підстилаючими породами (*Суярко, Величко та ін. 2019*). Причиною описаного вище явища може бути перезволоження зсувних ділянок та зменшення міцності ґрунтоутворюючих

порід. Об'єм ґрунту, який зміщується під час зсуву, може становити від декількох сотень до тисяч мільйонів кубометрів, швидкість зсуву (*Highland, Bobrowsky 2008*) сягає від декількох метрів на рік до декількох метрів на секунду.

Отже, зсув ґрунту – це зміщення похилої площини маси породи та органічних речовин з вершини або схилу під дією сили тяжіння, що призводить до ландшафтних змін. На території України розповсюджені нестійкі, лесові породи, які під дією навантаження при замочуванні зазнають деформації, що сприяє розвитку зсувних процесів. У сухому стані лесоподібні суглинки (*Шутенко та ін. 2017*) та супіски мають велику міцність, проте при перезволоженні втрачають значну частину цієї міцності. Водні горизонти руйнують зчеплення часток та пористу структуру лесових відкладів, внаслідок чого ці породи найбільше піддаються деформації (*Карпов, 2023*). Ці процеси викликають розбалансованість схилу та сприяють активізації зсувів.

Активний розвиток зсувів відмічено на території майже всіх адміністративних областей України, за винятком Волинської та Рівненської, які не мають геологічних та геоморфологічних передумов для розвитку зсувів. Найбільшу кількість зсувів зафіксовано на Правобережжі Дніпра, в тому числі Канівського та в минулому Каховського водосховищ.

За даними Державної служби геології та надр України зсуви поширені на Чорноморському узбережжі, в Одеській області та на території півострова Крим (*"Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів", 2017; "Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів", 2021*). Зсуви розповсюджені майже у 200 містах та селищах міського типу, що постійно створює загрозу виникнення надзвичайних ситуацій та небезпеки для здоров'я і життя людей.

Інтенсифікація зсувних процесів на правому березі Дніпра в межах Канівського водосховища обумовлена здебільшого геологічними умовами території, складеної водотривкими та водоносними породами, що чергуються. Зсувними процесами може бути охоплено весь схил або тільки його частина. У верхній частині схилу розрізняють круті увігнуті стінки відриву зсувних тіл, рівну

частину схилу за якою він рухається, ложе зсуву та переміщені гірські породи (рис. 1.1). Чим більша крутизна корінного схилу, тим швидше рухається його тіло (Коржнев 2005, Ковальчук 2018). Загальна структура зсуву може відрізнятися, але згори вона обмежена нерівною, горбистою площиною, нахиленою в бік схилу та фронтальною частиною у вигляді горбистого схилу за напрямком руху зсувної маси.



Фото та позначення: Орленко Тетяна

Рис. 1.1. Схема опису основних елементів зсуву на схилах Канівського водосховища, вигляд збоку: 1-тріщина відриву, 2-брівка головного уступу, 3-головний уступ, 4-лівий фланг зсуву, 5-тіло зсуву

Важливим аспектом геологічної науки, що вивчає явища та процеси пов'язані з переміщенням земної кори, є вивчення зсувів. Багато вчених надають значну увагу класифікації типів зсувів (Байрак, 2018; Беспалова, 2010; Пазинич, 2017; Іваннік, 2022) та розумінню механізму їх утворення та активізації. В роботах науковців ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» закладено основи супутникового моніторингу зсувонебезпечних територій на базі ГІС-технологій (Філіпович та ін. 2019, Ліщенко та ін. 2017).

Важливим аспектом досліджень є вивчення конкретних регіонів, де зафіксовано найбільшу кількість зсувів. В регіоні Середнього Придніпров'я

дослідження таких вчених як Краєв, Демчишин, Беспалова (Краєв, 1961; Демчишин 1992; Демчишин, Беспалова 1987; Демчишин та ін. 2014) надали розгорнуту інформацію про стан зсувів цієї території та є основою розроблених стратегій мінімізації ризику для місцевого населення.

Основними характеристиками зсуву є: глибина зсуву, спосіб руху маси ґрунту, товщина шару порід, що зсуваються, часовий та просторовий масштаб зсуву. Класифікація зсувів є важливим інструментом для прогнозування ризику та попередження природних катастроф, пов'язаних з цим явищами та наведена в табл. 1.1. Важливим фактором для класифікації зсувів є геологічні умови його утворення та активізації, включно з зсувами, які захоплюють корінні породи, та зсувами поверхневих відкладів.

За доопрацьованими матеріалами дослідження Беспалової О.М. та Байрак Г.М. дисертантом зроблено висновок, що правобережжя Канівського водосховища уражене зсувними системами двох типів:

- I тип характерний для ділянок з повним геологічним розрізом. А саме, геологічний розріз представлений (зверху вниз) лесовидними суглинками четвертинного віку, неогеново-нижньочетвертинними бурими й червоно-бурими глинами, строкатими глинами неогену, пісками новопетровської світи неогену, берекської та межигірської світ, алевроитами обухівської світи та глинами і мергелями київської світи палеогену. Також спостерігається підвищене гіпсометричне положення мергельної товщі. Зсувний процес широко розвинений і представлений декількома видами – переважно циркоподібними структурними зсувами видавлювання, у верхній частині схилу, які переходять у пластичні зсуви.

- II тип характерний для ділянок з неповним геологічним розрізом, а саме, спостерігається випадіння з розрізу відкладів бурих та строкатих глин та пісків неоген-палеогенового віку. При номінальній потужності лесового горизонту менше ніж 10,5 м формуються фронтальні зсуви з площиною ковзання в нижній частині схилу по глинистих алевроитах обухівської світи, глинах і мергелях київської світи.

Класифікація типів зсувів

Класифікація зсувів		Джерело
Тип зсувів	Особливості утворення зсувного процесу	
За особливостями процесу зміщення		
Детрузивні зсуви	відбуваються під тиском, або шляхом штовхання блоків, що відірвані від схилу, частин зсуву які розміщені нижче рух маси гірської породи починається з верхньої частини схилу	Попов І.В., 1961
Деляпсивні зсуви	вільне ковзання гірських порід спричинене дією власної ваги зі збереженням у зсувному тілі послідовності залягання шарів та утворенням порожнин рух маси гірської породи починається у нижній частині схилу	
За формою		
Циркоподібні	головний та внутрішній уступи формують півколо, довжина якого вздовж схилу умовно дорівнює ширині	Підручник Суярко, 2019
Фронтальні	головний уступ має витягнуту форму вздовж схилу зі значною відстанню	
Зсуви-потоки	витягнуті уздовж зниження в напрямку падіння схилу	
За глибиною захоплення поверхні ковзання		
Поверхневі	довжиною до 1 м	Solodei et al., 2022
Дрібні	довжиною менше 5 м	
Глибокі	менше за 20 м	
Дуже глибокі	перевищують 20 м	
За часом виникнення		
Сучасні	активні, тимчасово стабілізовані, стабілізовані або повністю стабілізовані	Байрак, 2018
Давні	відкриті та поховані	
За будовою		
Асеквентні	мають увігнуту поверхню ковзання в однорідних нешаруватих товщах	Саваренский Ф.П., 1962
За будовою		
Консеквентні	відповідають поверхні ковзання яка співпадає зі структурною поверхнею	Саваренский Ф.П., 1962
Інсеквентні	поверхня ковзання формується впоперек структурних поверхонь	
За особливостями зони деформації та руху зсувного тіла		
Зсуви ковзання або структурні	зрушення покривних відкладів відбувається вздовж корінних порід, неміцних прошарків, площини напластування та зісковзування невірноважених ґрунтових мас вниз по схилу	Посібник Угнетенко, 2019
Зсуви-потоки та спливи	зміщення відбуваються у водонасичених розріджених глинистих, лесових та уламково-глинистих мас уздовж схилу	
Складні	зсуви великих об'ємів, формуються під дією багатьох чинників та мають складну будову	

1.2 Поширення зсувних процесів в межах території України

Поширення зсувних процесів залежить від геологічної будови, характеристики морфоструктурних, структурно-геологічних, ландшафтно-кліматичних, морфометричних, гідрогеологічних характеристик території, а також наявності активних сейсмічних та неотектонічних процесів.

1.2.1 Поширення зсувів за даними інженерно-геологічного та геоструктурного районування

На території України виділяють 9 інженерно-геологічних регіонів: 5 у південно-західній частині Східноєвропейської платформи та 4 – у межах Альпійської складчастості (рис. 1.2).

В геоструктурному відношенні територія Середнього Придніпров'я знаходиться в зоні зчленування північно-східного схилу Українського щита з Дніпровсько-Донецькою западиною (Snitynskiy et al., 2020).

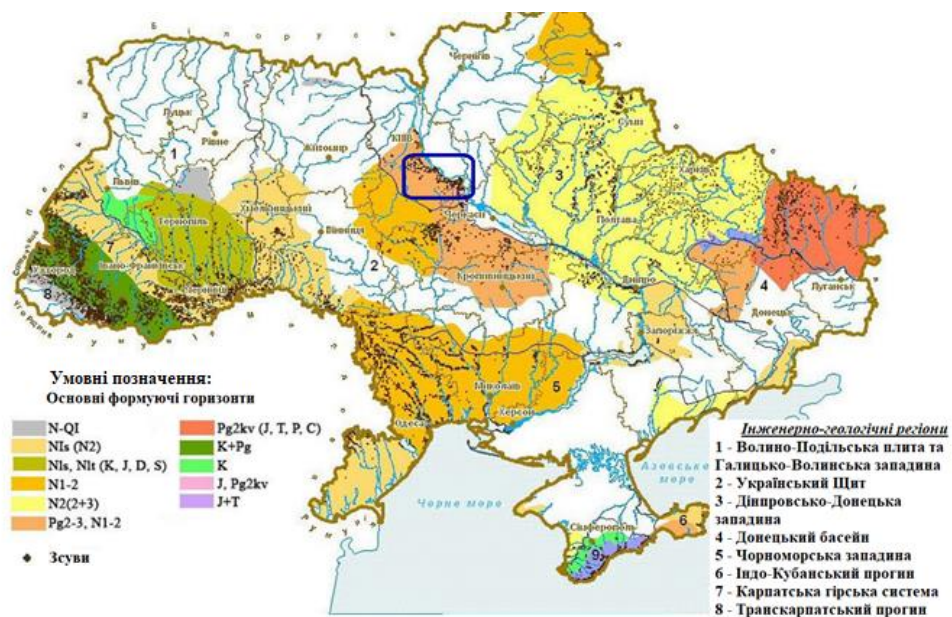


Рис. 1.2. Поширення зсувів на території України, синім контуром виділено територію дослідження (Snitynskiy et al., 2020)

Геологічна будова досліджуваної ділянки приводиться до рівня місцевого базису ерозії, який контролюється річищем р. Дніпро. Комплекс порід, залучений до активних екзогенних геологічних процесів, складений палеогеновими,

неогеновими, дочетвертинними та четвертинними відкладами. Особливістю рельєфу даної території є суттєвий перепад висот, коливання базису ерозії, кутів нахилу схилів та вплив водосховища.

1.2.2 Поширення зсувів за даними фізико-географічного районування

За даними фізико-географічного районування України правобережжя Канівського водосховища (рис. 1.3) знаходиться в межах Східноєвропейської рівнини, належить до Київської височинної області та включає межі двох районів Васильківсько-Кагарлицького (№ 80) на рис. 1.3 та Букринсько-Канівського (№ 81).

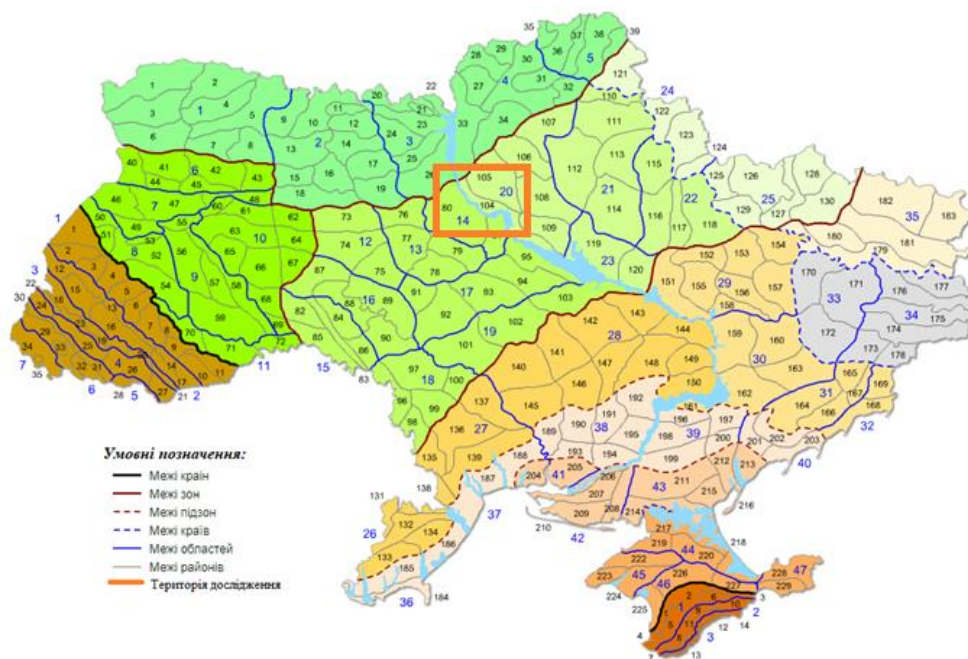


Рис. 1.3. Фізико-географічне районування України (Маринич, 2007)

Згідно з Національною доповіддю про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році від Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України (Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році) причиною збільшення кількості проявів екзогенних геологічних процесів (ЕГП) є підвищене антропогенне навантаження, що призводить до дестабілізації геологічного середовища (Закон України, 1991).

Розвиток ЕГП відбувається у верхній частині літосфери та проявляється як зміна її форми, складу та властивостей. На території України зафіксовано розвиток більш ніж 20 різних видів ЕГП та явищ, серед яких – зсуви, підтоплення, карст, просідання лесових ґрунтів, осідання земної поверхні над гірничими виробками, абразія та переробка берегів водосховищ, ерозія (бічна та яружна), селі (*Bohush-Zadnipyana and Lyashenko, 2023*).

Моніторингові спостереження за розвитком ЕГП та обстеження господарських об'єктів у зоні розвитку небезпечних ЕГП у 2021 р. проводились у 20 адміністративних областях (*Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2021*). У звітному році не проводились роботи в межах Київської, Житомирської, Чернігівської, Херсонської, Кіровоградської областей та АР Крим, на території інших областей роботи проводились в обмеженому обсязі. Сучасна активізація зсувів, що розвиваються на схилах різного генезису пов'язана з проявом супутніх процесів – ерозійного та абразійного, що є чинниками підсилення основного процесу.

За даними моніторингу екзогенних геологічних процесів зафіксовано майже 23 тисячі зсувів на території України, кількість яких може змінюватися внаслідок ліквідації, злиття окремих близько розташованих зсувів чи утворення нових. Загальна площа зсувів становить 2148,17 км².

Збільшенню кількості зсувів сприяє деградація верхньої зони ґрунтів, спричинена техногенними змінами умов дренажу та зниження щільності глинистих товщ і порушенням рівноваги схилових територій. Нові зсуви утворюються внаслідок антропогенного впливу, впливу неотектонічних процесів, перезволоження території та кліматичних змін.

1.3 Активність зсувних процесів на території Київської області та правобережжя Канівського водосховища

В повному обсязі геологічна інформація про активність зсувних процесів на території Київської області та правобережжя Канівського водосховища Дніпра (рис. 1.4) представлена даними Державного інформаційного геологічного фонду України за 2017 рік (*Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2017*).

Зсуви на території Київської області (табл. 1.2) мають значне поширення на правобережжі річки Дніпро, їх загальна кількість 815 одиниць (*Демчишин, 1999, Примушко та ін. 2021*).

Вони займають площу 23,75 км², ураженість території області складає 0,08% від загальної кількості в межах України. Наявність зсувонебезпечних ділянок у межах територіальних громад створює додаткове навантаження на систему управління та прийняття рішень.

Зміна функціонального землекористування, розвиток населених пунктів та безпека життєдіяльності громади залежить від наявності інформації про поширення зсувонебезпечних ділянок, їх активізацію та прогнозування стану території. Карти поширення зсувів на правому березі Канівського водосховища на ділянці Ржищів – Гребені (рис. 1.5) та Гребені-Ходорів (рис. 1.6) у період з 1998 по 2005 рр. (*Кондратюк, 2006*).

В *Додатку А* наведено каталогізовану інформацію про періоди активності чи стабілізації зсувних процесів за 2001-2005 роки правобережжя Канівського водосховища від с. Халеп'я до околиць міста Ржищів.

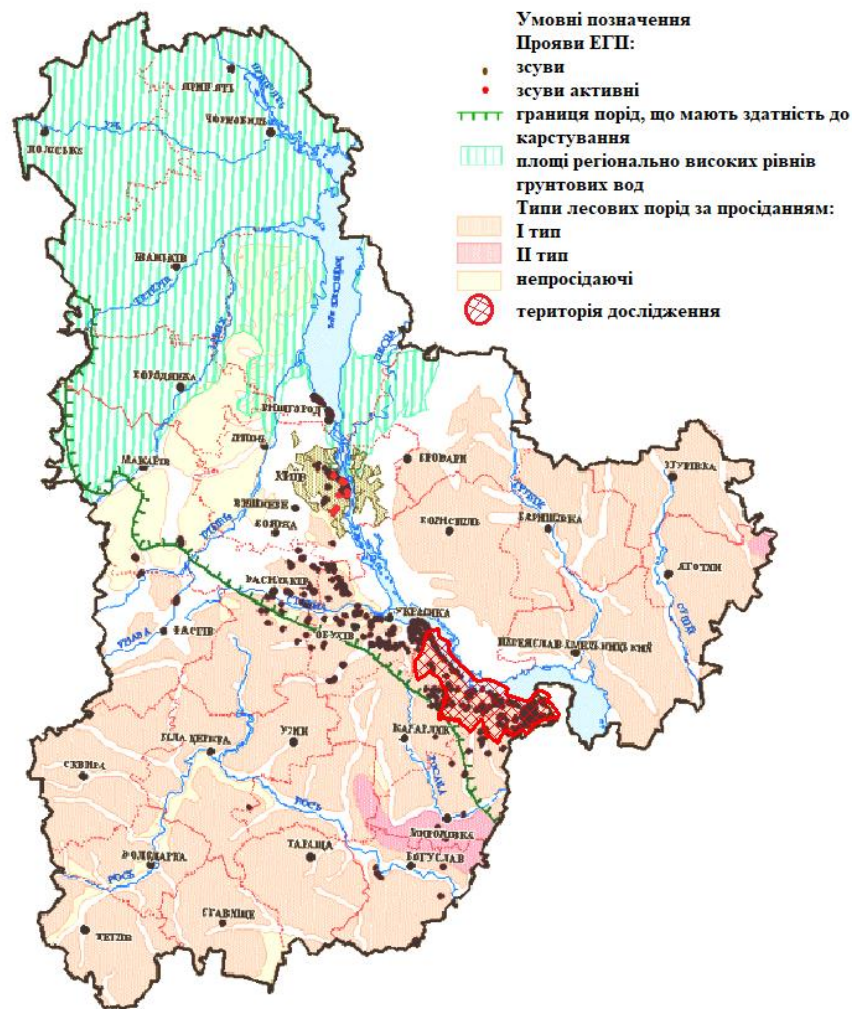


Рис. 1.4. Поширення зсувів на території Київської області та правобережжі Дніпра. Карто-схема інвентаризації зсувів Ржищівської об'єднаної територіальної громади (Інформаційний щорічник, 2017)

Таблиця 1.2.

Поширення екзогенних геологічних процесів на території Київської області та правобережжі Дніпра (Примушко та ін. 2021)

№ з/п	Вид ЕГП	Площа поширення, км ²	Кількість проявів, шт	Ураженість території, %
1	Зсуви	23,75	815	0,08
2	Карст (відклади, що здатні до карстування)	18800	-	65,05
3	Підтоплення	20,78	82	0,07
4	Лесові ґрунти, що здатні до просідання	12470		43,13
5	Переробка берегів: -Київське водосховище -Канівське водосховище	10 пог. км 75 пог. км		



Рис. 1.5. Карта поширення зсувів на правому березі Канівського водосховища на ділянці Ржищів – Гребені (Кондратюк, 2006)

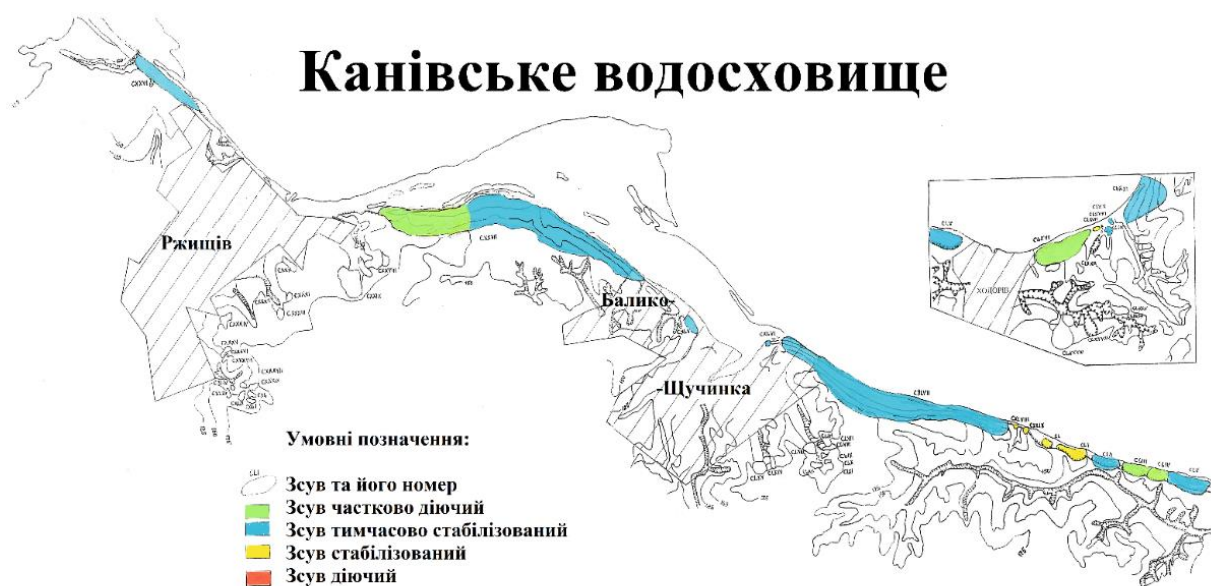


Рис. 1.6. Карта поширення зсувів на правому березі Канівського водосховища на ділянці Гребені-Ходорів (Кондратюк, 2006)

Зсуви є найпоширенішою формою гравітаційного рельєфу на території України. Доцільним є дослідження зсувів на правобережжі Канівського водосховища за схемою:

- аналіз геоморфологічних умов досліджуваної території – крутизни схилу, встановлення процесів, що порушують динамічну рівновагу рельєфу;
- аналіз геологічних умов досліджуваної території – наявність водотривкого шару, що підстеляє водопроникні породи, встановлення напрямку падіння порід;
- аналіз гідрогеологічних умов території – напрямків стоку підземних вод, ступеню зволоження водотривкого шару ґрунту та оцінка підвищення пластичності порід;
- оцінка впливу кліматичних умов – нерівномірне випадіння опадів, наявність паводків на визначеній території.

1.4 Чинники та фактори впливу на зсувні деформації схилів

Зазвичай можна визначити одну або кілька причин зсуву та один тригер зсуву. Результатом аналізу науково-технічної літератури з метою виявлення факторів, що впливають на активізацію зсувних процесів є нижче наведена підсумкова таблиця 1.3, складена автором за матеріалами науковців (*Gnativ et al., 2016; Ivanik et al., 2022; Lee et al., 2014; Іванік, 2020; Stakhov, 2006; Багмет, 2017; Довгий та ін., 2019; Муха, Байрак, 2008; Приходько та ін. 2005; Світличний 2005*), з розподілом загальної кількості факторів характерних для правобережжя Канівського водосховища на природні та техногенні.

Найбільшу небезпеку природні зсуви (*Snitynskyi et al., 2020*) створюють поблизу населених пунктів і в районах з крутими схилами, як правило, при наявності значних опадів або короткочасних сейсмічних впливів. Згідно з Концепцією комплексної програми протизсувних заходів (*Офіційний вебпортал парламенту України, 2002*) за впливом природних та антропогенних чинників на активізацію зсувів зсувонебезпечні території можна поділити на три групи:

- території з переважно природними чинниками утворення та активізації зсувів, до яких належать території з незначним ступенем зміни природних

ландшафтів. Активізація зсувів можлива за умови зміни природних ритмів та внаслідок аномальних природних явищ;

- території з природно-техногенними чинниками утворення та активізації зсувів, де господарська діяльність підсилює дію природних чинників. Природна ритмічність посилення зсувної небезпеки на таких територіях частково порушується несталою в часі дією техногенних чинників;

- території з переважно техногенними чинниками впливу, що провокують виникнення та активізацію зсувів, до яких належать промислово-міські агломерації, гірничодобувні регіони та території, що зазнають інтенсивного антропогенного впливу (в тому числі з регіональним підпором рівнів ґрунтових вод водосховищами).

Природна ритмічність інтенсифікації зсувів на таких територіях значною мірою порушується під дією техногенних чинників. Категорії небезпеки природних зсувів визначаються з огляду на рівень потенційної загрози, яку вони можуть створити для життя, майна та інфраструктури. Зазвичай такі категорії включають різні ступені небезпеки від низького до дуже високого ризику. Основні категорії небезпеки природних зсувів наведено в таблиці 1.4.

Згідно з наведеною вище класифікацією правобережжя Канівського водосховища належить до другої групи територій з природно-техногенними чинниками утворення та активізації зсувних процесів (*Liashenko, 2023*). З метою попередження та ідентифікації ризику небезпечних геологічних процесів необхідним є визначення чинників рельєфоутворення досліджуваної ділянки, встановлення умов розвитку гравітаційних процесів; виявлення факторів впливу, картографування та прогнозування в просторі та часі активізації небезпечних екзогенних процесів.

Природні та техногенні фактори виникнення ЕГП

<i>Природні фактори</i>	
Фактор	Потенційний вплив
Відокремлення від корінного берега значних мас порід	Навантаження прибрювкових частин схилу
Сейсмічний вплив	Підрізання основи стінки відриву або схилу
Вплив підземних та поверхневих вод	Перенасичення водоносних горизонтів та винесення частинок ґрунту порід підземними водами
Вертикальні деформації	Динамічні навантаження
Висота, крутість, форма, гідрологічні умови схилу	Підвищення ризику зсувних процесів
Підвищення кількості опадів	Перезволоження зсувних мас
Коливання температурного режиму	Промерзання ґрунтів та як наслідок просочення надмірної кількості вологи
Вивітрювання	Зменшення щільності вегетаційного покриву на зсувних ділянках
Процеси ерозії та абразії	Загострення розвитку зсувів внаслідок 'накладання' ерозійних процесів на вже сформований механізм
Тектонічні рухи і деформації порід	Розвиток тріщинуватості та водонасиченості порід
Наявність рослинності	Надмірна кількість рослинності може привести або до стабілізації зсуву, або до його раптового зриву через значне підвищення ваги ґрунтової маси. Недостатня кількість рослинності унеможливорює природний процес стабілізації зсувного тіла
<i>Природні фактори</i>	
Фактор	Потенційний вплив
Динамічні дії хвиль	Підвищена активність водосховищ, озер, річок та морів сприяє розмиванню берегів, та збільшенню кількості ЕГП
Набухання порід при гідрації	Пухкі зволожені породи більшою мірою піддаються впливу гравітаційних сил
<i>Техногенні фактори</i>	
Фактор	Потенційний вплив
Будівництво житла та інфраструктурних об'єктів	Відстань від зсувного тіла до населеного пункту
Наявність доріг	Відстань від зсуву до дороги, шосе
Наявність ділянок порушення геологічного середовища	Зміна властивостей, стану та обсягу порід, які складають схил
Наявність промислових об'єктів	Відстань до джерела вібрації, рівень вібрації
Недотримання експлуатаційних вимог водосховищ, водозаборів, каналів тощо	Влаштування на схилах каналів, вирівнювання місцевості, закладення в кар'єрах нестійких укосів, обводнення схилів і укосів шляхом влаштування водосховищ, ставків, надмірного поливання схилів, скидання атмосферних вод і снігу, технічних, господарських, шахтних, дренажних та іригаційних вод
Аварії на водопроводах і каналізаціях	Підземне водонасиченість ґрунтів на схилах
Заповнення ярів та балок слабкими ґрунтами	Деформація ґрунтових мас
Сільськогосподарська діяльність	Випасання худоби та зменшення щільності вегетаційного покриву

Категорії небезпеки природних процесів для зсувів (Ivanik et al., 2019)

Показники, що використовуються при оцінці ступеню небезпеки природного процесу	Категорії небезпеки процесів			
	надзвичайно небезпечні (катастрофічні), 0,5 одиниць	дуже небезпечні 0,3 одиниці	небезпечні 0,2 одиниці	помірно небезпечні 0,1 одиниця
Площадна враженість території, %	більш ніж 30	11-30	1-10	0,1-1
Площа разового прояву на одній ділянці, км ²	1-2	1-0,5	0,01-0,5	менш ніж 0,01
Об'єм захоплених порід при разовому прояві, млн. м ³	10-20	5-10	0,001-5	до 0,001
Повторюваність, од. в рік	0,01-0,1	0,1-0,25	0,25-0,75	1

Зсуви можуть бути віднесені до катастрофічних процесів, оскільки у разі короткого етапу підготовки зсуву, вони утворюються раптово, сповзають з великою швидкістю (до 1 м/хвилину) та є прямою загрозою життя людини, спричиняючи порушення природного середовища та значні матеріальні збитки (Шестопалов та ін. 2011).

1.5 Вплив екзогенних процесів на формування зсувів

У межах правобережжя Канівського водосховища зафіксовано значний розвиток яружної ерозії та зсувів. Порівняно з цим, на пониженому, пласкому рельєфі лівобережжя спостерігається інтенсивне проявлення процесів підтоплення та заболочування. Перед створенням Канівського водосховища ключову роль у ряду екзогенних процесів відігравала ерозійна діяльність (Шнюков, Шестопалов та ін. 1993), тоді як зсувні процеси перебували на етапі затухання та мали незначний ареал поширення.

Серед факторів, що призводять до збільшення зсувних рухів на берегових схилах, слід відмітити ерозійну активність поверхневих водотоків та абразію Канівського водосховища (рис. 1.7). Згідно з картою поширення екзогенних процесів на території правобережжя Канівського водосховища для нього характерними є: ерозійні процеси; зсувні процеси; абразія берегів (поширення переробки берегів водосховищ); суфозійні процеси; підтоплення; заболочування та засолення.

Посиленню впливу ерозійних процесів на території дослідження сприяють загальне тектонічне підняття території, наявність легко розмивних лесових порід у зоні аерації та прошарки глинистих порід у розрізах схилів. Ерозійні процеси розвиваються на ділянках з підвищеним положенням товщі мергелів київської світи (Беспалова, 2001).



Рис. 1.7. Карта поширення екзогенних процесів на території правобережжя Канівського водосховища (Краснов, 2011)

Більшість зсувів, що зустрічаються в ярах в регіоні Трахтемирівського півострову відзначаються характерними ознаками: розвиток в юрських (батських) глинах, розташовані вище базису ерозії, характеризуються малими розмірами та потужністю від 8-10 до 12-14 м, вік зсувів співпадає з віком яружно-балкової мережі (Жирнов, 2012).

Бічна ерозія річки Дніпро та річок його басейну, проявляється у вигляді підмиву правого берега та розмиву берегів паводковими водами. Цей процес значно впливає на розвиток зсувів у нижній частині берегового схилу через розмив та підрізання зсувних накопичень, також вимивання пісків бучацького ярусу, розташованих у підшві мергелів київського віку (Краєв, 1961). Придніпровська смуга лесової рівнини правобережжя розчленована густою розгалуженою мережею

балково-яружних форм, приурочених у своєму розповсюдженні до придолинних ділянок, де ерозійні процеси отримали найбільший розвиток (*Краснов та ін. 2011*). Поверхня схилів розчленована ярами, ускладнена зсувними цирками і окремими зсувами.

Після заповнення Канівського водосховища одним із головних чинників зсувоутворення стала хвильова абразія. В перші роки після заповнення водосховища активізація зсувного процесу відбулася тільки в тих зсувах, які досягли урізу води.

Зсуви стабілізувалися впродовж перших 10 років експлуатації Канівського водосховища (*Федоришин, 2003*). В наступні роки дія процесу абразії на береги водойми спричинила активізацію зсувів-обвалів у нижній частині берегового схилу. Серед основних екзогенних процесів, що впливають на утворення зсувів на території дослідження є: екзогенне розущільнення гірських порід, яке виникає при врізанні молодих ярів у товщу глин палеогенового та юрського періодів; фізичне, хімічне та біологічне вивітрювання глинистих гірських порід; ерозійно-аккумулятивна діяльність яружно-балкових систем.

1.6 Методи дослідження зсувних процесів

Дослідження та прогнозування зсувних процесів передбачає аналіз геологічних, структурно-геоморфологічних та гідрологічних умов. Моніторинг рівня земної поверхні дозволяє виявляти ділянки підвищеної небезпеки та вчасно застосовувати попереджувальні, безпекові заходи. Методи дослідження зсувів розділяють на стаціонарні (наземні) та дистанційні.

Використання сучасних технологій для моніторингу руху земної поверхні дозволяє визначити області найбільш вразливі до зсувів. Аналіз карт є одним з перших кроків у дослідженні зсувів. Необхідні карти включають карти: з геології корінних порід та кайнозойських відкладів, топографії рельєфу, складу ґрунтів та геоморфологічної будови. За геологічними матеріалами можливим є отримання загального уявлення про вразливість території зсувними процесами.

1.6.1 Послідовність дослідження зсувів стаціонарними методами

Геодезичні дослідження зсувів передбачають створення геодезичної основи на зсувонебезпечних ділянках, закріплення цієї основи спеціальними марками та періодичні повторні вимірювання координат і висот геодезичних знаків, визначення меж та об'ємів зсувних мас, визначення величин (*Rudyi, 2020*) сповзання земляних мас в плані та по висоті, швидкості та напрямку зсуву.

Дослідження зсувів відбувається *стаціонарними методами* (*Угнетенко та ін., 2019*) за такою послідовністю:

Етап 1: фіксація зсувних процесів – передбачає визначення параметрів зміщень на зсувному схилі з використанням мережі реперних ділянок на стаціонарних пунктах спостереження. Застосовуючи геологічне обладнання поверхневі та глибинні реperi, цифрові нівеліри для високоточної реєстрації величини зміщень.

Етап 2: вивчення ураженості схилів зсувами – полягає в вимірюванні відстаней між нерухомими реперами та зсувними точками, цей метод визначає лінійну, площинну та загальну ураженість схилу.

Етап 3: спостереження за зміною напруженого стану порід та порогового тиску.

Етап 4: гідрометеорологічний моніторинг – проведення метеорологічних та кліматичних чинників, що впливають на стійкість схилів та їх активізацію, об'єктом досліджень стає узбережжя морів та водосховищ, які розташовані в зоні абразії, яка руйнує підніжжя схилів.

Етап 5: режимні спостереження за підземними водами – вивчення глибини підземних вод, особливостей притоку та відтоку води до зсувного схилу.

Етап 6: спостереження за вологістю ґрунтів – відбір зразків ґрунтів через 15-20 см у розрізах зі спеціально пробурених свердловин. Також застосовуються геофізичні методи вивчення динаміки вологості ґрунтів, проби для яких беруться у зонах зміщень порід, враховуючи морфологію, будову та тип зсуву.

Етап 7: оцінка обсягів вивітрювання гірських порід – пункти дослідження ставлять на різних елементах рельєфу з різною експозицією та крутістю для охоплення схилів з різним ступенем вивітрювання порід.

Проведення польових досліджень є обов'язковим для верифікації або виявлення ознак зсуву та оцінки рівня потенційної зсувної небезпеки. Наявність великої кількості рослинності або підвищеного рівня урбанізації в межах дослідної ділянки перешкоджає виявленню ознак зсувного руху. Для визначення типу ґрунтових матеріалів, що складають зсув, глибину поверхні ковзання, товщину та геометрію зсувних мас, рівнів ґрунтових вод, та ступеня порушення матеріалу зсуву.

1.6.2 Дослідження зсувів з використанням методів та засобів дистанційного зондування Землі

Дистанційний геоекологічний моніторинг зсувних процесів полягає у вивченні геологічної будови Землі, при якому дослідження проводяться без безпосереднього контакту з об'єктом дослідження. Інформація про стан зсувів отримується від супутникового приймача з використанням оптичного (видимого інфрачервоного, ультрафіолетового), радіотеплового та радіолокаційного випромінювання (Довгий, 2019).

При дешифруванні КЗ (космічний знімок) зсувні форми рельєфу в оптичному діапазоні відрізняються світлішим тоном, а також характерною овальною формою, водно-ерозійні, які зустрічаються на правобережжі Канівського водосховища мають хвилясто-видовжену форму.

За допомогою дистанційних даних можливим є вивчення стану рельєфу, дослідження стану земної поверхні, в тому числі ландшафтних комплексів, встановлення закономірностей розподілу опадів, типів ґрунтів та геолого-геоморфологічних показників досліджуваної ділянки (Anpilova et al., 2021, Trofymchuk et al., 2023).

Перевагами дистанційних методів дослідження земної поверхні в порівнянні з традиційними є масштабність зйомки, можливість отримання глобальної та локальної інформації про об'єкти, моніторинг геологічних процесів у режимі реального часу.

Sentinel-1 є супутниковою місією Європейського космічного агентства (ESA), яка використовує радіолокаційну систему із синтезованою апертурою (SAR) для збору даних. Диференціальна інтерферометрія з радаром із синтезованою апертурою (DinSAR – Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) є методом дистанційного зондування, яким вимірюють та контролюють вертикальні зміщення рельєфу, які пов’язані з зсувами ґрунту. Виявлення змін в фазі радарного сигналу є свідченням переміщення об’єктів на земній поверхні. Аналіз радіолокаційних даних з визначеною періодичністю дозволяє встановити динаміку цих змін. Подальша інтеграція отриманих результатів в ГІС (геоінформаційних систем) є основою для визначення рівня зсувонебезпечності території.

Доцільним є сумісне застосування даних супутника Sentinel-1 та місії SRTM для визначення тектогенезу та мофrogenезу території. Зазвичай долини водотоків успадковують активні розломні порушення, напрямок рухів яких збігається з векторами градієнтів геопотенціалів. Дослідженням долинної мережі займалися (Іванік та ін. 2020; Tustanovska et al., 2020). Геоморфологічний зміст карт базисних поверхонь полягає в тому, що вони відображають форму і нахил поздовжніх профілів річкових долин, по яких ці поверхні побудовані, поздовжній профіль річки є чутливим індикатором геоекологічних змін (Пересацько, 2008) та, як наслідок, активності чи затухання зсувних процесів (Орленко, 2023а).

Активні зсувні процеси призводять до руйнування та пошкодження рослинного покриву на певних ділянках. Вегетаційний індекс Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) може зафіксувати масштабні зміни стану рослинності, вказуючи на місця потенційних зсувів (Niraj et al., 2023). Вегетаційні індекси, розраховуються за даними супутників Landsat-8 та Sentinel-2, використовуються як додаткові дані для підтвердження результатів, отриманих іншими методами дослідження небезпечних ерозійних геологічних процесів.

Класифікація території дослідження за даними супутників Landsat-8 та Sentinel-2 на основі аналізу спектральних характеристик земного покриву дозволяє визначити стан рослинності на території ураженої зсувами.

Крутизна схилів безпосередньо впливає на стійкість ґрунту. Схили з великою крутизною можуть бути менш стійкими та більш схильними до зсувів, особливо за невідповідних геологічних умов. Ідентифікація ділянки зі значними висотними змінами та нахилами, за даними місії SRTM, дозволяє виявляти ділянки з найбільшим ступенем сприйнятливості до зсувів.

Визначення стану зволоженості території за радарними даними супутника Sentinel-1 є одним із основних факторів для подальшої класифікації території за ступенем сприйнятливості до зсувів (*Anpilova et al., 2021*). Перенасичені вологою ґрунти є менш стійкими та більш схильними до зсувів, оскільки вода знижує стійкість ґрунтового покриву (*Burshtynska et al., 2023*). Зливи або довготривалі опади призводять до насичення ґрунту вологою, що підвищує ймовірність виникнення зсувів.

З метою оцінки та аналізу всіх перерахованих вище факторів впливу на зсувні процеси необхідним є застосування математичних методів та моделей. Для розв'язання задач, пов'язаних з зсувними явищами, великими об'ємами інформації, часто неповної, та різноманітними потребами потенційних користувачів, доцільним є використання методу аналізу ієрархій (MAI) (*Saaty, 1980*). Застосування MAI при дослідженні зсувів забезпечує врахування експертних оцінок, дозволяє ідентифікувати різні фактори впливу на зсуви та визначити важливість кожного з них. Цей метод дозволяє ранжувати альтернативи для визначення рівня сприйнятливості ділянки дослідження до зсувів, що є важливим фактором у прийнятті рішень.

1.7 Основні методи боротьби із зсувами

Підвищений ризик зсувних процесів проявляється на схилах пагорбів, берегах річок, схилах балок. Основними методами боротьби із зсувами (*Угненко, 2010*) є відведення вологи шляхом дренажування, влаштування нагірних каналів, зменшення навантаження на схил, закріплення схилів інженерними спорудами, обмеження швидкості руху транспорту на схилах та заборона їх забудови.

Перелік протизсувних заходів включає багато методів укріплення схилів, до найбільш ефективних відносяться:

- відведення поверхневих вод;
- облаштування конструкцій, що розвантажують схили;
- облаштування підпірних стін;
- застосування габійонних конструкцій.

Залежно від параметрів крутизни схилу, рівня ґрунтових вод, а також геологічних особливостей ґрунтів, які є основою схилу застосовують найбільш ефективний метод.

Якщо нахил до 10% то захист схилу передбачає насадження деревної та кущової рослинності з гарно розвиненою кореневою системою. Поширена коренева система стримує водні потоки та укріплює схил тим самим перешкоджаючи сповзанню ґрунтових мас (*Шторгин, 2004*).

Якщо нахил перевищує значення 15% схили укріплюються облаштуванням штучних інженерних конструкцій, геосіток, геотекстилю, геоматів, георешіток та габійонних конструкцій. Поєднання декількох конструкцій одночасно дає змогу збільшити стійкість та стабільність схилів. Також одним із розповсюджених методів є використання бетонних конструкцій, що не потребують ретельного догляду. В поєднанні з насадженням дерев цей метод є найкращим.

1.8 Постановка завдання дослідження

Екзогенні геологічні процеси, зокрема зсуви, спричиняють значний негативний вплив на природні ландшафти та сталий розвиток людства. На правобережжі Канівського водосховища, в межах Ржищівської ОТГ та дослідної ділянки Витачів-Стайки відзначається значне поширення зсувних процесів, що призводять до масштабних змін геоекологічних умов регіону.

З метою ефективного моніторингу та управління цими процесами необхідним є застосування сучасних методів дистанційного зондування Землі, геоінформаційних технологій та геолого-географічних даних досліджуваної території.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуального наукового завдання, а саме, розробки методики дистанційного геоекологічного зсувонебезпечних схилів та створення алгоритму прогнозування виникнення нових або активізації стабілізованих зсувів за допомогою методів дистанційного зондування Землі.

Поставленою метою дисертаційної роботи є підвищення оперативності та достовірності прогнозування виникнення нових або активізації стабілізованих зсувів узбережжя шляхом розробки методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувонебезпечних схилів та створення алгоритму прогнозування на основі комплексного аналізу даних радарної інтерферометрії, супутникового оптичного знімання, наземних кліматологічних, літологічних, ландшафтних даних.

Для цього потрібно виконати низку часткових наукових завдань дослідження:

- 1) проаналізувати наявну статистичну, геологічну та геолого-географічну інформацію про стан зсувних процесів на правобережжі Канівського водосховища;
- 2) проаналізувати тектонічну будову та неотектонічну активність, пов'язану з ландшафтоутворюючим впливом Канівського водосховища;
- 3) з використанням даних дистанційного зондування Землі створити карту сприйнятливості території до зсувів;
- 4) провести валідацію розробленої методики на дослідному полігоні, одержати точні координати зсувів за її допомогою;
- 5) надати рекомендації щодо можливостей та сфер подальшого використання розробленої методики.

Взаємозв'язки та передбачений порядок виконання зазначених часткових наукових завдань описується загальною схемою дослідження рис. 1.8.

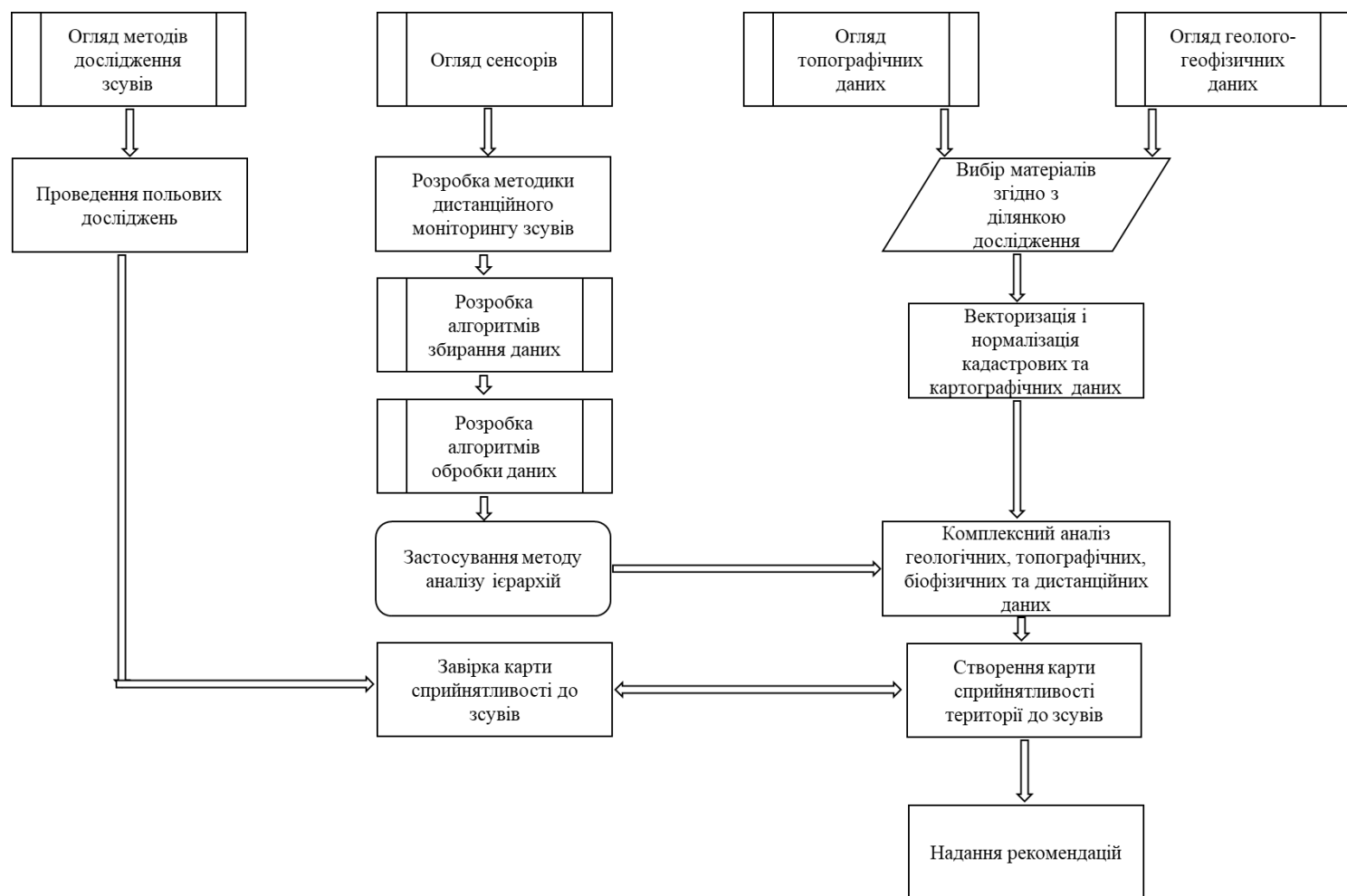


Рис. 1.8. Загальна схема дослідження

Висновки до першого розділу

1. Проаналізовано розвиток зсувів, які є складними та динамічними природними явищами, які виникають внаслідок руху ґрунтів під дією сили гравітації, за історичними даними. Зсуви є важливою геологічною проблемою, оскільки вони можуть мати серйозні руйнівні наслідки для життя та майна людей, інфраструктури та природного середовища. Визначено, що правобережжя Канівського водосховища уражене зсувами двох типів: для ділянок з повним геологічним розрізом, переважно циркоподібними структурними зсувами видавлювання, у верхній частині схилу, які переходять у пластичні зсуви; для ділянок з неповним геологічним розрізом, при номінальній потужності лесового горизонту менше ніж 10,5 м формуються фронтальні зсуви з площиною ковзання в нижній частині схилу по глинистих алевритах обухівської світи, глинах і мергелях київської світи.

2. Передумовами для активних вертикальних зміщень є структура схилів та геологічні умови, водночас тригерним фактором виступають тривалі періоди екстремальних опадів, а також коливання рівня ґрунтових вод та рівня р. Дніпро. Зсуви досліджуваної території пов'язані з гідрофільними бурими або строкатими глинами, перезволоження яких спричиняє активізацію зсувів.

3. Для реалізації дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів на правобережжі Канівського водосховища важливим є проведення детального аналізу факторів впливу, використовуючи дані дистанційного зондування у комплексі з наземними геологічними, геоморфологічним, ландшафтними даними.

4. Виходячи з аналізу передумов, факторів та даних поставлена наукова задача розроблення методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувонебезпечних схилів та створення алгоритму прогнозування виникнення нових або активізації стабілізованих зсувів за допомогою методів обробки даних дистанційного зондування Землі.

Список використаних джерел до першого розділу

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., et al. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 42539-42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>

Anpilova, Y., Hordiienko, O., Horbulin, V., Yakovliev, Y. (2021). Study of forest cover dynamics under the impact of anthropogenic factor using Google Earth Engine sentinel-1 satellites and Random Forest Techniques in Ukraine. *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. doi:10.3997/2214-4609.20215k2056.

Anpilova, Y., Hordiienko, O., Horbulin, V., Trofymchuk, O., Yakovliev, Y. (2021). The use active sensors of remote sensing to describe structures and landscape changes in Solotvyno. *Geoinformatics*. doi:10.3997/2214-4609.20215521018.

Bohush-Zadnipryana, A., Lyashenko, D. (2023). The impact on anthropogenic factors on the activation on landslides and erosion in land assessment. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. doi:10.3997/2214-4609.2023500026.

Bole, A., Wall, A., Norris, A. (2014). The Radar System – Technical Principles. In *Radar and ARPA Manual* (Third Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Burshtynska, K., Zayats, I., Halochkin, M., Bakula, K., Babiy, L. (2023). The influence of the main factors on the accuracy of hydrological modelling of flooded lands. *Water*, 15(18), 3303. doi:10.3390/w15183303.

Gnativ, R. M., Yakhno, O. M., Gnativ, I. R. (2016). Influence of quarrying on the change of longitudinal profiles in the mainstream of the river Stryi. *Conduct of Modern Science – 2016, November 30-December 7, 2016, Volume 16, Technical Science*, 8–10.

Gryshchenko, V., Bilokur, D. (Eds.). (2022). *Scientific Bases of Agriculture, Development of Ways of Its Effective Development: Collective Monograph*. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch. DOI: 10.46299/ISG.2022.MONO.AGRO.1.

Highland, L. M., Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook – A guide to understanding landslides*. U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 c.

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(I-III), pp. 81-86. doi: 10.24425/jwld.2021.139947

Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Hadiatska, K. (2019). National Database of Landslide Processes: Principles of development, implementation and application for landslide hazard assessment on regional and local levels. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, (3 (86)), 70–74. doi:10.17721/1728-2713.86.10

Lee, J.-S., Kim, Y.-T., Song, Y.-K., Jang, D.-H. (2014). Landslide Triggering Rainfall Threshold Based on Landslide Type. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 30(12), 5-14. <https://doi.org/10.7843/kgs.2014.30.12.5>

Liashenko, D., Tustanovska, L., Tsiupa, I., Trofymenko, P., Stakhiv, I. (2023). The influence on geological processes on the formation on the relief on urbanised territories on the example on the Holosiivskii District on Kyiv. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. doi:10.3997/2214-4609.2023500023.

Macciotta, R., Hendry, M. T. (2021). Remote Sensing applications for landslide monitoring and investigation in Western Canada. *Remote Sensing*, 13(3), 366. <https://doi.org/10.3390/rs13030366>

Niraj, K.C., Singh, A. Shukla, D.P. (2023). Effect of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) on GIS-Enabled Bivariate and Multivariate Statistical Models for Landslide Susceptibility Mapping. *J Indian Soc Remote Sens* 51, 1739-1756. doi.org/10.1007/s12524-023-01738-5.

Rudyi, R. M. (2020). On the analysis of landslide processes on the territory of the National dendrological park "sofiivka" with application of GIS-Technologies. *Bulletin of Uman National University of Horticulture*, 2, 130–133.

Saaty, T.L. (1980). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234–281.

Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., Papini, M. (2014). Remote Sensing for landslide investigations: An overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing*, 6(10), 9600–9652. <https://doi.org/10.3390/rs6109600>

Snitynskyi, V., Khirivskyi, P., Hnativ, I., Hnativ, R. (2020). Landslides and erosion phenomena in the foothills of the Carpathian Region Rivers. *Theory and Building Practice*, 2020(1), 9-15. <https://doi.org/10.23939/jtbp2020.01.009>

Solodei, I., Petrenko, E., Pavlenko, V. (2022). Classification and causes of shearing processes and methods o calculating slopes. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (109), 184–202.

Stakhov, T. (2006). Report “Generalization of materials for the study of exogenous geological processes and engineering-geological study of the territory of Lviv and partially Transcarpathian regions in order to geologically justify landslides and geological support of the UIAS NS.

Trofymchuk, O., Anpilova, Y., Hordiienko, O., Myrontsov, M., Karpenko, O. (2023). Method for detecting natural and anthropogenic changes that filled with water in landscapes using radar satellite imagery. *Studies in Systems, Decision and Control*, 799–813. doi:10.1007/978-3-031-35088-7_46.

Tustanovska, L. V., Ivanik, O. M., Shovkoplyas, T. V., Hadiatska, K. P., Krucheniuk, Y. A. (2020). Geoinformation assessment of Kanivsky Prydniprov'ye Paleorelief by structural morphometry. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects* 2020. doi:10.3997/2214-4609.2020geo048.

Zhao, C., Lu, Z. (2018). Remote Sensing of landslides – a review. *Remote Sensing*, 10(2), 279. <https://doi.org/10.3390/rs10>.

Багмет, О. Б. (2017). Вплив Дніпровського каскаду водосховищ на сучасний геоморфогенез прилеглих територій. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна, Серія "Екологія", вип. 17*, 55-62.

Беспалова, О. М. (2001). Типи зсувних зміщень правобережжя Середнього Дніпра як відображення мікроструктури глинистих ґрунтів. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*, 82–90.

Беспалова, О. М. (2003). Динаміка зсувного процесу Середнього Придніпров'я на прикладі ділянки Трипілья-Канів: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук. Київ.

Гребінь, В. В. (2010). Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр.

Демчишин, М. Г. (1995). Сучасна динаміка схилів на території України: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, спеціальність 04.00.07 "Інженерна геологія, мерзлотознавство, ґрунтознавство". Ів.-Фр. техніч. ун-т нафти та газу.

Демчишин, М. Г. (1992). Современная динамика склонов на территории Украины. Киев: Наук. думка, 256 с.

Демчишин, М. Г. (1999). Звіт за темою: "Закономірності зміни інженерно-геологічних умов в зоні впливу Дніпровських водосховищ". К.: ІГН НАНУ. Кн.1, 222 с.

Демчишин, М. Г., Беспалова, Е. Н. (1987). Инженерно-геологические условия правобережных склонов Среднего Днепра. Киевский нац. ун-т строительства и архитектуры МОН Украины. Основания и фундаменты.

Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». (2017). Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП - Київ. У редакції С.І. Примушко, Т.Д. Білошапська та В.Ф. Величко. Київ.

Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». (2021). Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП – Київ. У редакції С.І. Примушко, Н.Б. Коваленко та Н.Г. Пишна. Київ.

Довгий, С. О., Лялько, В. І., Бабійчук, С. М., Кучма, Т. Л., Томченко, О. В., Юрків, Л. Я. (2019). Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування. Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України.

Жирнов, П. В. (2012). Інженерно-геоморфологічний аналіз правобережжя Канівського водосховища (на прикладі ключової ділянки "Київ-Ржищів"). Автореферат кандидата географічних наук, спеціальність 11.00.04 "Геоморфологія та палеогеографія". Національний університет ім. Тараса Шевченка.

Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». URL: <http://sfs.gov.ua/arhiv/podatкова-baza-do-nabrannyachinnosti-podatkovim-kodeksom/normativno-pravova-baza/zakoni-ukraini/arhivzakoniv-ukraini/60472.html>

Іванік О.М., Мєнасова А.Ш., Крочак М.Д. Загальна геологія. Навчальний посібник – Київ, 2020, 205 с. URL: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/General_geology_Ivanik_Menasova_Krochak.pdf

Іванік О, Тустановська Л., Кравченко Д., Гадяцька К. (2020). Адаптація методики структурно-морфометричного аналізу до середовища ГІС для палеогеоморфологічних досліджень Канівського Придніпров'я. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2(89), 6-11. doi:10.17721/1728-2713.89.01.

Інженерна геологія (з основами геотехніки): підручник для студентів вищих навчальних закладів. Колектив авторів: В. Г. Суярко, В. М. Величко, О. В. Гаврилюк, В. В. Сухов, О. В. Нижник, В. С. Білецький, А. В. Матвєєв, О. А. Улицький, О. В. Чуєнко.; за заг. ред. проф. В. Г. Суярка. - Харків: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2019. - 278 с <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/46073>

Карпов, В. В. (Ред.). (2023). Сталий розвиток авіаційної інфраструктури України: колективна монографія. Львів - Торунь: Liha-Pres.

Ковальчук, М. С., Довгінка, У. С. (2017). Геологія і геоморфологія: навчальний посібник. Київ: НАУ.

Кондратюк, С.В. (2006). Вивчення сучасних екзогенних процесів на території Київської, Чернігівської та Житомирської областей за 2001 – 2005 рр. (Кн.1). Київ: ГГП ПДРГП «Північгеологія».

Коржнев, М. М. (Ред.). (2005). Екологічна геологія: підручник. Київ: ВПЦ "Київський університет".

Краєв, В. Ф., Спасокукоцкий, А. И. (1961). О природе оползней Каневского района. Труды первого украинского гидрогеологического совещ., Т.2, 183-191. К.: Изд-во АН УССР.

Краснов, П. А., та інші. (2011). Інформація про інженерно-геологічний стан прибережної смуги Канівського водосховища станом на 2010 рік. Вишгород: Дніпровська басейнова управління водних ресурсів.

Лялько, В. І., Апостолов, О. А., Єлістратова, Л. О. (2017). Вплив природних та антропогенних факторів на формування небезпечних ситуацій: зсувів, паводків (на прикладі ділянки верхньої течії річки Дністер). Український журнал дистанційного зондування Землі, 15(2017), 31–39. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/112>

Макаренко, В. В., Колодяжний, О. А. (2003). Геопросторовий аналіз картографічних даних та інформації ДЗЗ для відслідковування змін та прогнозування зсувонебезпечності. *Космічна наука і технологія*. Т.9 №5/6, 191-195.

Маринич, О. М., Пащенко, В. М., Петренко, О. М., Шищенко, П. Г. (2007). Фізико-географічне районування: карта - 1 : 2 500 000. У *Національному атласі України* (С. 228-229). Київ.

Муха, Б. П., Байрак, Г. Р. (2008). *Дистанційні дослідження Землі: Навчальний посібник*. Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.

Орленко Т. (2023б). Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні правобережжя Канівського водосховища. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. 4(103), pp. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.103.01>

Пазинич, Н. В. (2017). Дослідження та прогнозування зсувних явищ Придніпровської зони м. Києва на основі матеріалів дистанційного зондування Землі та геоморфологічних методів. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 13, 10-16. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdz 2017_13_4

Палієнко, В. П. (2010). Загальні підходи та принципи морфоструктурних і неотектонічних досліджень при розв'язанні пошуково-прогнозних питань.

Мінеральні ресурси України, 3, 36-40. URL: <https://mru-journal.com.ua/index.php/mru/issue/archive/2>.

Світличний, О. О. (2005). Водна ерозія ґрунтів і раціональне використання ерозійно-небезпечних земель. *Вісник Одеського національного університету*, 10(6), 67–76.

Угненко Є. Б., Тимченко О. М., Ужвієва О. М., Орел Є. Ф., Сорочук Н. І. (2019). *Геодезичні дослідження при визначенні зсувних процесів на ділянках шляхів сполучення у гірській місцевості: навч. посібник*. Київ: Видавничий дім "Кондор".

Федоришин, Ю. І., Бірук, С. В., Фесенко, О. В. (2003). Морфометрія як основний метод геоморфологічного аналізу і можливості сучасних комп'ютерних програм для повномасштабної його реалізації. *Геоінформатика*, (1), 86–91.

Шестопалов В. М., Коржнев М. М., Вижва С. А. 2011. Екогеологія України : навчальний посібник для студ. геологічних спец. вищ. навч. закладів. Київ : ВПЦ «Київський університет», 672 с.

Шнюков, Е. Ф., Шестопалов, В. М., Яковлев, Е. А., і інші. (1993). *Экологическая геология Украины: Справочное пособие*. Киев: Наукова думка.

Шутенко, Л. М., Рудь, О. Г., Кічаєва, О. В., та інші. (2017). *Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.

РОЗДІЛ 2

ВПЛИВ ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФІЧНИХ ТА КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЗСУВНІ ПРОЦЕСИ ПРАВОБЕРЕЖЖЯ КАНІВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Зміни ландшафту в Україні та світі, визначаються природними та антропогенними факторами. Зрештою, ці зміни є результатом складної взаємодії екзогенних, ендегенних та антропогенних процесів ландшафтного формування, перші дві групи процесів спричинені різними кліматичними умовами та динамікою ендегенних процесів. Безумовно, цей комплекс факторів має вплив на розвиток ландшафтів правобережжя Канівського водосховища, але лише певна комбінація геолого-географічних та кліматичних факторів, при наявності тригерного чинника спричиняє активний розвиток зсувних процесів.

2.1 Геолого-геоморфологічні особливості будови правого берега Канівського водосховища

Орографічно правобережжя Канівського водосховища розташоване на Придніпровській височині, яка представлена, північною частиною, лесовим слабопідвищеним акумулятивно-денудаційним структурно-генетичним типом рельєфу пізнього неогенового-голоценового часу утворення (Палієнко, 2012). Правий берег р. Дніпро має висоту до 100 м. Абсолютні відмітки поверхні вододілів знаходяться в межах 180-200 м, складені у верхній частині лесами, що сприяє інтенсивній ерозійній діяльності. На найвищому морфологічному рівні досліджуваної території розташоване лесове плато. Для ділянки Витачів-Букрин Канівського водосховища характерні позначки висот сучасної поверхні 170-195 м.

За геоморфологічним багатоступеневим районуванням правобережжя Канівського водосховища належить до Північнопридніпровської пластово-денудаційної, денудаційної рівнини на палеогенових та неогенових відкладах (IV-3) (Палієнко, 2004, Колтун, 2006). На карті геоморфологічного районування території України (рис. 2.1) це райони 63 – Київське акумулятивно-денудаційне, хвилясте середньо та сильно розчленоване плато, та 67 – частина Канівської

структурно-денудаційної гляціо-тектонічної, напірно-льодовикової сильно розчленованої височини (Палієнко, 2004).

Особливості рельєфу правобережжя Канівського водосховища сформувалися під впливом ендегенних, екзогенних, тектонічних, еолових, ерозійних процесів. На сьогодні складна морфоскульптура з основними елементами ділянки дослідження включає: лесове плато з нестійкими схилами, правобережну долину р. Дніпро з ерозійно-аккумулятивними терасами, яружно-балочні та ерозійні форми рельєфу, зсувні форми рельєфу.



Рис. 2.1. Геоморфологічне районування території України (Палієнко, 2004)

Для території правобережжя Канівського водосховища характерними є блокові зсуви ковзання та видавлювання. Цей тип зсувів виникає у міцних, монолітних товщах порід, що сповзають єдиним блоком, розвивається внаслідок порушення міцності ґрунтів у нижній частині схилу, переміщення блоків зберігається близько до первинного шару залягання порід (Демчишин, Лапинський, 1979). Морфологічно вони виражені серією субпаралельних схилу блоків та валів,

які розділені тріщинами і ровами. Основним деформувальним горизонтом виступають глинисті породи різного віку, складу та міцності.

Зсуви зісковзування фіксуються переважно у дисперсних глинистих породах, характерних для правобережжя Канівського водосховища, та залягають під нахилом, маючи високий рівень дислокації. Зміщення порід консеквентне – по нахиленому контакту порід, та інсеквентне – з перетинанням їх шарів. Спостерігається залежність між лінійним розташуванням гравітаційних форм рельєфу, а саме зсувів, та активними на неотектонічному етапі розломами. Великі складні зсуви вздовж правого берега Дніпра на ділянці від с. Витачів до смт. Ржищів розташовані в зоні впливу Київського розлому (Алексеев, 1980) північно-західного простягання (рис 2.2).

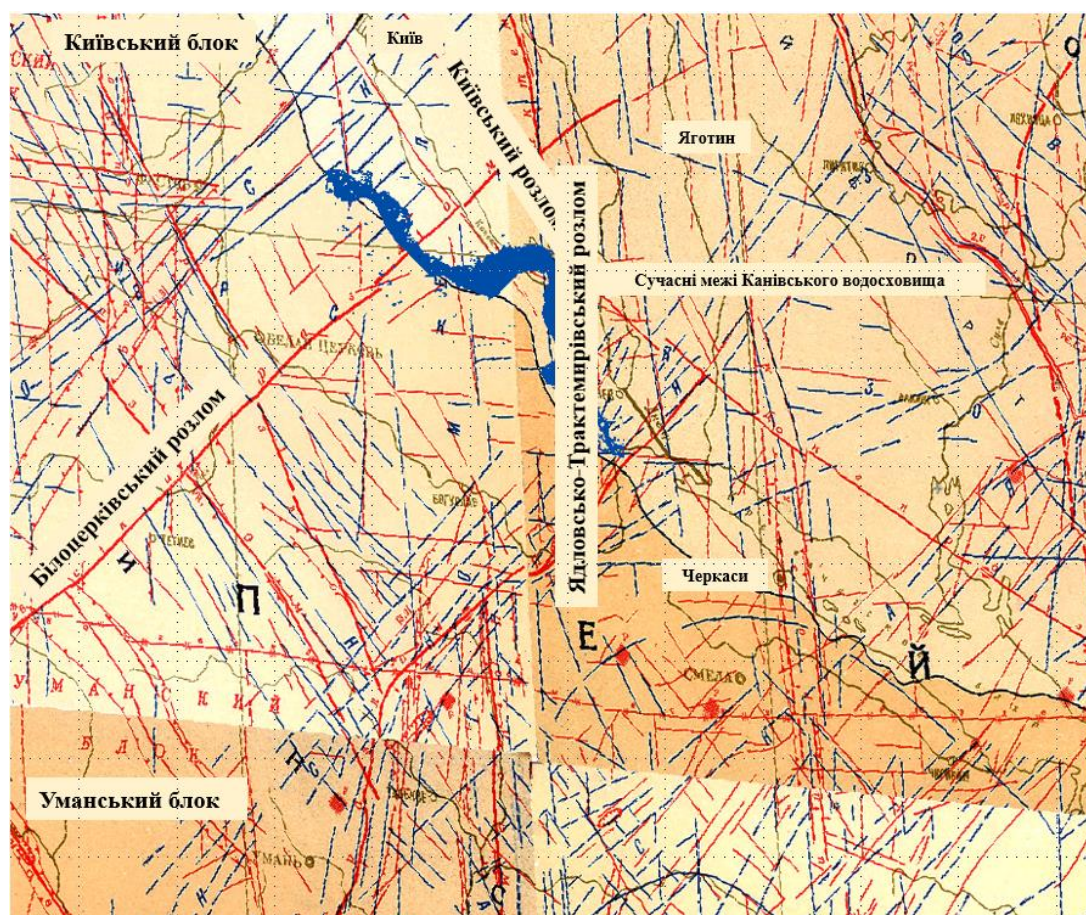


Рис. 2.2. Фрагмент зображення розривних порушень та основних зон лінеamentів Північного-заходу ССРСР Масштаб 1:1000000 (Карта розривних порушень та основних зон лінеamentів Північного-заходу ССРСР Масштаб 1:1000000, 1988 р.)

Територія дослідження має складне поєднання в просторі сучасних деструктивних та конструктивних процесів в умовах прояву знакозмінних, тобто коливальних, сучасних тектонічних рухів земної кори (*Палієнко, 1985; Палієнко, 1995*).

Амплітуда коливань Обухівського тектонічного блоку за неоген-четвертинний період склала 180-190 м. Розташований східніше Бориспільський блок (район долини р. Дніпро) також піддавався тектонічним підняттям, амплітуда яких склала у середньому 150 м. Різниця в амплітудах підняття сусідніх блоків, зумовили значну висоту берегових схилів (*Палієнко, 1995*).

В основі берегового схилу Київського плато залягає товща мергелів київської світи палеогену. Структурні особливості товщі мергелів, які не витримані по потужності та мають локальні підняття у вигляді пологих антиклінальних складок, впливають на розвиток екзогенних геоморфологічних процесів. Підняття на 5–7 м спостерігаються в товщі мергелів київської світи палеогену вздовж усього правого берега Дніпра від с. Халеп'я до с. Ходорова.

Зсуви найбільше вивчені уздовж правого схилу берега Дніпра від м. Київ (*Rasporenko and Liashenko, 2023*) до м. Ходорів та в районі Канівських дислокацій. У районі м. Київ і південніше на корінному схилі м. Дніпро, розвиваються складні двох'ярусні зсуви. У верхній частині схилу зсуви пов'язані з основним деформувальним горизонтом. У бурих та строкатих глинах морфологія зсувних тіл включає стінку зриву (*Палієнко, 1996*) зсувну терасу та земляний потік, який утворює жолоби у відкладах полтавської та харківської світ. Нижній ярус пов'язаний з мергельними глинами київської світи, зсуви по них розвиваються лише на окремих ділянках м. Київ та м. Ходорів. У районі сіл Стайки-Гребені спостерігається структурно-зсувна тераса поверхні глин київської світи. Ширина зсувних зон сягає 300-350 м уздовж брівки схилу. Генетично зсуви київського типу є складними зсувами видавлювання та зсувами-потоками (*Стецюк, Ткаченко, 2003*). На багатьох ділянках зсуви простежуються уздовж берега Канівського водосховища (*Палієнко, 2008*) на протязі 3-4 км, при цьому ширина окремих зсувів сягає 800-1000 м. Загальний об'єм зсувів Канівського району в береговій зоні

становить близько 15 млн м³. Інша ділянка Канівського району віднесена до ділянок слабо-дислокованого плато. Для них характерне зміщення недислокованих піщано-глинистих порід, які залягають вище похило-хвилясто зім'ятих глинисто-мергельних відкладів київської світи. Деформації мають характер пластичних зсувів та формуються внаслідок видавлювання гідрофільних вапнистих глин, які складають верхню частину київської світи, а також у результаті механічної суфозії пісків (Палієнко, 2010), що залягають вище. У Київському та Канівському Придніпров'ї спостерігається періодична активізація зсувів з 15-20 річним циклом.

2.2 Інженерно-геологічна будова території правобережжя Канівського водосховища

Розвиток гравітаційних процесів на правобережжі Канівського водосховища, в межах Ржищівської ОТГ відбувається під впливом численних природних та техногенних факторів. Найбільш значущими є літолого-стратиграфічні, тектонічні, геоморфологічні та гідрогеологічні фактори впливу на активізацію зсувних процесів.

Комплекс гірських порід, що беруть участь у формуванні екзогенних геоморфологічних процесів, зокрема зсувів, складений відкладами палеогенового, неогенового та четвертинного періодів (рис. 2.3).

Відклади київської світи (*P* *кв*) поширені повсюдно в межах території дослідження та відсутні лише в долині р. Дніпро, пригирлових частинах найбільших її приток. Київські відклади утворені трьома літологічними горизонтами, а саме підмергельними пісками, мергелями та невапнистими піскуватими глинами. В свою чергу підмергельні відклади представлені дрібно-середньозернистими глинисто-мергельними ущільненими пісками з фосфоритовими стяжіннями, товщина шару 5-8 м.

Вищий рівень залягання мають голубувато-сірі, слюдисті мергелі з прошарком мергелястих глин. Мергельно-глиниста товща є одним із основних деформуючих горизонтів у розвитку зсувів у межах території дослідження.

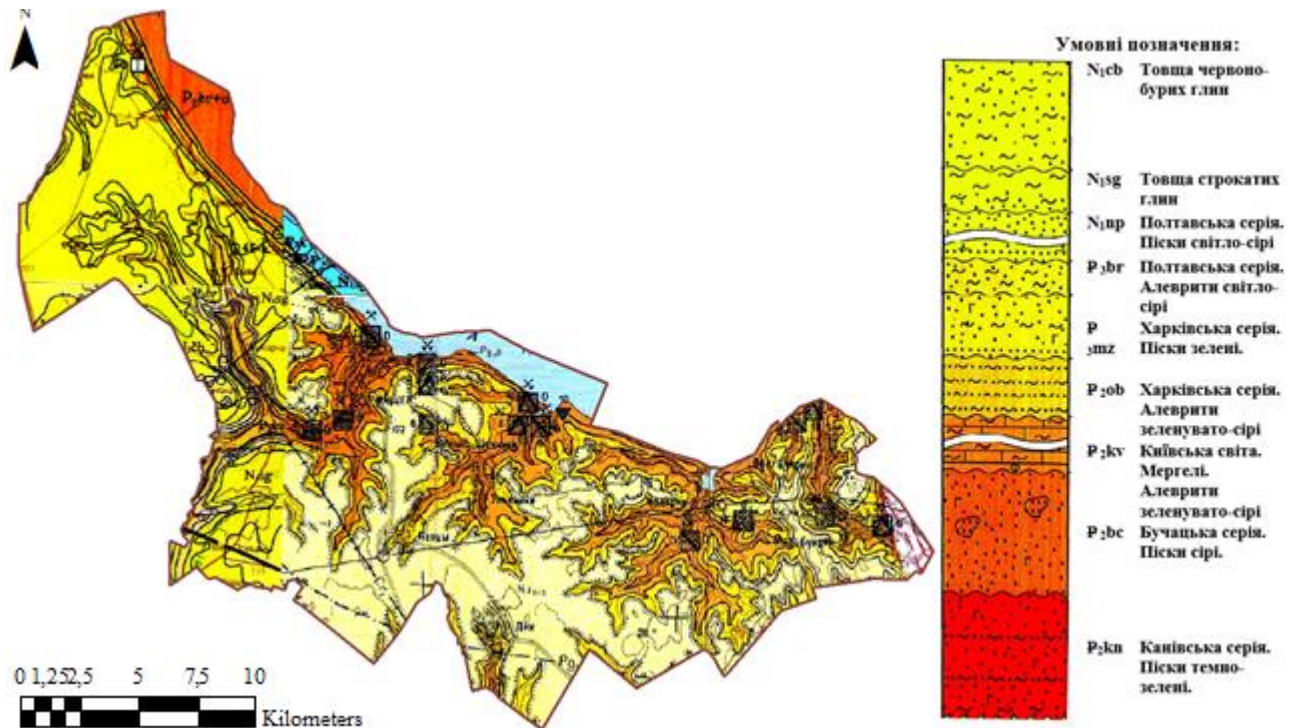


Рис. 2.3. Фрагмент геологічної карти і карти корисних копалин та четвертинних відкладів. Масштаб 1:200000. Дніпровсько-Донецька серія. Аркуші: М36-ХІІІ, М36-ХІV та М36-ХІХ (Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000)

Глини виступають площиною сковзання для масивів перезволожених, розташованих вище порід. Абсолютна позначка покрівлі плато складає 110-115 м, в межах зсувних схилів 85-110 м. Потужність мергельно-глинистих відкладів сягає 30-35 м, а глибина їх залягання від 0 до 50 м і більше (Кондратюк, 2006).

Відклади харківської світи ($P_2 ob + P_3 mz$) поширені в межах Київського плато та залягають на поверхні мергельно-глинистої товщі київської світи. В долинах річок та глибоких ярів і балок вони частково або повністю розмиті під впливом ерозійної діяльності четвертинного часу. Харківські відклади представлені перешаруванням глауконіто-кварцевих пісків з малопотужними прошарками супісків з лінзами алевритових глин. В межах території досліджень потужність харківських відкладів коливається від 0,5 до 11,4 м. В них формується слабководний горизонт, що дронується в долинах рік та днищах яружно-балочної сітки, іноді з проявом суфозійних процесів (Краєв, 1971).

Неогенові відклади (*N*). Представлені піщанистими олігоцен–міоценовими відкладами полтавської світи та світою строкатих і бурих глин.

На поверхні порід харківської серії залягають відклади полтавської світи (*N_{1pl}*). Відклади поширені в межах вододілів та їх схилів, а в долинах рік і днищах балок повністю розмиті. Товща порід полтавської світи представлена трьома літологічними горизонтами:

- нижній складають кварцові піски, різнозернисті, сірі та сірувато-бурі з прошарками і лінзами глинистих пісків, піщано-вуглистих глин та бурого вугілля;
- середній формують кварцові піски, дрібнозернисті, світло-сірі до білих;
- верхній утворюють кварцові піски, дрібнозернисті, каоліністі, світло-сірі до сірих з прошарками і лінзами пісковиків та каолінистих глин.

Ділянки світи строкатих глин мають локальне поширення (*N_{1-2 sq}*). Абсолютні позначки покрівлі в межах території дослідження фіксуються на висоті 150-159 м. Строкаті глини представляють пластичну породу сірого, жовто-сірого кольору з багатьма розводами червоно-бурого, вохристо-бурого, вишневого-червоного та малинового кольорів (*Кривжанек, 1951*). Глини однорідні, щільні, в'язкі, жирні на дотик, у нижній частині шару запісочені. В складі глин спостерігаються включення вапнистих стяжінь залізистих та марганцевих конкрецій. Потужність цих відкладів сягає 10-18 м.

У межах території дослідження світа червоно-бурих глин (*N_{2cb}*) локально займає площу на схилових ділянках та поширені в межах розповсюдження строкатих глин. Поверхня відкладів в значній мірі еродована та розчленована, знаходиться на абсолютних позначках 157-166 м. Горизонт червоно-бурих глин представлений породами бурого та червоно-бурого забарвлення, щільними, в'язкими, з включенням вапнякових стяжінь. Переважаючі потужності горизонту бурих глин становить 5–8 м, іноді 12 м. Глиниста товща міоцен–пліоцену виконує функцію водотривкого горизонту для першого від поверхні горизонту ґрунтових вод та є основним деформуючим горизонтом для зсувів на верхніх ярусах схилів правобережжя Канівського водосховища (*Рудько, 1996*). Перекривають їх нижньонеоплейстоценові озерні суглинки або середньочетвертинні водно-

льодовикові піски з моренними суглинками. У межах присхилових територій по їх поверхні проходить сковзання перезволожених та техногенно навантажених четвертинних відкладів (Кондратюк, 2006). У відслоненнях строкаті та червоно-бурі глини підлягають вивітрюванню (розтріскуванню, осипанню), а у зволоженому стані вони опливають, що значно порушує стійкість схилів.

Основним природним чинником, що визначає інженерно-геоморфологічні умови, є поверхневі гірські породи (рис. 2.4), оскільки ці утворення слугують середовищем, в якому розташовані та експлуатуються інженерні споруди. Літолого-петрографічний склад цих порід здійснює значний вплив на їх фізико-механічні та будівельні властивості (Рудько, 2002). В межах території дослідження основну роль у формуванні інженерно-геоморфологічних умов відіграють середньо-, верхньочетвертинні та сучасні четвертинні відклади.

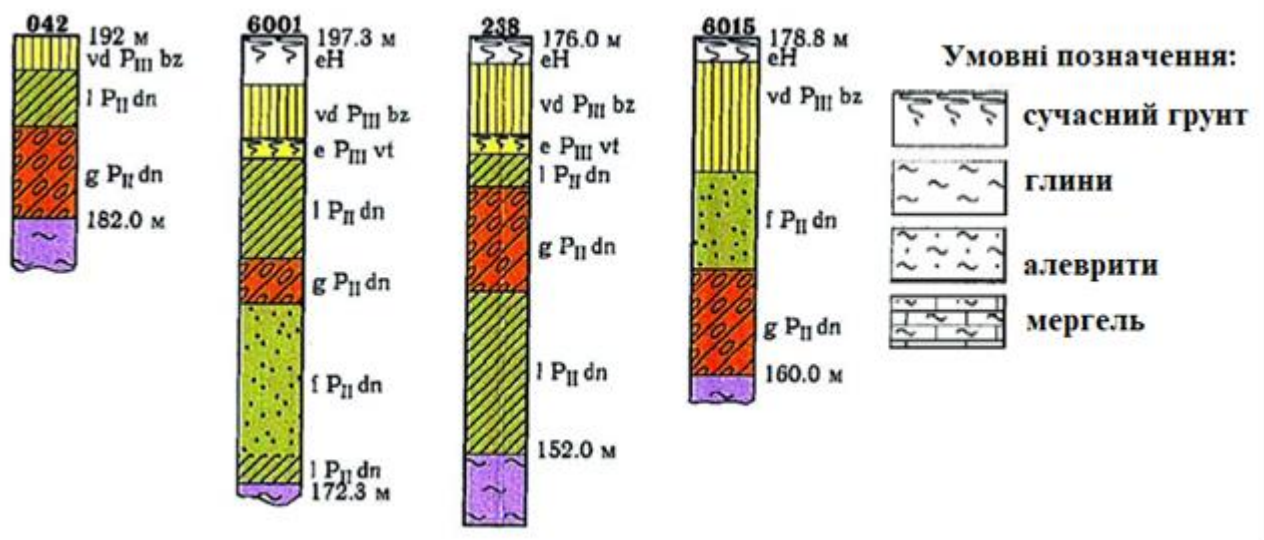


Рис. 2.4. Типові літолого-стратиграфічні колонки четвертинних відкладів.

Вертикальний розріз. Масштаб 1:2000 (Державна геологічна карта України, масштаб 1:200 000. Аркуш М-36-ХІІІ (Київ, 2001)

Утворення четвертинної системи (рис. 2.5) представлені піщано-суглинистими породами різного генезису. Відклади четвертинної системи представлені різногенетичними типами континентальних утворень, зокрема делювіальними, алювіальними, гравітаційними, пролювіальними із переважанням лесовидних суглинків різного віку.

На зміну потужності четвертинних відкладів впливають геоморфологічні умови, геоструктурні особливості та неотектонічні рухи (Рудько, Адаменко, 2008). Відтак потужність четвертинних відкладів в межах морено-зандрової рівнини значно більша, ніж в межах лесового плато (рис. 2.6), за рахунок різниці в неотектонічних висхідних рухах.

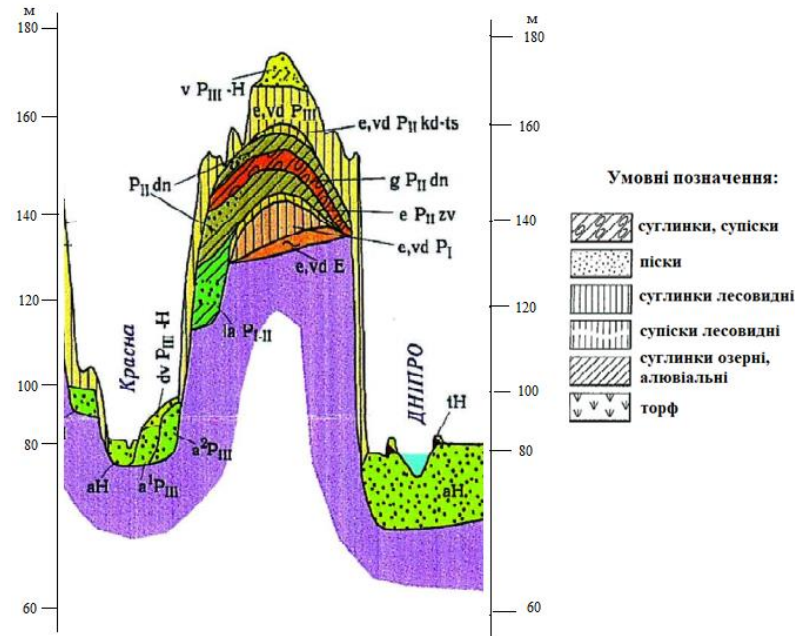


Рис. 2.5. Геологічний розріз лесової рівнини Правобережжя Дніпра (Державна геологічна карта України, масштаб 1:200 000. Аркуш М-36-ХІІІ (Київ, 2001))

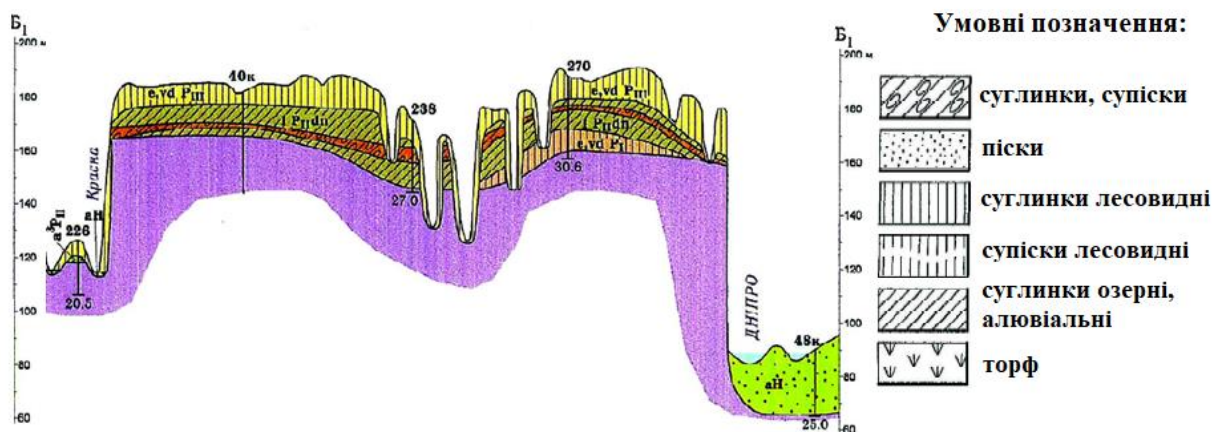


Рис. 2.6. Типовий геологічний розріз ділянки південної частини Київської області (фрагмент розрізу, Державна геологічна карта України, масштаб 1:200 000. Аркуш М-36-ХІІІ (Київ, 2001))

Середньочетвертинні відклади (*QII*) представлені водно-льодовиковими (*fPIIdn*), льодовиковими (*gPIIdn*) та озерно-льодовиковими (*lgPIIdn*) відкладами. Відклади дніпровського льодовика складають морено-зандрову рівнину поширені в межах Придніпровської лесової рівнини та четвертинної надзапальної тераси Дніпра. Майже всюди середньочетвертинні відклади залягають під лесовидними породами. Загальна потужність відкладів змінюється від 5 до 30-50 м. Представлені льодовикові відклади над- і підморенними водно-льодовиковими пісками, озерно-льодовиковими суглинками, супісками і мореною, складеною глинами, суглинками, супісками, іноді пісками. Потужність морени не перевищує 10-14 м, частіше має розмір 3-5 м.

На морено-зандровій рівнині та у водно-льодовикових долинах розвинені переважно піски, озерно-льодовикові суглинки і супіски грають другорядну роль в розрізі над- і підморенних відкладів, які залягають зазвичай у вигляді прошарків серед пісків. Аналіз фізико-механічних властивостей над- і підморенних пісків показує, що ці піски за своїми інженерно-геологічними властивостями ідентичні (*Рудько, Шута, 2002*). Текстура пісків горизонтально- і косошарувата. Супіски мають таку ж текстуру. Моренні відклади представлені глинами, важкими, середніми та легкими суглинками, а також супісками.

Верхньочетвертинні відклади (*QIII*) утворені комплексом еолово-делювіальних та елювіальних відкладів (*vd, ePIII*), алювіальними відкладами перших надзапальних терас (*a1 PIII*) та алювіальними відкладами других надзапальних терас (*aPIII*). Найбільше поширення в межах території дослідження мають еолово-делювіальні та елювіальні відклади (*vd, ePIII*), покривають суцільним шаром територію плато та частину його схилів. Підстеляються різноманітними стратиграфічними та літологічними товщами, а перекриваються сучасним ґрунтово-рослинним шаром або техногенно зміненими ґрунтами. Літологічно товща верхньочетвертинних відкладів на території Ржищівської ОТГ складена середніми, важкими лесовидними суглинками та лесами палево-жовтого, жовтуватого-сірого кольору, стовпчастої структури відслонення. Загальна потужність порід лесово-суглинистої формації складає 1,4–21 м. Для цього

комплексу порід характерним є просадки, піддатливість до ерозійних процесів внаслідок перезволоження.

В долинах річок поширені верхньочетвертинні алювіальні відклади перших надзаплавних терас (*aIPIII*). Домінуюче значення в розрізі алювію перших терас відіграють дрібно- і середньозернисті кварцові піски. Супіски та суглинки утворюють лінзи і прошарки в товщі пісків. Потужність комплексу в долинах малих і середніх річок складає 5–12 м, а в долинах великих річок 10–20 м.

Сучасні четвертинні відклади (*QIV*) сформовані комплексом алювіальних (*aH*), озерно-болотних (*lbH*) та техногенних відкладів (*tH*).

Сучасні озерно-болотні четвертинні відклади (*lbH*) приурочені до заплав річок та окремих понижень, розвинені на перших та других надзаплавних терасах річок. Потужність цих відкладів невелика від 0,5 м до 3,0 м, іноді досягає 6,0-7,0 м. Літологічно ці четвертинні відклади представлені торфом різного ступеню розкладання, заторфованими суглинками, супісками і пісками, зустрічаються також суглинки, супіски і піски (*Самойленко, 2003*). з рослинними залишками.

Формування комплексу сучасних алювіальних відкладів заплав річок (*aH*). відносяться до заплавних терас усіх річок, які протікають по території дослідження, і представлені пилуватими, дрібно- , середньо- , і рідше крупнозернистими пісками, з лінзами і прошарками супісків і суглинків. В своїй основі піски часто містять гравій і гальку. Потужність вказаних утворень в долинах малих і середніх річок змінюється від 1–2 м до 10–15 м, а в долинах великих річок складає 10-25 м. Розрізняють заплавний та русловий алювій (*Самойленко, 2003*). Русловий алювій відкладався основним потоком річок при меженних рівнях і представлений піщаними ґрунтами. Заплавний алювій накопичується з того моменту, коли бічна ерозія переважала над донною. Такі умови сприяли накопиченню зв'язних ґрунтів.

Комплекс техногенних ґрунтів (*tH*) утворився під впливом антропогенної діяльності. Значне накопичення техногенних ґрунтів в межах схилів приводить до виникнення або активізації зсувів. Товщина насипних ґрунтів в межах досліджуваної території сягає від одного метра до 18,5 м (*Старостенко, 2001*).

За інженерно-геологічною характеристикою насипні техногенні ґрунти відносяться до слабких, оскільки вони характеризуються нерівномірним ущільненням під вагою інженерних споруд, чого не можна сказати про намивні ґрунти, які відрізняються високою щільністю та однорідністю гранулометричного складу.

2.3 Гідрогеологічні умови формування зсувів на території правобережжя Канівського водосховища

Досліджувана територія розташована в межах Дніпровського артезіанського басейну, р. Дніпро з неглибоким заляганням кристалічних порід докембрію в південно-західній частині та потужною товщею осадових утворень кайнозою й мезозою (*Водна ініціатива, 2018; Матвєєв, 2014*). У відповідності з геологічною будовою та гідрогеологічними умовами в районі робіт виділяються наступні водоносні горизонти:

- водоносний горизонт у верхньоплейстоценових лесовидних суглинках (vd PIII) – “верховодка”;
- водоносний горизонт у зсувних ґрунтах голоцену (dpH);
- водоносний горизонт у голоценових алювіальних і алювіально-делювіальних відкладах заплав річок і днищ балок (a, ad H);
- водоносний горизонт у верхньоплейстоценових алювіальних відкладах I-II надзаплавних терас (a1-2 PIII);
- перший водоносний горизонт – перший підгоризонт у середньоплейстоценових воднольодовикових, озернольодовикових піщаних відкладах (f1l,q PII);
- другий водоносний горизонт – другий підгоризонт в нижньоплейстоценових суглинисто-супіщаних озерних відкладах (IP1);
- водоносний горизонт у відкладах межигірської, берекської та новопетрівській світ або олігоцен-міоцену (P3 mz + br +N1np);
- водоносний горизонт у відкладах буцацької та канівської серій еоцену (P2bc+kn).

Зволоженість та перенасичення схилів водою є одним із основних факторів активізації зсувів. Перезволоженість ґрунтових мас спричиняють: понаднормова кількість опадів, швидке танення снігового покриву, коливання рівнів ґрунтових вод, підняття води вздовж берегової лінії водосховища, весняна повінь та паводок. Згідно з гідрогеологічною картою України територія дослідження (рис. 2.7) знаходиться у алювіальних і озерно-алювіальних антропогенових відкладах надзаплавних терас та заплав. Частково у алювіальних та озерно-алювіальних антропогенових відкладах надзаплавних терас і заплав річок, середньо-антропогенових флювіогляціальних відкладеннях, горизонт пісків з прошарками супісків, суглинків і глин, в нижній частині з галькою та гравієм (Теременко, 2005, Мичак та ін. 2010, Shestopalov and Bublyas, 2016). Також частину площі дослідження займають відкладення тріасу і юри, для яких характерними породами є вапняки, пісковики, конгломерати, піски, аргіліти, доломіт.

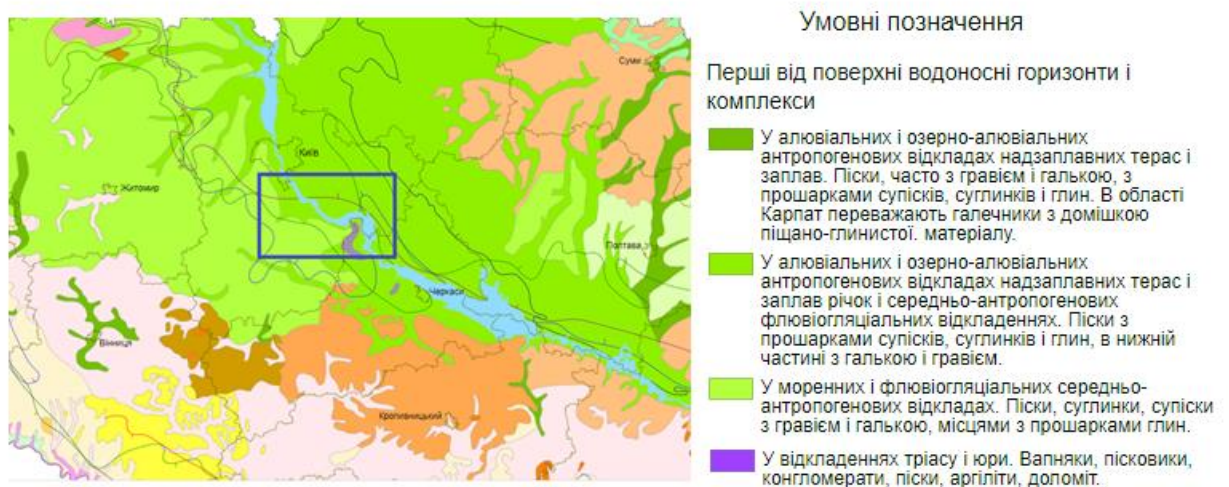


Рис. 2.7. Фрагмент гідрогеологічної карти України. Перші від поверхні водоносні горизонти та комплекси (Портал «Природа України»)

Залягання з поверхні переважно піщаних і лесовидних порід, що легко розмиваються, літологічна неоднорідність товщі зумовили активний розвиток зсувних процесів, що викликають площинне змивання, зсувну переробку правобережжя водосховища та проалювіальне винесення матеріалу грязьовими потоками на території Ржищівської ОТГ.

2.4 Ґрунтовий покрив території дослідження

Враховуючи фізико-географічне районування України, територія дослідження розташована в межах лісостепової зони. Поверхневі ґрунти та рослинність збереглися у відокремлених ділянках досліджуваної області, які залишилися не забудованими та вбереглися від впливу гідронамиву піску. В заплаві річки Дніпро, де відзначається високий рівень ґрунтових вод, спостерігаються дернові та лугові ґрунти на алювіальних та глеюватих піщаних відкладах (рис 2.8).

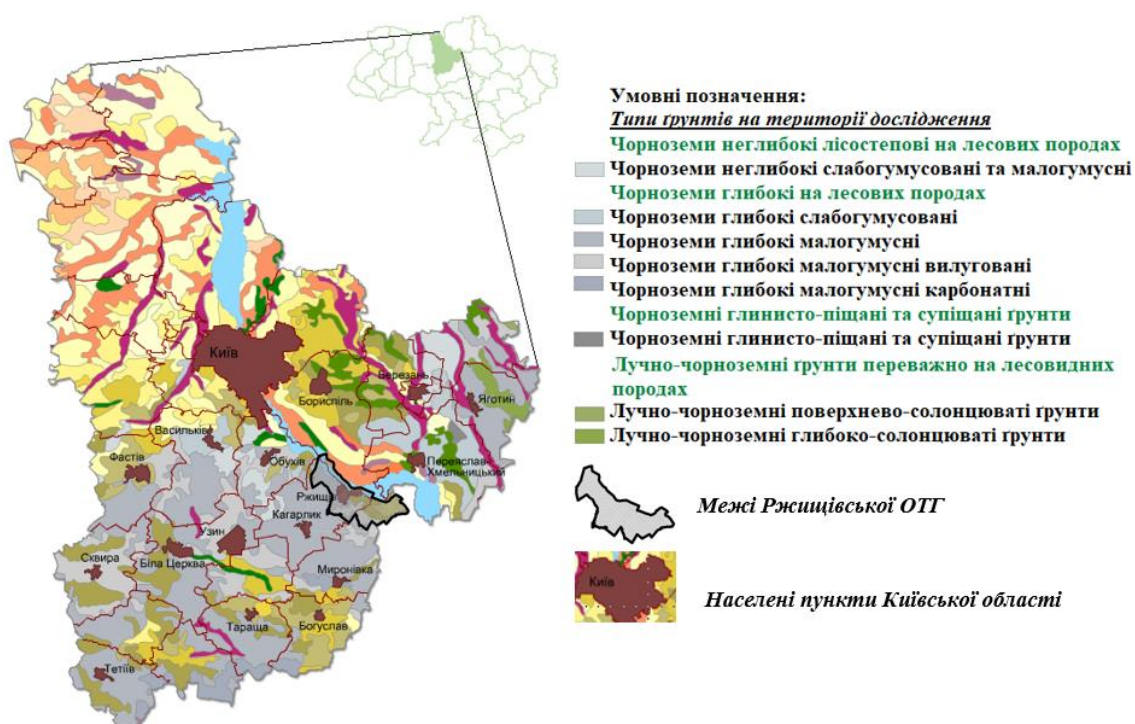


Рис. 2.8. Фрагмент карти ґрунтів території дослідження (*Портал «Природа України»*)

Для території Ржищівської ОТГ характерними є чорноземні ґрунти на лесових породах, з їх підтипами. Цей тип ґрунту розвинувся під покривом лучної рослинності, підтипи відрізняються між собою за товщиною гумусового горизонту та вмістом гумусу. В лучних ґрунтах глибина гумусового шару перевищує 50 см, а вміст гумусу становить 3-6%. Порівняно з цим, в дернових ґрунтах глибина гумусового шару менше 50 см, а вміст гумусу становить 1-3%.

У разі надмірного зволоження такі ґрунти втрачають свою структурну стійкість, що може сприяти розвитку зсувів. Глинисті ґрунти мають більшу стійкість до зсувів завдяки своїй в'язкості. Однак інтенсивні дощі або таловий водний потік може знизити стійкість навіть глинистих ґрунтів через вимивання частинок та послаблення структури (Ясь, 1984).

Також важливими факторами є вміст органічної речовини та вологи у ґрунті. Органічний матеріал впливає на властивості ґрунту, змінюючи його структуру та стійкість. Надмірна зволоженість є критичною, оскільки пересичені водою ґрунти втрачають свою міцність, що може сприяти руху матеріалу під впливом гравітації.

2.5 Аналіз впливу кліматичних умов на вологість ґрунтів та зсувні процеси

Територія дослідження розташована в помірно-континентальній кліматичній зоні, де кліматичні умови відіграють значну роль у розвитку гравітаційних процесів. Чим менш стабільний схил, тим більш вірогідним є розвиток зсуву. Водночас на території яка є геологічно стійкою, внаслідок, поступового впливу кліматичних змін, наприклад повільного зменшення рослинного покриву або руйнування гірських порід, збільшується ризик виникнення зсувів.

Кліматичні умови, зокрема кількість атмосферних опадів, впливають на стабільність ґрунту та потенційну схильність досліджуваної території до зсувів. Довготривалий період атмосферних опадів приводить до перенасичення схилів вологою збільшуючи вагу ґрунтового покриву та знижуючи його міцність. Нерівномірний розподіл атмосферних опадів підвищує рівень вразливості ґрунтового покриву, в тому числі, за умови різниці вологості між верхнім та глибоким шаром ґрунту.

Розрахунки вертикальних зміщень виконано із використанням радарних даних Sentinel-1 виключно за період березень-квітень 2015-2023 років, через підвищений рівень опадів в даний період року.

Інтенсивні опади можуть також викликати ерозійні процеси, які змивають верхній шар ґрунту та створюють передумови для формування зсувів. Велика

кількість води, що стікає схилами, може підмивати ґрунт та створювати порожнини, що також сприяє формуванню зсувів. Зимові та весняні танення снігу, весняні та літні дощі є чинником активізації зсувів, особливо на берегах водосховищ.

Числові значення кількості опадів отримано з бібліотеки кліматичних даних ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), з використанням хмарного сервісу GEE (Google Earth Engine) (рис. 2.9).

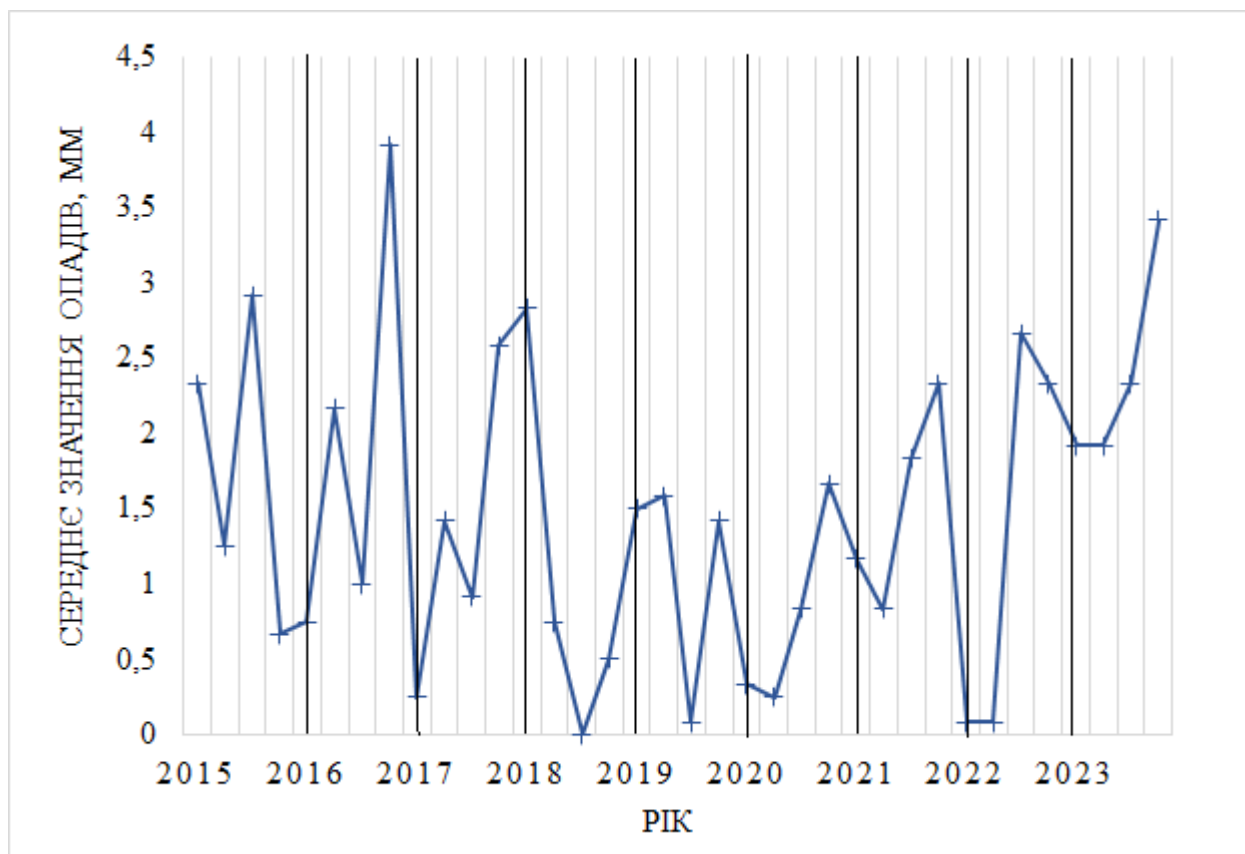


Рис. 2.9 Графік розподілу опадів за весняний період (березень-квітень) по роках дослідження за даними ECMWF

Для дослідження обрано щоденні дані з 3 березня по 31 квітня, за 2015 – 2023 роки. Це пояснюється тим, що найактивніші періоди розвитку зсувів на території Канівського водосховища це осінній та весняний періоди. Опади вимірювалися в мм. Наступним кроком обчислено середнє значення для кожного дванадцятиденного проміжку, оскільки оцінка випадіння кількості опадів, повинна

була корелювати з графіком прольоту супутника Sentinel-1, для більш точного визначення розмірів вертикальних зміщень земної поверхні.

Використання радарних даних супутника Sentinel-1 допомагає з певною періодичністю відстежувати розподіл опадів на значних територіях. Показник поверхневої вологості ґрунту (SSM), що визначається за даними Sentinel-1, відображає відносний вміст води у верхніх кількох сантиметрах ґрунту, демонструючи наскільки вологим чи сухим є ґрунт у найвищому шарі та виражається у відсотках насиченості (*Hornacek et al., 2012, Vreugdenhil et al., 2020*). Вимірювання цього параметру супутниковими радіолокаційними датчиками дає можливість зрозуміти локальні впливи опадів на стан ґрунтового покриву (*Entekhabi et al., 2010; Mondal and McDermid, 2021*).

Кліматичні умови впливають на розвиток та активізацію зсувних процесів, особливо при аномальних обсягах випадіння надмірної кількості опадів у затяжний період, що призводить до збільшення рівня ґрунтових вод та перезволоження основних глинистих деформуючих горизонтів, а у місцях розповсюдження потужної товщі лесових порід – до їх просідання, інтенсивність якого в свою чергу залежить від просадочних властивостей відкладів лесової формації.

Висновки до другого розділу

1. Проаналізовано вплив геолого-географічних та кліматичних факторів на зсувні процеси правобережжя Канівського водосховища. Зроблено висновок про суттєвий вплив глибинних розломів та їх активації на новітньому етапі на розвиток екзогенних процесів у цьому регіоні.

2. До локальних геологічних факторів можна віднести регіональні особливості розподілу і залягання стратиграфічних шарів з характерними для досліджуваного регіону особливостями перешарування літологічних різностей, а саме, пісків, суглинків, глин і мергелів, тобто водотривких і водопроникних товщ різного віку.

3. Проведено аналіз геоморфологічних та топографічних факторів, що впливають на розвиток або активізацію зсувної діяльності: амплітуда абсолютних висот до 80-100 м, значна крутизна схилів балок і берегів Канівського водосховища, що у комплексі з специфічним літологічним складом створює сприятливі передумови для розвитку зсувів.

4. Тригерними факторами для розвитку зсувних процесів на правобережжі Канівського водосховища можна назвати вологість ґрунту, яка залежить від кількості та інтенсивності опадів. Проаналізовано кількість опадів у весняний період (березень-квітень) за роки, за які проводились дослідження території з використанням даних дистанційного зондування.

5. Проаналізована можливість вивчення визначених факторів дистанційними методами у різних діапазонах електромагнітного спектру, результати отримані на їх основі, підтверджуватимуться залученням історичних геологічних карт та статистичної інформації. Отримані протягом дослідження матеріали буде використано як основу для ГІС-проекту у середовищі ArcGisPro.

Список використаних джерел до другого розділу

Burshtynska, K., Kokhan, S., Pfeifer, N., Halochkin, M., Zayats, I. (2023). Hydrological modeling for determining flooded land from unmanned aerial vehicle images—case study at the Dniester River. *Remote Sensing*, 15(4), 1071. doi:10.3390/rs15041071

Entekhabi D. *et al.*, "The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 704-716, May 2010, doi: 10.1109/JPROC.2010.2043918.

Fedorovsky, O.D., Tomchenko, O.V., Sokolovska, A.V. (2013). Using systematic methods of remote sensing data analysis to determine the environmental state of anthropogenically altered landscapes. *GeoInformatics 2013 - 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*

Hornacek M. *et al.*, "Potential for High Resolution Systematic Global Surface Soil Moisture Retrieval via Change Detection Using Sentinel-1," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 4, pp. 1303-1311, Aug. 2012, doi: 10.1109/JSTARS.2012.2190136.

Mondal, P., McDermid, S. S. (2021). Editorial for special issue: “global vegetation and Land Surface Dynamics in a changing climate.” *Land*, 10(1), 45. <https://doi.org/10.3390/land10010045>

Rasporenko, T., Liashenko, D. (2023). Assessing the impact on landslide-prone areas on property valuation in Kyiv: A case study. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. doi:10.3997/2214-4609.2023500029

Vreugdenhil, M.; Navacchi, C.; Bauer-Marschallinger, B.; Hahn, S.; Steele-Dunne, S.; Pfeil, I.; Dorigo, W.; Wagner, W. (2020). Sentinel-1 Cross Ratio and Vegetation Optical Depth: A Comparison over Europe. *Remote Sens.* 2020, 12, 3404. <https://doi.org/10.3390/rs12203404>

Алексеев, Ю. Н. (2007). Инженерно-геологическое районирование территории Киевской области для мелиоративного строительства масштаба 1:200 000. *Геологический отчет*. С. 48-128. К.: ЦТЭ.

Барабаш, М. Б., Татарчук, О. Г., Гребенюк, Н. П., Корж, Т. В. (2015). Кліматичні дані по м. Києву. URL: http://uhmi.org.ua/conf/climate_changes/presentation_pdf/poster_1/Tatarchuk_Grebenuk.pdf

Демчишин, М. Г. (1992). Современная динамика склонов на территории Украины. Киев: Наук. думка.

Демчишин, М. Г. (1994). Сучасна динаміка схилів на території України (інженерно-геологічні та екологічні аспекти). *Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук*, спец. 11.00.11 – "Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів". Івано-Франківськ.

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

Демчишин, М. Г., Краєв, В. Ф. (1984). Оползни: Природа состава и свойств грунтов и связанных с ними геодинамических процессов. Киев: Наук. думка.

Демчишин, М. Г., Кріль, Т. В. (2014). Стан яружних систем правобережного схилу Дніпра в межах об'єктів історико-культурної спадщини м. Київ. *Геологічний журнал*, 2, 85-93.

Демчишин, М. Г., Лапинський, В. П. (1979). Проявление экзогенных геологических процессов в рельефе Киевского плато на современном этапе. *Інженерно-геологічні властивості ґрунтів і характеристики геодинамічних процесів* (с. 32-39). Киев: Наук. думка.

Державна геологічна карта України, масштаб 1:200 000. Аркуш М- 36-ХІІІ (Київ). (2001). К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, Північне державне регіональне геологічне підприємство «Північгеологія»: іл. – 78 с.

Державна геологічна карта України, масштаб 1:200 000. Дніпровсько-Донецька серія. Аркуш: М-36-ХІV (Переяслав-Хмельницький). – Київ: Державна геологічна служба, Північне державне регіональне підприємство «Північгеологія», 2009 – 92 с.

Державна геологічна карта України, масштаб 1:200 000. Центральноукраїнська серія. Аркуші: М-36-ХІХ (Біла Церква). – Київ: Державна геологічна служба, Північне державне регіональне підприємство «Північгеологія», 2006 – 165 с.

Карта розривних порушень та основних зон лінеamentів Північного-заходу СРСР Масштаб 1:1000000, (1988). За ред. М.О. Крилова. Міннафтопром, Мінгео СРСР, АН СРСР.

Колтун, О. В. (2006). Вступ до геоморфології. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.

Кондратюк, С. В. (2006). Інженерно-геологічне довивчення території Київської, Чернігівської, Житомирської та Закарпатської областей з метою геологічного обґрунтування протизсувних заходів та геологічного забезпечення УІАС НС: *Геологічний звіт*. К.: ПДПП "Північгеологія", 223 с.

Краєв, В. Ф. (1971). Инженерно-геологическая характеристика пород лессовой формации Украины. Киев: Наук. Думка.

Кріль, Н. В. (2015). Техногенні динамічні впливи на геологічне середовище міста. Київ: Наукова думка, 159 с.

Ліщенко, Л. П., Пазинич, Н. В., Терemenko, О. М. (2014). Використання багатозональних космічних знімків при дослідженні зсувних процесів на території Києва. *Космічні дослідження в Україні*. 2012-2014, 112–115.

Ліщенко, Л. П., Пазинич, Н. В., Терemenko, О. М. (2014). Дослідження зсувних процесів на території м. Києва в режимі дистанційного моніторингу. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*, №2, 18–28.

Ліщенко, Л.П., Пазинич, Н.В., Філіпович, В.Є. (2017). Супутниковий моніторинг розвитку зсувних процесів у Придніпровській зоні м. Київ. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2017, Вип. № 15. С.11-22. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2017.15.111>

Матвеев П. (2014). До питання прогнозування ерозійних процесів ґрунтів. *Землевпорядний вісник*, № 2. С. 25-28.

Міністерство регіонального розвитку України. (2010). Інженерний захист територій, будинків, будівель та споруд від зсувів та обвалів. *ДСТУ-Н Б В.1.1-XX:201X* [Проект, перша редакція]. Режим доступу: <http://www.niisk.com/images/5689.pdf.pdf>

Палієнко, В. П. (1989). Геоморфологічні критерії кореляції ендегенних режимів на території України. *Проблеми геоморфологічної кореляції* (с. 201-208). М.: Наука.

Палієнко, В. П. (1995). Еволюція рельєфу та проблема хрономорфологічних рубежів. *Фундаментальні географічні дослідження (стан, проблеми, напрямки)* (с. 137-138). Київ.

Палієнко, В. П. (1996). Кореляція неотектонічних подій в орогенному поясі України та суміжних територій. *Укр. геогр. журн.*, №4 (с. 14-20).

Палієнко, В. П. (2008). Геоморфологічні режими як результат взаємодії глобальних геосистем. *Географія в інформ. суспільстві. Зб. наук. праць* (с. 218-221). Київ. ВГЛ. Обрії.

Палієнко, В. П. (2010). Ендодинамічний фактор організованості геоморфосистем. *Геоморфологічні системи: властивості, ієрархія, організованість* (с. 61-66). М.: Медіа-ПРЕСС.

Палієнко, В. П. (2012). До проблеми змінності - стійкості геоморфосистем. *Україна: географія цілей та можливостей. Зб. наук. праць*. (с. 240-243). Н.: ФОП «Лисенко М.М.».

Портал «Природа України» URL: <https://geomap.land.kiev.ua/zoning.html>

Рудько, Г. І. (1996). Геоєкологічний аналіз гірничопромислових природно-техногенних систем Західної України та проблем їх оптимізації. *Геоєкологічні дослідження екосистем України*, 12–17. Київ-Чернівці: Букрек.

Рудько, Г. І. (2002). Аналіз основних прорахунків при вивченні небезпечних геологічних процесів після їх масової катастрофічної активізації в 1998-2001 рр. в Карпатському регіоні України. *Вплив руйнівних повеней та зсувних процесів на функціонування інженерних мереж: матеріали третьої науково-практичної конференції*, 25-28 лютого 2002р., 6-7.

Рудько, Г. І., Адаменко, О. М. (2008). Конструктивна геоекологія: наукові основи та практичне втілення. Чернівці: Маклаут.

Рудько, Г. І., Шута, Р. З. (2002). Небезпечні геологічні процеси Карпатського регіону. *Методологія попередження їх негативних наслідків. Вплив руйнівних повеней та зсувних процесів на функціонування інженерних мереж: матеріали третьої науково-практичної конференції, 25-28 лютого 2002р., 6-7.*

Самойленко, Л. В. (2003). Інженерно-геологічні умови Правобережного схилу долини Дніпра в районі Києва. *Дис. робота канд. геол. н. ІГН НАНУ. Київ.*

Старостенко, В. В., Баран, П. І., Барщевський, Н. Є. (2001). Київ: геологія, геофізика, окружающая среда и факторы на нее влияющие. *Геофиз. журн.*, 23(4), 3-38.

Стецюк, В. В., Ткаченко, Т. І. (2003). Концепція і принципи еколого-геоморфологічного районування (на прикладі центральної частини Придніпровської височини). *Фізична географія та геоморфологія*, Вип. 45, 87–99.

Теременко, О. М. (2005). Оцінка природно-техногенних процесів в межах міста Києва, що потребують інженерного захисту (з використанням матеріалів дистанційних зйомок). *Звіт з НДР, ЦАКДЗ ІГН НАНУ*, 84 с.

Філіпович, В. Є., Мичак, А. Г., Ліщенко, Л. П. та ін. (2014). Методологія екологічного моніторингу в умовах сучасної трансформації урбанізованих територій на основі новітніх супутникових технологій дистанційного зондування Землі. *Звіт про НДР за 2010–2014 рр. (заключний). ЦАКДЗ ІГН НАНУ, Геоінформ, УкрНТІ, Київ. 356 с.*

Філіпович, В. Є., Приходько, В. Л., Тарангул, Д. О. (2002). Особливості комплексування дистанційних та традиційних геологічних методів при пошуках кольорових металів. *Космічна наука і технологія*, 8(2/3), 170–173.

Ясь, П. Н. (1984). Ежегодник по инженерно-геологическим исследованиям прибрежной зоны Каневского водохранилища за 1981–1983 гг: *Геологический отчет. Вышгород.*

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДИСТАНЦІЙНОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ ПРАВОБЕРЕЖЖЯ КАНІВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Методика дистанційного геоєкологічного моніторингу базується на використанні даних обробки супутникових знімків та геолого-географічних даних про ділянку дослідження. Регулярне проведення дистанційного геоєкологічного моніторингу дозволяє виявляти найбільш критичні ділянки, вчасно реагувати на небезпеку та попереджати розвиток зсувів із збереженням природного стану екосистем.

Застосування комплексу методів, включаючи радарну інтерферометрію, геоморфологічний аналіз, метод класифікування та методи визначення індексів за спектрами відбиття в оптичних діапазонах дозволить створити карту сприйнятливості території до зсувів, враховуючи літологічні та антропогенні фактори для більш точного аналізу стійкості ґрунтового покриву до розвитку зсувних процесів.

Першим етапом розробки методики дистанційного геоєкологічного моніторингу є обчислення вертикальних зміщень земної поверхні та побудова карто-схеми їх розподілу в межах території дослідження. Алгоритми надають необхідну інформацію про операції отримання карти сприйнятливості території до зсувів на основі супутникових даних за допомогою розрахункових схем, що реалізують розроблену методику.

3.1 Алгоритм розрахунку вертикальних зміщень земної поверхні за методом радарної інтерферометрії

Метод радарної інтерферометрії з диференціальною синтетичною апертурою (DinSAR) є способом активного дистанційного зондування, який дозволяє досліджувати явища деформації земної поверхні з точністю до сантиметрів (*Hansen, 2001, Stankevich et al., 2020*).

Зокрема, в дослідженні автором використовується різниця фаз між двома SAR-зображеннями на основі згенерованої за даними радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1 інтерферограми.

Точність визначення просторового розміщення кожної точки поверхні або цілі залежить від шумів, що впливають на спостережувані показники, та від достовірності інформації про характеристики знімальної системи, (Goldstein, 1995).

Найбільш чутливими є параметри базової лінії, що вказує на конфігурацію супутника, оскільки незначна зміна фазового центру (точки, де фаза відбитого сигналу об'єкту має однакове значення, на двох різних знімках) суттєво впливає на створену інтерферометричну фазу (Wang, 2021). На зворотній сигнал розсіювання впливають: інтенсивність розчленування рельєфу досліджуваної території (Yelistratova et al., 2023), тобто щільність ураження території ерозійними формами, тип рослинності (Apostolov et al., 2023), ступінь зволоження поверхні (Khodorovskiy et al., 2023), характер пухких відкладів (Krill, Shekhunova, 2019).

Для обробки даних супутникової радіолокаційної інтерферометрії використовувалося програмне забезпечення Sentinel Application Platform (SNAP) з відкритим вихідним кодом, надане ESA (<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>).

Радіолокаційні знімки супутника Sentinel-1, що використані у дослідженні, підібрано з урахуванням параметрів орбіти, напрямку знімання супутника, часових характеристик та значень базової лінії. Для зменшення ризику часової декореляції інтерферометричної фази час між отриманням першого та другого космічного знімку є найкоротшим.

Відстань між положенням супутника на момент отримання зображення має становити від 300 до 500 метрів. Для створення інтерферограми, використано радарні продукти Single Look Complex (SLC) з часовою різницею 12 днів, у низхідній геометрії, для визначення вертикальних змін земної поверхні, за весняний період з 2015 по 2023 років.

Кожне радарне зображення (SAR) містить дві основні характеристики: фазу та амплітуду. Фаза містить інформацію про відстань від датчика до цілі, яка використовується для вимірювання руху земної поверхні у часі. Амплітуда пов'язана з енергією відбитого розсіяного сигналу та використовується для виявлення зміщень ґрунту.

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

Алгоритм 3.1. Створення карто-схеми вертикальних зміщень.

Крок 1. Вибір радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1, з урахуванням параметрів орбіти, напрямку знімання супутника, часових характеристик та значень базових ліній.

Крок 2. Виконання корекції знімків відповідно до орбітальних параметрів (*Gray et al., 2000*), а також вилучення для подальшого дослідження смуги радарного знімку, що містить область дослідження.

Крок 3. Виконання кореєстрації зображень та створення стеку, в якому кожен піксель має однакові координати.

Крок 4. Підвищення спектральної яскравості радарного зображення з метою отримання коректної інтерферограми.

Крок 5. Формування інтерферограми (*Bawar et al., 2005*) шляхом визначення різниці фаз знімків. Фаза, пов'язана з топографією поверхні, виключається з розрахунків для отримання інтерферограми з виокремленою топографічною фазою.

Крок 6. Застосування алгоритму TOPS Deburst та отримання вихідної інтерферограми.

Крок 7. Видалення топографічної фази.

Крок 8. Застосовування модуля Multilooking (*Ferretti, 2007*), який включає усереднення значень в сусідніх пікселях зображення. Модуль Multilooking використано для дослідження великих площ, оскільки він значно скорочує час розгортки фази та інших розрахунків. Якщо потрібно зафіксувати деталі зсувів на невеликій площі, то застосовувати модуль Multilooking недоцільно.

Крок 9. Застосування фільтраційного методу Гольдштайна. Цей крок дозволив отримати відфільтровані значення (*Goldstein and Werner, 1998*), з видаленими помилковими спалахами, для коректного відображення відношення сигнал/шум.

Крок 10. Експорт інтерферометричної фази для використання програмним модулем SNAPHU.

Крок 11. Розгортка інтерферометричної фази (*Chen and Zebker, 2002*), використовуючи середовище програми SNAP.

Крок 12. Імпорт даних з модуля SNAPHU.

Крок 13. Трансформація отриманих значень фазової різниці (в радіанах) у фізичні величини (в метри). Методика побудови карти вертикальних зміщень ґрунтується на застосуванні даних розгорнутої інтерферометричної фази їх переведення із радіан в метри.

Переведення фазової різниці інтерферограми (*Peltzer, Rosen, 1995*) до вертикальних зміщень (3.1) здійснюється за допомогою наступного рівняння:

$$d = - \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi_d \quad (3.1)$$

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

З урахуванням особливостей досліджуваної ділянки абсолютні значення вертикальних зміщень отримані автором за формулою (3.2):

$$\Delta z = \frac{0.056 * Unw_{Phase\ ifg}}{-4 * \pi * \cos(rad(incident\ angle))} \quad (3.2)$$

де $Unw_{Phase\ ifg}$ – отримані значення розгорнутої фази, $incident\ angle$ – кут нахилу супутника, 0.056 – значення довжини хвилі Sentinel-1 в метрах, результати виконання опубліковано (*Орленко, 2023a*).

Крок 14. Маскування областей низької когерентності. Коефіцієнт 0,3 є мінімальним для застосування фільтрації, оскільки відповідає рослинним та водним об'єктам в межах досліджуваної ділянки. З метою аналізу сигнатур отриманих значень вертикальних зміщень на зображенні інтерферограми, відношення сигнал/шум автором збільшено до 0,5 та відкинуте значення когерентності менше 0,3 (*Орленко, 2023б*). Оскільки вони відповідають за відбиття рослинності на знімку, частково воду та неверифіковані пікселі, до того ж тестова ділянка – це досить заліснений берег Канівського водосховища.

Крок 15. Вибір ділянок, для яких зміщення дорівнюють нулю. Це поля, що не обробляються з 2013 року та мають сталу густину рослинності під час весняного періоду. Проведення повторної корекції результатів вже з урахуванням значень на цих ділянках. Відстані на радарних зображеннях спотворюються через топографічні варіації зображень та нахил осі огляду датчика супутника. Корекція рельєфу компенсує ці спотворення. Отримане геометрично скореговане зображення максимально наближене до реальної земної поверхні.

Крок 16. Геометрична корекція результату.

Крок 17. Визначення величини зміщень в кожній дослідній точці за допомогою експорту даних у векторному форматі до ГІС.

Крок 18. Експорт результуючого зображення вертикальних зміщень.

Покроковий алгоритм створення *карто-схеми вертикальних зміщень земної поверхні* описується схемою на рис. 3.1.

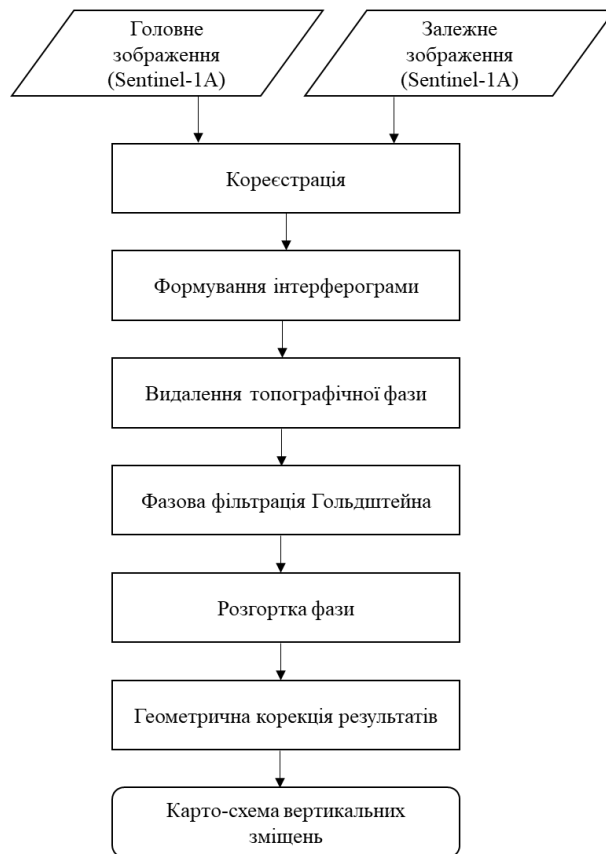


Рис. 3.1. Схема алгоритму створення карто-схеми вертикальних зміщень земної поверхні (Орленко, 2023а)

За результатами інтерферометричної обробки ретроспективних радарних даних усієї зони дослідження отримано характеристики деформацій земної поверхні, а саме значення вертикальних зміщень земної поверхні за 2015-2023 роки.

3.2 Аналіз геолого-геоморфологічних факторів активізації зсувних процесів

Основними факторами, що обумовлюють та сприяють розвитку зсувних процесів на правобережжі Канівського водосховища є тектонічний фактор, зокрема неотектоніка регіону, літологія осадових відкладів, топографічні особливості, що сприяють розвитку екзогенних ерозійних форм рельєфу та перепаду абсолютних висот, крутизна схилів ярів та берегів водосховища.

За польовими даними, висвітленими у літературних джерелах (*Інформаційний щорічник, 2017, 2021*) створена *карто-схема ураженості території зсувними процесами*. Першим етапом створення карто-схеми є завантаження історичних, геологічних даних, що виступають джерелом інформації про ураженість території ЕГП, зокрема зсувами.

На геометрично прив'язаному зображенні, виділено ділянки дослідження, виконано компонування та обрізку растрових даних. Наступним етапом створюється тематичний шар проекту з винесенням зсувнобезпечних ділянок.

Загальну схему створення карто-схеми ураженості території зсувними процесами наведено на рис. 3.2.

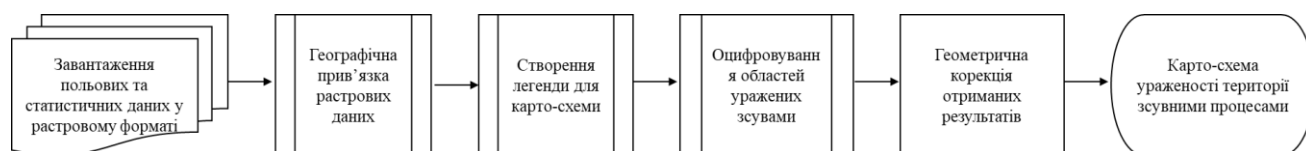


Рис. 3.2 Загальна схема створення карто-схеми ураженості території зсувними процесами

Геоморфологічні дослідження території включають дві групи методів геолого-геоморфологічні та структурно-морфометричні. В дослідженні правобережжя Канівського водосховища автором використано структурно-морфометричні методи для аналізу тектогенезу та морфогенезу, що дає можливість побудувати: карто-схему крутизни схилів; карто-схему щільності лінеamentів та карто-схему базисних поверхонь.

Важливим фактором, що впливає на розвиток, активізацію і затухання зсувних процесів є літологічний склад осадової товщі дочетвертинного, четвертинного віку та характеристики сучасного ґрунтового покриву. Ці дані отримані з карт масштабу 1:200 000 (*Держгеокарта, 1973, 2001, 2006*), шляхом оцифровування створена *карто-схема літологічних різностей* осадової товщі території досліджень.

З використанням геолого-геоморфологічних методів створено карто-схему літологічних різностей.

Алгоритм 3.2. Створення карто-схеми літологічних різностей.

Крок 1. Завантаження даних геологічної карти, яка містить інформацію про розташування різних геологічних формацій та порід на досліджуваній території.

Крок 2. Географічна прив'язка зображення. Використовуючи геодезичні координати та точки прив'язки, здійснюється географічна прив'язка геологічної карти до географічної системи координат.

Крок 3. Виділення ділянки дослідження, компонування та обрізка растрових даних з Державної геологічної карти України.

Крок 4. Оцифровування контурів залягання порід на обраній ділянці, шляхом створення шейп-файлів для кожного шару гірських порід.

Крок 5. Групування в один клас конкретного шару геологічних порід (наприклад глина, пісок) та присвоювання кожному із класів числового коефіцієнту, враховуючи сприйнятливість гірської породи до розвитку зсувів та присвоєння відповідних кольорів.

Покроковий алгоритм створення карто-схеми літологічних різностей описується схемою на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Схема алгоритму створення карто-схеми літологічних різностей

Для обробки та аналізу даних SRTM використовується програмне забезпечення QGIS. Для побудови *карто-схеми крутизни схилів* застосовано модуль “Slopes”, який є у додаткових функціях програми.

Загальна схема побудови карто-схеми крутизни схилів досліджуваної території наведена на рис. 3.4. Значення крутизни розділено на 5 діапазонів від найнижчого кута нахилу поверхні до найвищого.

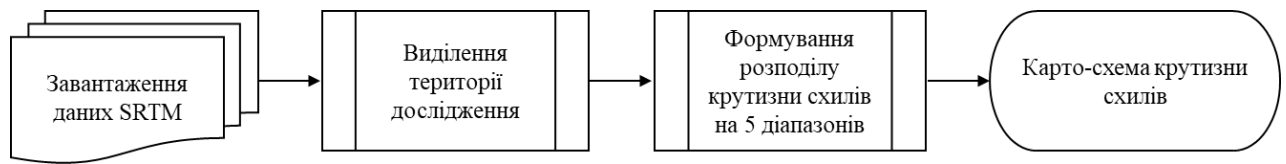


Рис. 3.4. Загальна схема створення карто-схеми крутизни схилів досліджуваної території

Найкраще використовувати дані Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), отримані у 2000 році (<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm>). Глобальна цифрова модель рельєфу має просторову розрізненність 30 метрів, охоплюючи більшу частину світу з абсолютною точністю вертикальної висоти менше 16 метрів. Моделі рельєфу на основі SRTM використано для середньомасштабних досліджень (Farr et al., 2007).

За результатами проведення інтерактивного дешифрування цифрової моделі рельєфу у комплексі з даними топографічних карт для визначення зон розущільнення, тектонічної нестабільності, геофлюїдопроникності отримано карто-схему щільності лінеаментів (Nag, 2005, Ni et al., 2016, Popov et al., 2021) досліджуваної території.

Алгоритм 3.3. Створення карто-схеми щільності лінеаментів

Крок 1. Підготовка геологічних даних досліджуваної території.

Крок 2. Візуальне дешифрування лінеаментів та нанесення їх на тематичний програмний шар.

Крок 3. Побудова карти щільності вузлів лінеаментів або “тектонічної напруженості” здійснюється шляхом підрахунку вузлів перетину лінеаментів у елементарному вікні за формулою (3.3), шляхом алгебраїчної суми лінеаментів із розрахунку на 1 кв км.:

$$T_s = \frac{c}{s} = n - \frac{l}{s}, \quad (3.3)$$

де T_s – щільність лінеаментів, c – кількість лінеаментів на одиницю площі або довжини, s – середня відстань між лінеаментами, n – кількість лінеаментів на певній ділянці, l – довжина лінеаментів.

Загальна схема побудови карто-схеми щільності лінеamentів наведена на рис.

3.5.

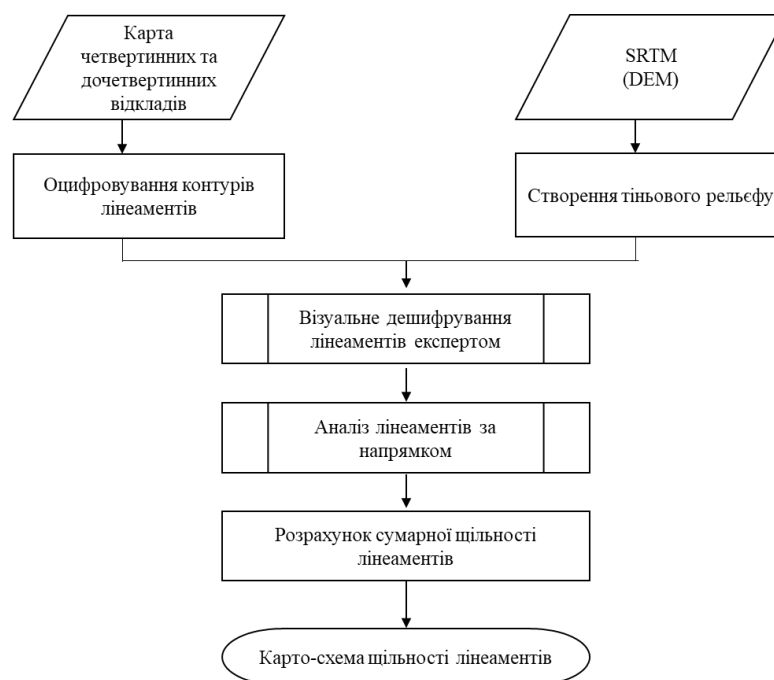


Рис. 3.5. Схема алгоритму створення карто-схеми щільності лінеamentів

Ще одним з підходів структурно-морфометричного аналізу є побудова *карто-схеми базисних поверхонь* (Ivanik et al., 2020), які являють собою складні поверхні, що проходять через тальвеги долин та об'єднують місцеві базиси ерозії і представляють узагальнену схему повздовжніх профілів ярів та річок, алгоритм створення якої наведено на рис. 3.6.

Побудова карто-схеми базисних поверхонь (Орленко, 2023б) для досліджуваного регіону виконувалася на основі карт порядків долин третього та четвертого порядку водотоків в програмному середовищі ArcGisPro, які відповідають саме за формування ерозійних форм правобережжя Канівського водосховища.

Алгоритм 3.4. Створення карто-схеми базисних поверхонь.

Крок 1. Проведення аналізу геолого-геоморфологічних параметрів досліджуваної території.

Крок 2. Завантаження та попередня обробка топографічних даних та даних ДЗЗ.

Крок 3. Визначення порядків долин та порядків вододілів із застосуванням гідрографічного інструменту "Strahler Order" або "Horton Order" для визначення порядку водотоків.

Крок 4. Створення карто-схеми базисних поверхонь, на основі даних долин 3-го порядку водотоків.

На рис. 3.6. показано схему алгоритму аналізу структурних особливостей правобережжя Канівського водосховища, створення карто-схеми базисних поверхонь.



Рис. 3.6. Схема алгоритму створення карто-схеми базисних поверхонь

Долини першого та другого порядку не були залучені до аналізу через їхню невелику довжину і розвиток переважно у пухких лесових покривах, а отже слабкий зв'язок з тектонічною тріщинуватістю геологічного субстрату.

3.3 Аналіз біофізичних факторів активізації зсувних процесів за даними дистанційного зондування Землі

Значення поверхневої вологості впливають на стабільність ґрунту. Сухий або насичений водою ґрунт має різні механічні властивості, що визначають здатність опору зсувним процесам. Підвищений рівень вологи спричиняє зсуви через збільшення маси гірської породи, розмивання ґрунтового покриву, та знижену міцність ґрунтової маси. Переважна частина зсувів виникає через перенасиченість вологою ґрунтових мас, яка може бути спровокована інтенсивними опадами.

В дослідженні використано продукт сервісу Copernicus Global Land Service, створений на основі даних Sentinel-1. Вхідні значення зворотного розсіювання SAR для Sentinel-1 С-діапазону є геометрично скорегованими та радіометрично каліброваними. Відносна поверхнева вологість ґрунту, у % насичення, виводиться шляхом лінійного масштабування нормованого за кутом зворотного розсіювання між найнижчими/найвищими значеннями в кожному місці.

Поверхнева вологість ґрунту (SSM) визначає відносний вміст води у верхніх кількох сантиметрах ґрунту та надає інформацію про ступінь насиченості ґрунту водою. Це дозволяє вивчити вплив опадів та стану ґрунту на екзогенні процеси.

Першим етапом отримання карти вологості ґрунту є вибір даних в межах території дослідження. Для ділянки правобережжя Канівського водосховища дослідження проводиться в ранньо-весняний період, сніговий покрив під час якого відсутній, а рослинність має низьку щільність, тобто дані продукту SSM з просторовою розрізненністю 1 км. Наступним етапом є інтерполяційна обробка даних, розмір пікселя 10 м, зі збереженням значень відсоткового співвідношення вологи. На рис. 3.7. наведено загальну схему створення *карти вологості ґрунту*.

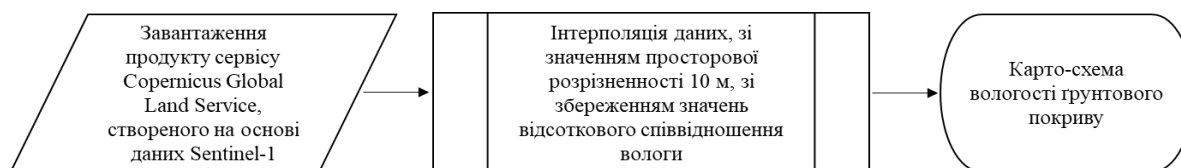


Рис. 3.7. Загальна схема створення карти вологості ґрунту

Загальна схема створення *карто-схеми класифікації земного покриття за використанням* включає такі етапи:

- здійснення обробки даних космічних знімків супутника Sentinel-2 в хмарному сервісі Google Earth Engine з метою підвищення достовірності обробки.
- визначення географічної області для аналізу зсувів та завантаження необхідні супутникові знімки (*Lubskyi et al., 2022*).
- використання керованого алгоритму класифікації земної поверхні, з врахуванням геоморфологічних та гідрологічних параметрів досліджуваної ділянки.
- ранжування результатів класифікації для визначення ступеню впливу класу земної поверхні на розвиток зсувів.

На рис. 3.8 наведено загальну схему створення *карто-схеми класифікації земного покриття за використанням*.

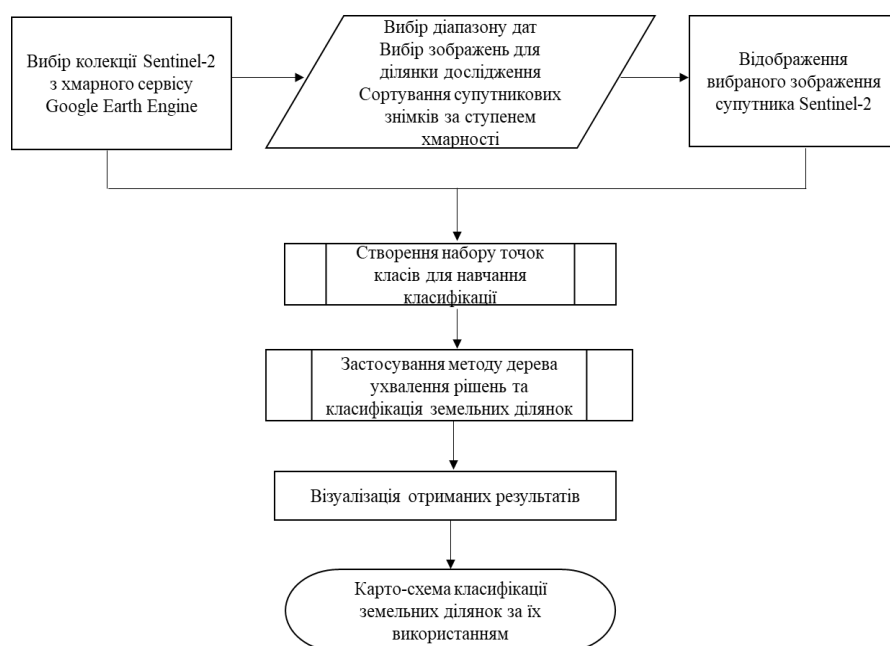


Рис. 3.8 Загальна схема створення *карто-схеми класифікації земного покриття за використанням*

Загальна схема створення *карто-схеми розподілу індексу NDVI* складається з етапів:

- здійснення обробки даних космічних знімків супутника Sentinel-2 в хмарному сервісі Google Earth Engine з метою підвищення достовірності обробки;
- розрахунок індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index);

індекс NDVI (3.4) розраховано за формулою:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}, \quad (3.4)$$

де ρ_{NIR} – оптичне відбиття земної поверхні у ближньому інфрачервоному діапазоні, ρ_{Red} – в червоному діапазоні;

- використання індексу NDVI як індикатору для визначення поширення зсувів, оскільки вони пов’язані зі змінами в рослинному покриві та станом ґрунту;
- врахування гідрометеорологічних параметрів, таких як опади та вологість ґрунту, порівняння їх із значеннями NDVI, та оцінка отриманих результатів.

Збільшення або зменшення NDVI протягом певного періоду може вказувати на динаміку зсувних процесів. Наприклад, раптове зниження NDVI після стабільного періоду свідчить про наявність зсуву та збільшення антропогенного впливу на довкілля (Лялько, 2023).

Загальну схему створення карто-схеми розподілу індексу NDVI, з використання сервісу хмарної обробки даних GEE наведено на рис. 3.9.

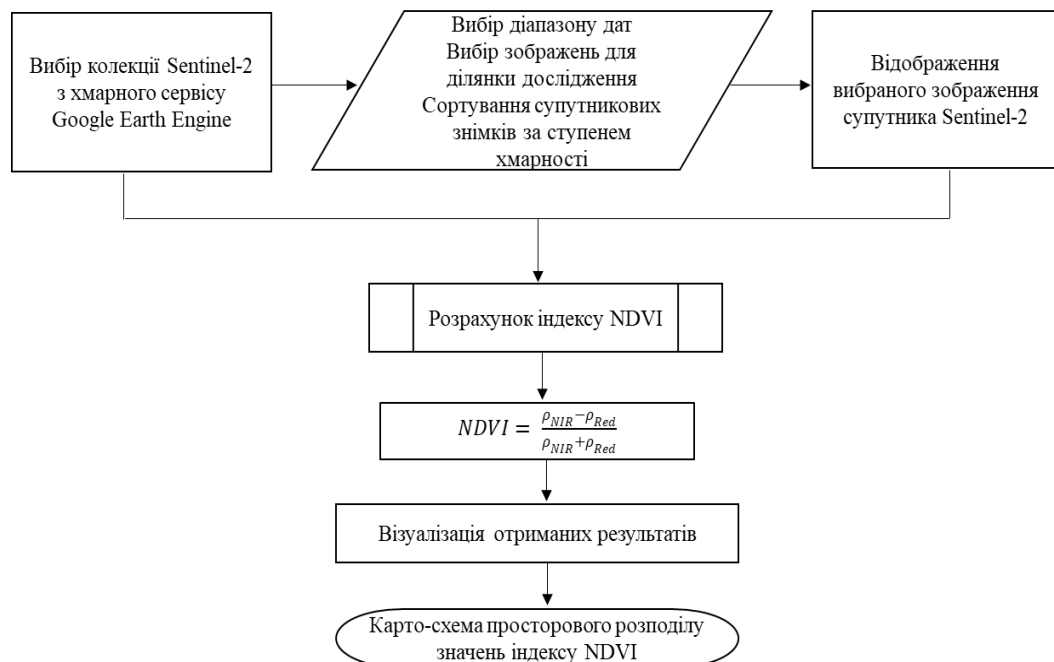


Рис. 3.9. Загальна схема створення карто-схеми розподілу індексу NDVI, з використання сервісу хмарної обробки даних GEE

Біофізичні фактори (параметри) визначаються виключно за матеріалами дистанційного знімання та оброблення відповідних даних, що є відмінною особливістю розробленої методики дистанційного геоекологічного моніторингу.

3.4 Застосування методу аналізу ієрархій при створенні карти сприйнятливості території до зсувів

Для картографування сприйнятливості території до зсувів використовуються детерміновані моделі та імовірнісні підходи, які враховують співвідношення умов довкілля на сучасному етапі їх розвитку та у майбутньому. Наявна геологічна інформація про регіон дослідження є основою оцінювання експертом зсувів та визначення основних факторів їх активізації.

Для досягнення поставленої мети, тобто для отримання формалізованої багатокритеріальної оцінки зазначених факторів впливу на розвиток зсувів використано аналітичний ієрархічний процес, який застосовано у методі аналізу ієрархій (MAI) (Saaty, 2001; Saaty, 2008). Аналіз при вивченні зсувів на правобережжі Канівського водосховища базується на трьох принципах: декомпозиція, порівняльне судження та синтез пріоритетів.

MAI був розроблений Т. Сааті (Saaty 1987) для моделювання взаємозв'язків між окремими складовими частинами задачі прийняття рішення за допомогою ієрархічної структури з наступним визначенням ваг або пріоритетів альтернатив рішень відносно елементів цієї структури.

Основні етапи методу аналізу ієрархій:

Етап 1. Побудова ієрархічної структури задачі.

Побудова ієрархічної мережі починається з вершини, тобто цілі аналізу, через проміжні рівні (критерії за якими здійснюється порівняння варіантів) до нижнього рівня (перерахування альтернатив)

Етап 2. Визначення пріоритетів елементів ієрархічної структури.

Після побудови ієрархічної системи необхідно скласти матриці попарних порівнянь для відображення впливу видів інформації першого рівня ієрархії на

нульовий рівень, а також для парних порівнянь кожної альтернативи на другому рівні стосовно першого рівня і т.д.

Елементи матриць заповнюються експертними оцінками про відносну важливість порівнюваних окремих елементів стосовно мети визначеної на вищому рівні, відповідно до прийнятої шкали оцінок (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Оцінка ступенів важливості критеріїв моделі (Saaty, 1977)

Ступінь важливості	Значення	Пояснення
1	однакова важливість	Дві альтернативи однаково поставлену мету
3	слабка перевага	Досвід і судження експерта дозволяють в незначній мірі віддати перевагу одній альтернативі над іншою
5	сильна перевага	Досвід і судження експерта дозволяють віддати перевагу одній альтернативі над іншою
7	очевидна (дуже сильна) перевага	Одна альтернатива очевидно переважає над іншими
9	абсолютна перевага	Докази, які свідчать про перевагу однієї альтернативи над іншою, мають найвищий можливий порядок підтвердження
2,4,6,8	проміжні значення	Коли потрібен компроміс між двома сусідніми судженнями

Матриця попарних порівнянь заповнюється за правилами наведеними в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Матриця попарних порівнянь (Saaty, 1977)

	A_1	A_2	....	A_i	....	A_n
A_1	1	s_1/s_2	....	s_1/s_i	....	s_1/s_n
A_2	s_2/s_1	1	....	s_2/s_i	....	s_2/s_n
....
A_j	s_j/s_1	s_j/s_2	....	s_j/s_i	....	s_j/s_n
....
A_n	s_n/s_1	s_n/s_2	....	s_n/s_3	....	1

де A_1, A_2, \dots, A_n , – параметри, що становлять ієрархічний рівень; s_i/s_j - відношення абсолютних пріоритетів s_i, s_j , i -го і j -го параметрів; n - число критеріїв, порівнюваних на даному рівні.

Етап 3. Знаходження вектору пріоритетів.

Для обчислення компонент власного вектора матриці та для зручності подання подальших міркувань матриці парних порівнянь, що завжди є квадратними і обернено симетричними, записана у вигляді: $\|a_{ij}\|$,

$$a_{ji} = 1/a_{ij}, \quad (3.5)$$

де $a_{ij} = s_i/s_j$; $i, j = 1, \dots, n$ число критеріїв, які порівнюються на кожному рівні.

Компоненти власного вектора матриці обчислюються відповідно до виразів

$$a_1 = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{1j}}; \dots; a_n = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{nj}} \quad (3.6)$$

Із одержаних груп матриць визначаються оцінки вектора локальних пріоритетів K_1, \dots, K_n :

$$K_1 = a_1 / \sum_i a_i; \dots; K_n = a_n / \sum_i a_i \quad (3.7)$$

Після отримання компонентів власного вектора для всіх n рядків матриці відповідно до виразів (2), вони використовуються для подальших розрахунків.

Обробка матриць чотирьох рівнів відповідно до виразів (3.6) і (3.7) дає можливість обчислити вектори пріоритетів K^1, K^2, K^3 і K^4 відповідних рівнів, компоненти якого визначають їхні пріоритети з погляду експерта.

Етап 4. Оцінювання узгодженості (однорідності суджень експертів).

Одночасно з матрицею парних порівнянь виконується оцінка ступеня відхилення від узгодженості отриманих локальних пріоритетів шляхом обчислення індексу узгодженості (ІУ). Індекс узгодженості в кожній матриці і для всієї ієрархії може бути приблизно обчислений за формулою (3.8):

$$IU = \left(\sum_{i=1}^n K_i \sum_{j=1}^n a_{ij} - n \right) / (n-1) \quad (3.8)$$

Ця величина порівнюється з тією, котра була б при випадковому виборі кількісних суджень.

Етап 5. Ієрархічний синтез.

Після заповнення експертом матриці парних порівнянь, необхідно провести перевірку індексу узгодженості (ІУ) матриці. Для цього за формулою (3.8) розраховується ІУ матриці і порівнюється із середнім індексом узгодженості випадкових матриць того ж порядку. Співвідношення цих індексів називається відношенням узгодженості.

Для шкали експертних оцінок 1:9 розраховані стандартні значення випадкових ІУ для обернено симетричних матриць, взяті за основу при аналізі отриманих матриць на предмет узгодженості. У своїх роботах Т. Сааті вважає прийнятним значення відношенням узгодженості менше або рівне 0,1.

Якщо отримані всі необхідні вагові коефіцієнти, то формула згортки узагальненого критерію для порівнюваних критеріїв має вигляд:

$$F = \sum_l K_l^1 \sum_m K_m^2 \sum_r K_r^3 \sum_c K_c^4 \cdot x_c^b \quad (3.9)$$

де верхній індекс критеріального пріоритету позначає рівень ієрархії, а нижній – індекс сумування на відповідному рівні; x_c^b - коефіцієнт переваги варіанта c за показником b .

Перевагами застосування цього методу є (*Fedorovsky et al., 2013; Khyzhnyak et al., 2017*):

- відображення реальної ситуації прийняття рішень для формування структури моделі ухвалення рішення;
- формування структури моделі ухвалення рішення в МАІ є трудомістким процесом, результатом якого є детальне уявлення про взаємодію факторів, що впливають на пріоритети альтернативних рішень;
- збір даних для підтримки прийняття рішення здійснюється з допомогою процедури попарних порівнянь та процесу перегляду результатів;
- універсальність схеми застосування методу;
- можливість кількісного вираження ступеню переваг за допомогою системи рейтингів, що сприяє встановленню ступеня довіри до отриманого результату.

До недоліків МАІ відносяться:

- метод надає лише спосіб ранжування альтернатив, але не має внутрішніх засобів для інтерпретації рейтингів;

- метод дозволяє «зважити» у єдиній шкалі переваги та недоліки розглянутих альтернатив і отримати за кожною з них формалізовану узагальнюючу оцінку, яка є результатом оцінки експертом та базується виключно на його судженні та наявних даних дослідження (*Хижняк та ін., 2021, Томченко та ін. 2014*).

Застосування МАІ дозволило сформулювати задачу створення карти сприйнятливості території Ржищівської ОТГ до розвитку зсувів за ступенем небезпечності ділянки як системи ієрархічно пов'язаних факторів впливу, що провокують активний розвиток зсувних процесів.

3.5 Підходи до проведення польових досліджень

Тестові ділянки або полігони використовуються для створення та сертифікації методик розв'язання тематичних задач ДЗЗ. В межах дослідницьких полігонів відстежують зокрема природну та антропогенну трансформацію екосистем, перебіг надзвичайних ситуацій.

З метою апробації методики дистанційного геоекологічного моніторингу вибрано полігон в межах населених пунктів Витачів-Стайки. Основна кількість зареєстрованих зсувів знаходиться в межах трьох-п'яти кілометрової смуги корінного берегу, розчленованого порівняно густою та глибокою яружною сіткою. Зсуви цієї досліджуваної території пов'язані з двома горизонтам глин. З гідрофільними (*Ліщенко та ін. 2013, Ліщенко та ін. 2017*) бурими або строкатими глинами та суглинками, іноді з верхньою частиною товщі мергелю київської світи (*Беспалова, 2001*).

Полігон характеризується визначеними особливостями регіону, базуючись на типових фізико-географічних умовах регіону дослідження та значним рівнем зсувної небезпеки. Маючи однорідну ландшафтну структуру цей полігон може бути використаний для завірково-калібрувальних робіт радарних даних супутника Sentinel-1.

Досліджувана територія розчленована потужною яружно-балковою мережею, більша частина дніпровських схилів ускладнена зсувними формами та ерозійно-денудаційними явищами і має дуже хвилясту верхню бровку. Зсуви

району пов'язані з двома горизонтами глин – верхній це гідрофільні бурі та строкаті глини нижнього плейстоцену-міоцену, нижній складається з олігоцен-еоценових глин харківської та київської світ.

Найбільші за розмірною класифікацією зсуви мають складну двоярусну будову, серед яких зсуви-потоки фронтального та циркуподібного типу. Антропогенний вплив на досліджувану територію спричиняють кар'єри з видобутку глини та мергелю для функціонування цегельного виробництва.

Активізація зсувних процесів досліджуваного полігону відбувається за рахунок перезволоження ґрунтових мас та збільшення обсягів поверхневого стоку. Підвищений рівень антропогенного впливу видобувної діяльності та функціонування села Стайки спричиняє підвищення рівня зсувної небезпеки.

В часовому проміжку дослідження спостерігається змінна активізація одних ділянок з наступною стабілізацією та подальше перетворення ерозійно-аккумулятивного тіла.

Основна частина схилу східної експозиції поросла деревною рослинністю, внаслідок чого стабілізовані зсувні тіла складно дешифрувати візуально, вертикальні стінки відриву з відслоненнями спостерігаються лише з нижніх терас.

Територія полігону дослідження має типові для Правобережного Придніпров'я ландшафти, що в свою чергу поділяються на три типи:

- вододільні слабо хвилясті рівнинні території на сірих опідзолених та чорноземних малогумусних ґрунтах в межах лесового плато;
- потужна вироблена та вже стабілізована яружно-балкова мережа з переважаючою деревною рослинністю в межах лесового плато;
- корінні правобережні схили лесового плато, сильно ускладнені зсувами, залишковими частинами кар'єрів будівельної сировини, ерозійними врізами та флювіальними формами нижньої частини схилу.

Територія дослідження представлена природними та трансформованими людською діяльністю екосистемами. Частина земель займає агрокомплекс, включно з орними землями, пасовищами, перелогами, лісовим комплексом з

непридатними для використання у сільському господарстві землями, а також селітебним комплексом приватного сільського типу та транспортної мережі.

В межах дослідницького полігону визначено еталонні ділянки та тестові ділянки, для яких проведено періодичні польові спостереження, фізичні виміри, розрахунок вертикальних зміщень поверхні за даними радіолокаційної зйомки, оцінка зміни параметрів (приріст поверхні, кількість опадів, рівень вологості).

3.6 Розробка загальної методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища

Основним змістом методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища є визначення сприйнятливості території до зсувів. В рамках методики за дистанційними даними визначаються геологічні, геоморфологічні та біофізичні фактори стану досліджуваної території.

Алгоритм 3.5. Створення карти сприйнятливості територій до зсувів.

Крок 1. Створення карто-схеми вертикальних зміщень земної поверхні, ураженості території зсувними процесами з використанням методики диференціальної радарної інтерферометрії (*підрозділ 3.1*).

Крок 2. Створення карто-схеми крутизни схилів земної поверхні для оцінки вразливості досліджуваної ділянки до зсувів (*підрозділ 3.2*).

Крок 3. Застосування структурно-морфометричного аналізу.

Крок 3.1. Створення карто-схеми щільності лінеаментів для ідентифікації потенційних зсувонебезпечних зон (*підрозділ 3.2*).

Крок 3.2. Створення карто-схеми базисних поверхонь для вивчення структурних змін досліджуваної території для аналізу їх впливу на зсуви (*підрозділ 3.2*).

Крок 4. Створення карто-схеми літологічних різностей, з метою оцінки стійкості гірських порід до потенційних зсувів, визначення водопроникних і водотривких горизонтів за польовими дослідженнями попередніх років (*підрозділ 3.2*);

Крок 5. Створення карти вологості ґрунту для оцінки стабільності земної поверхні та її сприйнятливості до зсувів з огляду на вплив перезволожених ґрунтів на зсувні процеси (*підрозділ 3.3*);

Крок 6. Створення карто-схеми класифікації земного покриття за типами використання, залежно від призначення території – для аналізу впливу людської діяльності на стабільність ґрунтового покриву (*підрозділ 3.3*);

Крок 7. Використання нормалізованого диференційного вегетаційного індексу для визначення стану рослинного покриву та його впливу на ерозійні процеси (*підрозділ 3.3*).

Крок 8. Застосування МАІ для створення карти сприйнятливості територій до зсувів шляхом комплексування геологічних, біофізичних та геоморфологічних даних (*підрозділ 3.4*).

Крок 9. Проведення польових досліджень для завірки отриманих результатів, виявлення ознак зсувних процесів та визначення стану досліджуваної території (*підрозділ 3.5*).

В результаті застосування комплексної обробки радіолокаційних та оптичних даних за схемою методики дистанційного геоecологічного моніторингу зсувів правобережжя Канівського водосховища на рис. 3.10 одержується результуюча карта сприйнятливості досліджуваної території до зсувів. При розгляді двох сценаріїв (сприятливого і несприятливого) складається прогноз для зсувонебезпечних територій.

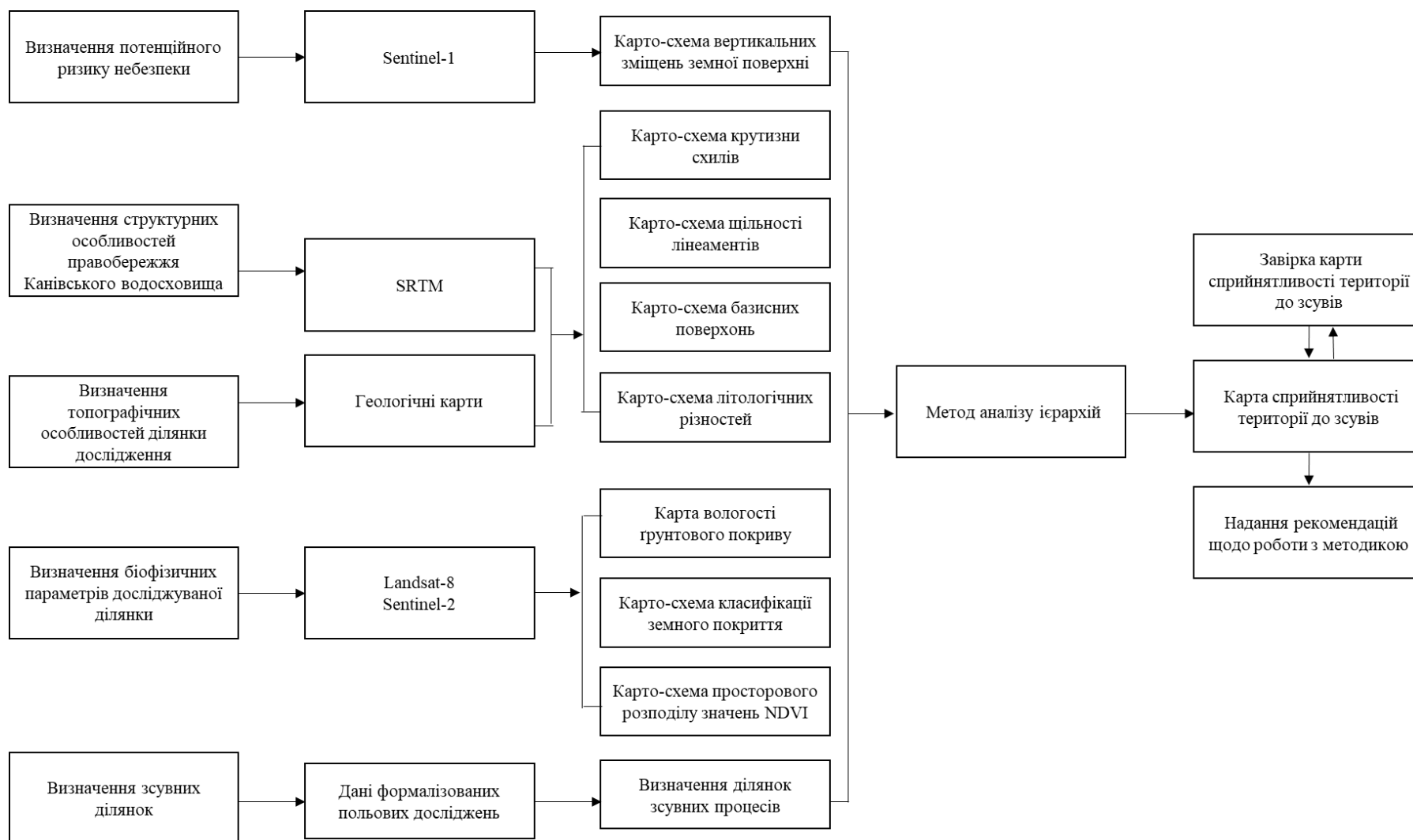


Рис. 3.10. Загальна схема методики дистанційного геокологічного моніторингу зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища

Висновки до третього розділу

1. Методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів, що запропонована у даному дослідженні, базується на використанні даних обробки супутникових знімків та геолого-географічних даних про певну ділянку дослідження. У Розділі 3 описано схему повної методики, її складові та алгоритми побудови карт даних для комплексного аналізу і складання прогнозу сприйнятливості території до зсувів.

2. Розроблено алгоритм створення карто-схеми вертикальних зміщень земної поверхні за методом радарної інтерферометрії. Використання алгоритму дозволяє виконати необхідні процедури оброблення радарних даних, урахувати наявні обмеження використання методу, застосувати порогові значення характерні саме для даних ландшафтних умов.

3. Проведено аналіз геолого-геоморфологічних факторів активізації зсувних процесів, визначена їх роль і ступінь впливу. Запропоновані алгоритми створення карто-схем літологічних різностей території дослідження, щільності лінеаментів та базисних поверхонь. Описані методи, які використовувались при обробленні цих даних, а саме: геологічного картування, структурно-геоморфологічний, геоінформаційно-аналітичні модулі.

4. Проведено аналіз біофізичних факторів активізації зсувних процесів за даними дистанційного зондування Землі. Запропоновані продукти сервісів даних дистанційного зондування та способи їх адаптації до масштабу даних отриманих іншими методами.

5. Розроблено алгоритм створення карти сприйнятливості території до зсувів із застосуванням методу аналізу ієрархій. Аналіз при вивченні зсувів на правобережжі Канівського водосховища базується на трьох принципах декомпозиція, порівняльне судження та синтез пріоритетів. Визначено основні етапи методу аналізу ієрархій, а саме: Етап 1. Побудова ієрархічної структури задачі. Етап 2. Визначення пріоритетів елементів ієрархічної структури. Етап 3.

Знаходження вектору пріоритетів. Етап 4. Оцінювання узгодженості (однорідності суджень експертів). Етап 5. Ієрархічний синтез.

6. Розроблені та описані підходи до проведення польових досліджень при валідації розробленої методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів на правобережжі Канівського водосховища на ділянці між населеними пунктами Вітачів-Стайки.

7. Розроблено та представлено загальну схему методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища.

Список використаних джерел до третього розділу

Alexander Apostolov, Lesya Yelistratova, Artur Hodorovsky, Tetiana Orlenko, Maksym Tymchyshyn (2023) Geo-ecological consequences of the closure of coal mines of Donbas (based on radio-location satellite surveying materials), *SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. DOI:10.5593/sgem2023/2.1/s10.37.

Bauer-Marschallinger, B., Freeman, V., Cao, S., Paulik, C., Schaufler, S., Stachl, T., Modanesi, S., Massari, C., Ciabatta, C., Brocca, L., and Wagner, W. (2019). Toward Global Soil Moisture Monitoring with Sentinel-1: Harnessing Assets and Overcoming Obstacles. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 1, pp. 520-539, Jan. 2019, doi:10.1109/TGRS.2018.2858004.

Bejar-Pizarro M, Notti D, Mateos RM, Ezquerro P, Centolanza G, Herrera G, Bru G, Sanabria M, Solari L, Duro J, Fernández J (2017) Mapping vulnerable urban areas affected by slow-moving landslides using Sentinel-1 InSAR Data. *Remote Sens* 9,876–893. <https://doi.org/10.3390/rs9090876/>

Casagli N, Cigna F, Bianchini S, Hölbling D, Füreder P, Righini G, Del Conte S, Friedl B, Schneiderbauer S, Iasio C, Vlčko J, Greif V, Proske H, Granica K, Falco S, Lozzi S, Mora O, Arnaud A, Novali F, Bianchi M (2016) Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: examples from the EC-FP7 project SAFER. *Remote Sens Appl Soc Environ* 4,92–108. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.07.001>.

Chen, C. W. and Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 8, pp. 1709-1719, Aug. 2002, doi: 10.1109/TGRS.2002.802453.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). doi:10.1029/2005rg000183

Fedorovsky, O.D., Tomchenko, O.V., Sokolovska, A.V. (2013). Using systematic methods of remote sensing data analysis to determine the environmental state of anthropogenically altered landscapes. *GeoInformatics 2013 - 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*

Ferretti, A. (2007). InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry: Processing and interpretation. *Noordwijk: ESA publications*.

Goldstein, R. M., (1995). Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2517-2520.

Goldstein, R. M., Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for Geophysical Applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035–4038. doi:10.1029/1998gl900033

Gray, A. L., Mattar, K. E., Sofko, G. (2000). Influence of ionospheric electron density fluctuations on satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27(10), 1451–1454. doi:10.1029/2000gl000016

Hanssen, R.F. (2001) Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. *Kluwer Academic*, Dordrecht, Boston. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>

Hein, A. (2004). Processing of SAR Data Fundamentals, Signal Processing, interferometry. Berlin: Springer.

Ivanik, O., Tustanovska, L., Kravchenko, D., Hadiatska, K. (2020). Adaptation of the method of structural-morphometric analysis to the GIS environment for paleogeomorphological studies of the Kaniv Dnieper. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, (2 (89)), 6–11. doi:10.17721/1728-2713.89.01

Khodorovskiy, A.Ya. Apostolov, A. A., Yelistratova, L. A., Orlenko, T. A. (2023) ‘Study on irrigated and nonirrigated lands in Ukraine under climate change based on Remote Sensing Data’, *Climate Change Impacts on Natural Resources, Ecosystems and Agricultural Systems*, pp. 391–411. DOI: 10.1007/978-3-031-19059-9_15

Khyzhnyak, A. V., Arkhipov, O. I., Fedorovsky, O. D., Yephimenko, T. A. (2017). Survey of hydrocarbon deposits based on the analysis of space and surface information via methods of multi-criteria optimization and analytical networks (case of the Dnieper-

Donets Depression). *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (7), 56–63. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.07.056>

Kril T., Shekhunova S. (2019). Terrain elevation changes by radar satellite images interpretation as a component of geo-environmental monitoring. *13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903176>.

Lubskyi, M., Orlenko, T., Piestova, I., Lysenko, A., Andreiev, A. et al. (2022) ‘Using landsat satellite time series for desertification processes mapping: Case study for oleshky sands, Ukraine’, *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. DOI: [10.3997/2214-4609.2022580194](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580194)

Nag, S.K. (2005). Application of lineament density and hydrogeomorphology to delineate groundwater potential zones of Baghmundi block in Purulia District, West Bengal. *J Indian Soc Remote Sens* 33, 521–529. <https://doi.org/10.1007/BF02990737>

Ni, C., Zhang, S., Liu, C., Yan, Y., Li, Y. (2016). Lineament length and density analyses based on the segment Tracing Algorithm: A case study of the Gaosong Field in Gejiu Tin Mine, China. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1–7. doi:10.1155/2016/5392453

Peltzer G., Rosen P.A. (1995) Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, earthquake observed by SAR interferometry. *Science* 268, 1333-1336.

Popov, M., Michaelides, S., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Ivanov, S. (2021). Assessing long-term land cover changes in watershed by spatiotemporal fusion of classifications based on probability propagation: The case of Dniester River Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100477. doi:10.1016/j.rsase.2021.100477

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](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 15:59–62.

Saaty, T.L. (1980). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 15: 234–281.

Saaty, T. L. (2001a). Fundamentals of the analytic hierarchy process. *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making*, 15–35. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2

Saaty, T.L. (2001b). The seven pillars of the analytic hierarchy process. In: Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium, 15–37. *Berlin, Heidelberg: Springer*

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>

Stankevich, S., Piestova, I., Titarenko, O., Filipovych, V., Samberg, A., Dudar, T.; Svideniuk, M. (2018). Urban area geodynamic risk mapping using long-term time series of Sentinel-1 satellite radar interferometry. *Information Security: An International Journal* 40(1), 39-50. <https://doi:10.11610/isij.4003>.

Wang, Y., Zhang, K., Gong, F., Mu, J., Liu, S. (2021). Interferometric phase reconstruction based on probability generative model: Toward efficient analysis of high-dimensional SAR stacks. *Remote Sensing*, 13(12), 2369. <https://doi:10.3390/rs13122369>

Yelistratova, L., Apostolov, A., Romanciuc, I., Orlenko, T., Tymchyshyn, M. et al. (2021) ‘Application of remote sensing data for detection the landslide areas in Ukraine’, *Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. DOI:10.3997/2214-4609.20215k1017

Z. H. Bawar, L. Teng, T. Zeng and Chenjuan, "Interferogram Formation and Step by Step InSAR Processing," (2005) *Pakistan Section Multitopic Conference, Karachi, Pakistan, 2005*, pp. 1-11, doi: 10.1109/INMIC.2005.334517.

Беспалова, О. М. (2001). Типи зсувних зміщень правобережжя Середнього Дніпра як відображення мікроструктури глинистих ґрунтів. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України* 82-90.

Демчишин М.Г. (1991) Геологическая среда Киева. *Геол. журн.* 2(257), 14-24.

Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. (2021). Примушко С.І., Коваленко Н.Б. та Пишна Н.Г. (Ред.). Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». Київ.

Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП (2017). Примушко С.І., Білошапська Т.Д. та Величко В.Ф. (Ред.). Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». Київ.

Ліщенко Л. П. Пазинич Н. В., Терemenko О. М. (2014). Дослідження зсувних процесів на території м Києва в режимі дистанційного моніторингу. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2, 2014, 29-34.

Ліщенко Л.П., Пазинич Н.В., Філіпович В.Є. (2017). Супутниковий моніторинг розвитку зсувних процесів в Придніпровській зоні м. Києва. *Український журнал дистанційного зондування Землі* 15, 11-22. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2017.15.111>

Лялько В.І., Дугін С.С., Сибірцева О.М., Дорофей Є.М., Голубов С.І., Орленко Т.А. Про можливості визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі. *Геологічний журнал*. 2023. № 4 (385). С. 61–78. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929>.

Орленко Т. (2023a). Методика дистанційного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні за даними радарної інтерферометрії. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 2023, 10(3), 16–20. DOI:10.36023/ujrs.2023.10.3.247. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/247>.

Орленко Т. (2023b). Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні правобережжя Канівського водосховища. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 4(103), pp. 5-13. DOI. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.103.01>

Сучасні методи дистанційного пошуку корисних копалин // За ред. В. І. Лялька і М. О. Попова – 80 Min / 700 MB. – Київ, 2017. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); ISBN 978-966-02-8295-7 (електронне видання).

Томченко О.В., Зуб Л.М., Сагайдак А.В. Оцінка екологічного стану водноболотних угідь верхніх ділянок Київського водосховища. *Збірник наукових статей: Екологія водно-болотних угідь і торфовищ*. Київ, ТОВ НВП “Інтерсервіс”. 2014. С. 246-251.

Хижняк А.В., Федоровський О.Д., Порушкевич А.Ю., Єфіменко Т.А. Концепція формування методології аерокосмічного геомоніторингу для вирішення завдань природокористування. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2021. №8, вип. 4. С. 4-11.

РОЗДІЛ 4

ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ДИСТАНЦІЙНОГО ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ ПРАВОБЕРЕЖЖЯ КАНІВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

Для перевірки розробленої методики було обрано ділянку правобережжя Канівського водосховища з широким розвитком екзогенних геологічних процесів. Тестовий полігон відноситься до Києво-Стайківського зсувного району (Демчишин, 1992). Межі району визначаються від населеного пункту Вишгород до Ходорова з грабовими дібровами на неогеновому плато, він складається з таких елементів рельєфу як вододільна поверхня, ерозійна мережа та крутосхилі поверхні.

Для здійснення моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні було обрано дев'ять тестових ділянок, на які вплинули активні деформації поверхні та п'ять контрольних ділянок, які не зазнають зсувних процесів (завіркові поля). Повний комплекс аналізу факторів, що впливають на розвиток зсувів, їх комплексний аналіз та створення карти сприйнятливості території до зсувів проведений для території Ржищівської об'єднаної територіальної громади.

4.1 Результати польових досліджень

Для визначення вертикальних зміщень у процесі дослідження обрано дев'ять тестових ділянок (рис. 4.1) та п'ять контрольних ділянок (завіркові поля).

В межах всіх ділянок (табл. 4.1) спостерігаються прояви екзогенних геологічних процесів, таких як зсуви та ерозія, що впливають на рельєф схилів. Під впливом природних факторів: підвищена кількість опадів, інтенсивні потоки ґрунтових вод, вивітрювання, високий рівень вологості ґрунтового покриву, які є характерним явищем на території дослідження, – відбувається активізація небезпечних геологічних процесів. Спільною рисою тестових ділянок є наявність глинистих, суглинкових та делювіальних ґрунтів в основі схилу, здатних до

зсувоутворення. Частина ділянок природно стабілізована, завдяки наявності густого рослинного покриву. Зсувні процеси підсилюються внаслідок антропогенного впливу, наприклад, видобутку глини у кар'єрах.

У результаті проведених польових досліджень для завірки сталого рівня земної поверхні обрано п'ять контрольних ділянок (табл. 4.2). Оскільки ці ділянки не використовуються в сільському господарстві, не обробляються та не зазнають антропогенного впливу їх рельєф залишається незмінним упродовж часу.

Завіркові поля розміщуються на вододільних вирівняних поверхнях лесового плато без деревної рослинності, на сірих опідзолених ґрунтах, з невисоким багаторічним трав'янистим покривом, що знаходиться під перелогами – ділянками, які довгий час не були залучені до сільськогосподарського вжитку.

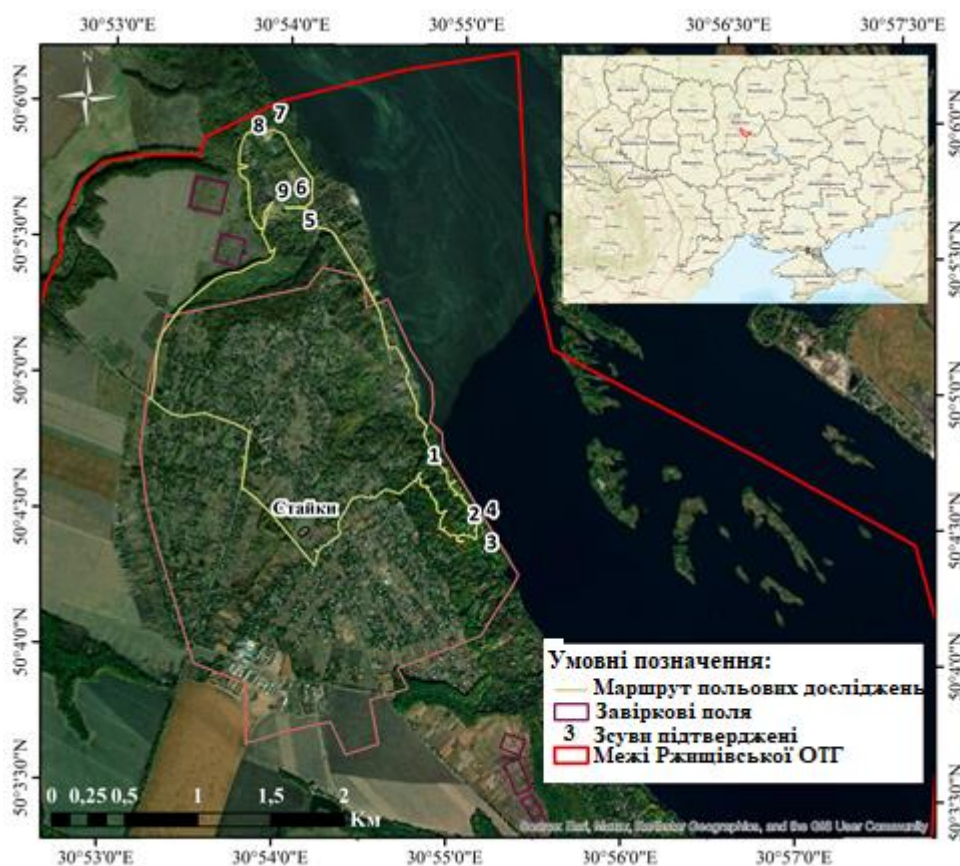


Рис. 4.1. Маршрут польових досліджень на дослідному полігоні Витачів-Стайки

Контрольні ділянки зарослі різноманітними дикорослими рослинами, переважно злаково-різнотравними асоціаціями, являють собою рудеральні ценози. Коливання гіпсометричного рівня поверхні в межах даних ділянок не перевищує 0,3 см за рік.

Таблиця 4.1

Координати тестових ділянок

<i>Положення тестових ділянок</i>	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3
Широта	50° 4'39.12822"N	50° 4'26.40183"N	50° 4'27.08121"N
Довгота	30°54'47.53186 "E	30°55'3.46599"E	30°55'7.83893"E
<i>Положення тестових ділянок</i>	Ділянка 4	Ділянка 5	Ділянка 6
Широта	50° 4'27.46655"N	50° 4'34.949"N	50° 5'37.11614"N
Довгота	30°55'7.76379"E	30°55'0.17874"E	30°54'1.9971"E
<i>Положення тестових ділянок</i>	Ділянка 7	Ділянка 8	Ділянка 9
Широта	50° 5'53.79468"N	50° 5'50.87029"N	50° 5'36.54086"N
Довгота	30°53'51.2799"E	30°53'43.97095"E	30°53'53.09642"E

Таблиця 4.2

Контрольні ділянки, завіркові поля

<i>Положення тестових ділянок</i>	Поле 1	Поле 2	Поле 3	Поле 4	Поле 5
Широта	50°3'27,109"N	50°3'32,602"N	50°3'41,116"N	50°5'28,555"N	50°5'39,907"N
Довгота	30°55'29,31"E	30°55'25,151"E	30°55'22,121"E	30°53'42,257"E	30°53'30,439"E

Досліджувана територія розчленована потужною яружно-балковою мережею, більша частина дніпровських схилів ускладнена зсувними формами та ерозійно-денудаційними явищами та має дуже хвилясту верхню бровку. Основна кількість зареєстрованих зсувів знаходиться в межах трьох-п'яти кілометрової смуги корінного берегу, розчленованого порівняно густою та глибокою яружною сіткою. Характеристика тестових та контрольних ділянок у межах маршруту дослідження включає: розташування, геологічні особливості та інші параметри, що допомагають здійснювати ефективний моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні.

Ділянка 1 (рис. 4.2-а): верхня частина схилу представляє собою заліснену ділянку з неглибокими верховими опливінами ґрунту, та ерозійними розмивами в структурі суглинку. Глибина врізу близько 8 м. Південно-східна експозиція відкритої ділянки з акумуляцією делювію в днищі.

Ділянка 2 (рис. 4.2-б): це активна зсувна ділянка зі свіжою стінкою відриву у середній частині схилу, відслонення якої зафіксовано в нижньому плейстоценовому шарі та пісках міоцену. Стінка відриву до 7 м, ширина зсувної ділянки до 20 м. Тіло зсуву у вигляді делювіально-колювіального потоку.

Ділянка 3 (рис. 4.2-в): характеризується невеликою зсувною ділянкою у вигляді потоку. Верхня частина зсувної ділянки ще зберігає стінку відриву, але делювіальні відклади вже порослі кущами та деревами віком до 5 років, що є причиною природної стабілізації ділянки.

Ділянка 4 (рис. 4.2-г): невеликий зсув у гребеневій частині схилу (1го типу), між двома ерозійними пониженнями з обох боків. Стінка відриву добре простежується, має висоту до 4 м. Нижче залягає делювіальний шельф із суглинків з горбистою поверхнею частково порослою кущами.

Ділянка 5 (рис. 4.2-д): особливістю цієї ділянки є велике відслонення ґрунтової маси у нижній частині схилу над колишнім мергельним кар'єром, який заповнений водою. Розміри відкритої ділянки сягають 30 м. Спостерігається сильне зволоження та виходи підземних вод у підніжжі схилу з-під наглинку харківської світи. Відслонюється вже частково переміщений глинистий горизонт плейстоцену червоно-бурих та строкатих глин, а також малопотужні піски та слабозцементовані пісковики новопетрівської серії та дуже зволожені пластичні сіро-блакитні глини верхнього палеогену (харківська світа). В нижній частині розташовані колювіально-делювіальні рихлі породи – делювіального шлейфу, сильно насичені водою.

Ділянка 6 (рис. 4.2-е): має сильно розчленований схил в результаті підрізання кар'єром, характеризується перемежуванням гребенеподібних та яружних форм рельєфу. Відклади нижньої частини схилу є більш стійкою частиною зсуву – плейстоценовими строкатими глинами. Нижчий рівень займають осипні міоценові піски, під ними знаходяться пластичні вологі глини верхнього палеогену. Ділянка має вигляд «бедленду» із загостреними гребнями. В нижній частині акумулюються пролювіально-делювіальні пухкі відклади, що піддаються сильній ерозії та опливанню.

Ділянка 7 (рис. 4.2-є): активний зсув, нижня частина зсувного тіла перекрита колюв'яльно-делювіальним матеріалом, що постійно рухається, за рахунок обвалювання, ерозії та зсування.

Ділянка 8 (рис. 4.2-ж): верхня частина схилу досліджуваної ділянки представлена фронтальним зсувом 1-го порядку, лесовидний суглинок у стінці відриву має стовпчасту структуру, відслонення зафіксовано на відкладах середнього та верхнього плейстоцену. Присхилова поверхня поросла деревною рослинністю, має верхню хвилясту бровку. Площа оголених відкладів сягає 80 м.

Ділянка 9 (рис. 4.2-з): стінка відриву зсуву на ділянці під номером дев'ять сформовано гребеневидними стовпчастими останцевими формами лесоподібних суглинків у верхній частині схилу, що сильно вивітрюється та руйнується під дією ерозії (Орленко, 2023б).

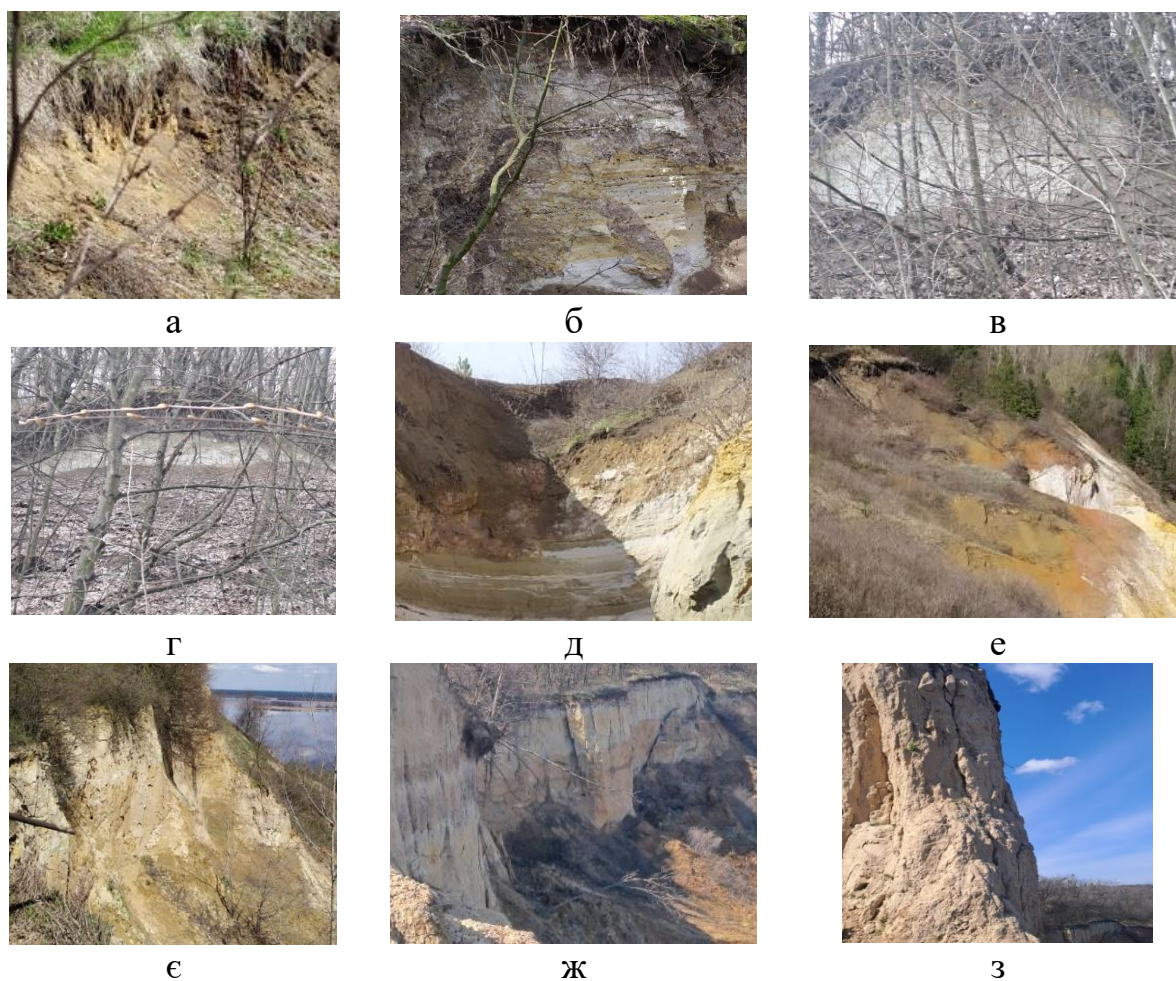


Рис. 4.2. Тестові ділянки на території Ржищівської ОТГ, правобережжя Канівського водосховища

В межах тестових елементів спостерігається переміщення порід або ґрунтового покриву під впливом розорювання, ерозійних розмивів на схилах та днищах ярів, виїмок ґрунту, зсуву схилових мас, площинної ерозії та денудації, також акумуляції їх у підніжжя схилів.

Для зсувів досліджуваної території побудовано узагальнений ландшафтно-геологічний розріз, оскільки всі тестові ділянки мають спільну геологічну основу (рис. 4.3).

Польові роботи проводилися автором згідно з маршрутом дослідження, навесні (квітень-травень) 2023 р. Під час польових робіт отримано дані про стан рослинності досліджуваного регіону, літологію відкладів, крутизну схилів та зсувну активність.

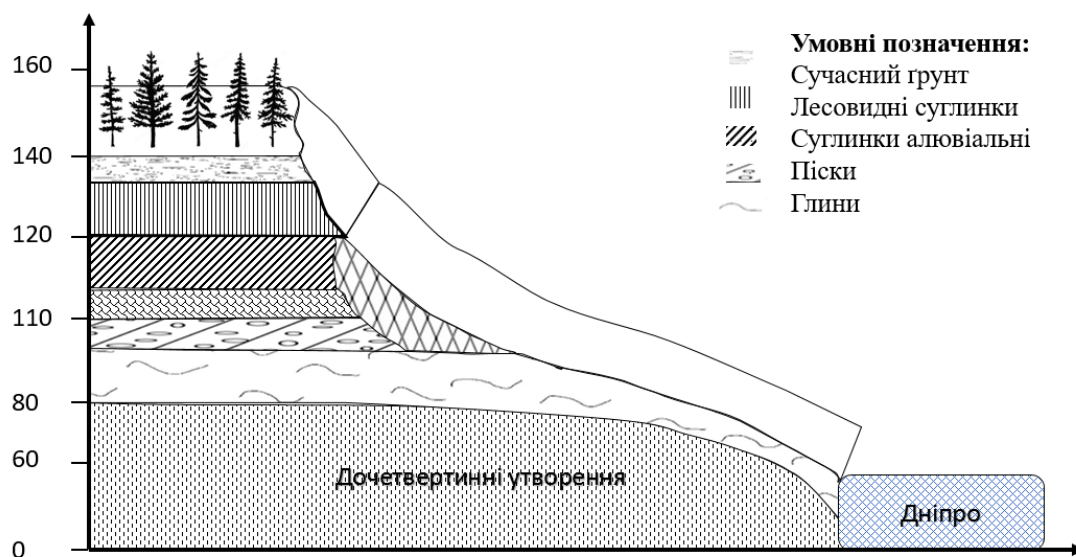


Рис. 4.3. Узагальнений геологічно-ландшафтний розріз зсувів на рис. 4.2

Зважаючи на доступні джерела супутникових радарних знімків, з максимальною просторовою розрізненістю 10 м (знімки супутника Sentinel, з графіком прольоту якого узгоджено часові проміжки проведення дослідження), тестові елементи представлені на космічному зображенні одним пікселом. Для проведення розрахунків піксели вибрано в центральних найбільш типових точках в центрі дослідного об'єкту (Орленко, 2023б).

Для здійснення дистанційного геоекологічного моніторингу та визначення змін у розвитку екзогенних геологічних процесів всі наявні картографічні

матеріали приведено в одну систему координат. Наступним кроком оцифровано всі фондові матеріали геологічних та гідрологічних звітів, що становлять інтерес для даного дослідження, які зведено в векторні тематичні шари в середовищі ArcGISPro. Далі здійснено вибірку із доступних космознімків, що дозволило значно збагатити зміст та підвищити точність геоморфологічних карт.

З використанням методів ДЗЗ прослідковано динаміку небезпечних геоморфологічних процесів за різночасовими космічними знімками. Також проведено детальний дистанційний геоекологічний моніторинг геоморфологічного середовища, встановлено ступінь антропогенного навантаження на дослідні ділянки (Орленко, 2020) та визначено ступінь негативного впливу на територію дослідження кліматичних змін.

4.2 Результати застосування методу радарної інтерферометрії

З метою застосування запропонованої методики для вирішення поставленої задачі дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів, відповідно до даних про покриття поверхні супутниками Sentinel-1, обрано зйомки (Додаток Б), що повністю покривають територію дослідження, 23 пари радіолокаційних зображень з 2015 по 2023 роки включно, за весняний період з березня до травня.

Згідно з алгоритмом розрахунку вертикальних зміщень земної поверхні, за методом радарної інтерферометрії (алгоритм 3.1) вибір весняного періоду обґрунтовується тим, що дослідна ділянка має високий ступінь залісненості. Тригером активізації зсувів є нестабільність літологічних шарів та ґрунтів території, вплив кліматичних змін, а саме підвищення рівня вологи ґрунтів та збільшення антропогенного навантаження. Літні місяці не бралися до уваги через значну кількість рослинності на дослідній ділянці.

На першому етапі виконано підбір радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1. Обрані радарні знімки мають коротку часову базову лінію 12 днів, це час повторного прольоту супутника для досліджуваної території та відповідну перпендикулярну базову лінію на момент отримання зображення яка становить від

150 до 300 метрів. Карто-схему зміщень за радарним супутником Sentinel-1 в період березень – квітень створено для спадної геометрії збору даних.

Здійснено корекцію знімків відповідно до орбітальних параметрів, а також вилучення для подальшого дослідження смугу радарного знімку, що покриває область дослідження, застосовано модуль спільної кореєстрації зображень та створено їх стек, з підвищенням спектральної яскравості даних, як результат, сформовано вихідну інтерферограму.

Наступним кроком є видалення топографічної фази, усереднення отриманих інтерферометричних значень з використанням модуля Multilooking. Фільтрація отриманих даних за методом Goldstein забезпечила нівелювання шуму на зображенні. Розгортка інтерферометричної фази була проведена з застосуванням модуля Snaphu у програмному середовищі SNAP.

Наступним кроком виконано трансформацію отриманих значень фази, в радіанах, у фізичні величини, метри. Коректне значення результатів розгорнутої фази досягнуто із застосуванням опцій маскування областей низької когерентності. Коефіцієнт 0,3 є мінімальним для застосування фільтрації, оскільки відповідає рослинним та водним об'єктам в межах досліджуваної ділянки. Оскільки тестова ділянка включає також узбережжя водосховища поріг фільтрації підвищено до значень 0,4; та 0,5 (Орленко, 2023а).

Також здійснено вирівнювання отриманих результатів та вибір ділянок, зміщення яких дорівнює нулю. Це поля, що не обробляються з 2013 року та мають сталий рівень рослинності під час весняного періоду. Проведено повторну корекцію результатів вже з урахуванням значень на цих ділянках.

Фінальним кроком створено карто-схему вертикальних зміщень земної поверхні, здійснено геометричну корекцію отриманих числових результатів, та визначено величину зміщень у кожній досліджуваній точці.

На рисунку 4.4 наведено карто-схему місцеположення вертикальних зміщень в період з 2015-2023 рр. поширення ділянок активізації зсувів в межах маршруту польових досліджень.

Відповідно до карто-схеми (рис. 4.4) тестові ділянки під номерами 5-9 є активними. Ділянки номер 1, 4 частково активні, ділянки 2, 3 – неактивні. Активізація зсувів під номерами 5-9 пов'язана з впливом природних та антропогенних факторів.

За графіками величини вертикальних зміщень ділянок 1-9, (рис. 4.5 (а-з)) можна зробити висновок про постійний рух та наявність вертикальних зміщень ділянок під номером 6-9. Для ділянки під номером 1 характерним є періодична активність у 2015, 2019-2021 роках, водночас із відсутністю коливань у 2016-2018, 2022-2023 роках. На ділянках під номером 2-3 вертикальних зміщень не зафіксовано за весь період дослідження. Ділянки 4 та 5 проявляють незначну активність у 2016, 2019-2020, 2023 роках. Максимальне значення зміщення 10 см зафіксовано на ділянках 6 та 9.

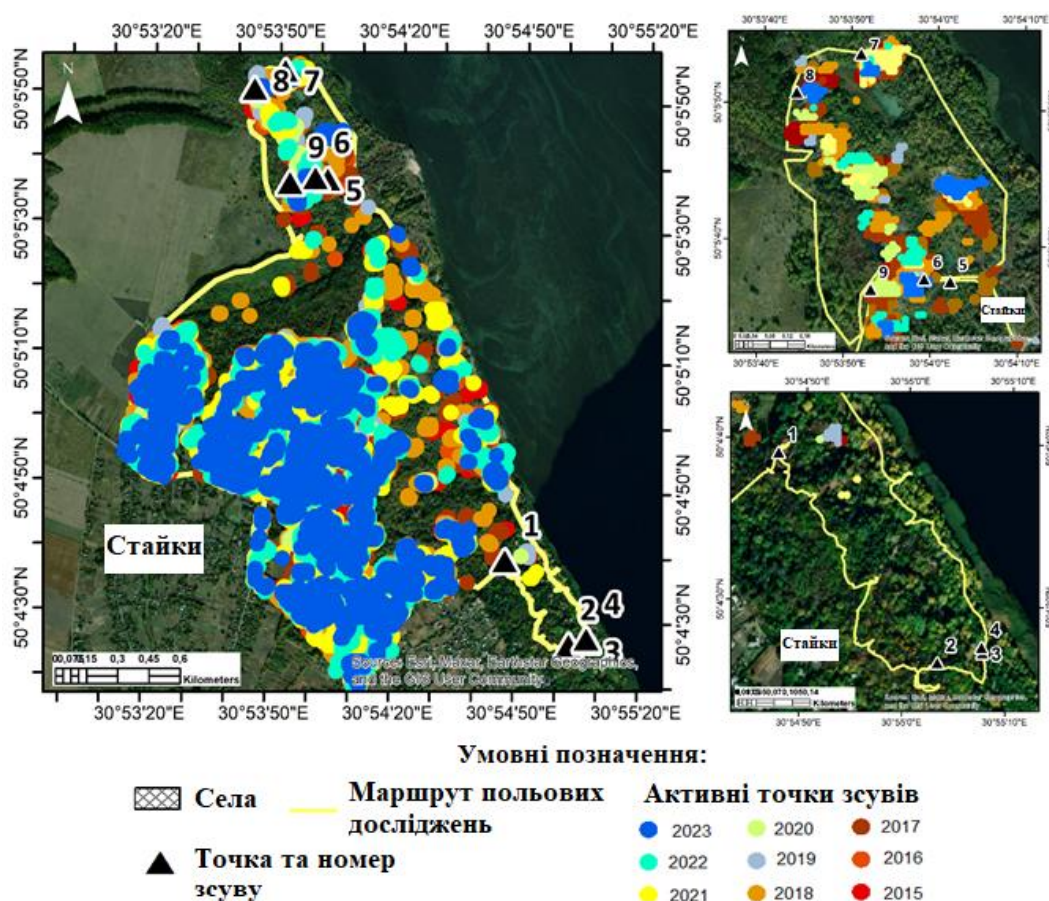


Рис. 4.4. Фрагмент карти активізації зсувів в північній частині села Стайки

Причиною стабілізації ділянок 2-4 є закріплення схилів великою кількістю деревної рослинності, яка виступає стабілізуючим фактором. Результати аналізу свідчать про критичний вплив природних факторів на динаміку зсувів досліджуваної території. На тестових ділянках більшість показників деформації, що спостерігалися протягом весняного періоду між 2015 і 2023 роками, мають значення від 1 до 15 см на рік.

Позитивні значення зміщень (рис. 4.5) вказують на те, що поверхня перемістилася вгору або віддалилася від лінії видимості супутника. У контексті дослідження зсувних процесів позитивне зміщення означає, що зсувне тіло виштовхується нагору, оскільки це підняття є однією з можливих причин зміни фази сигналу.



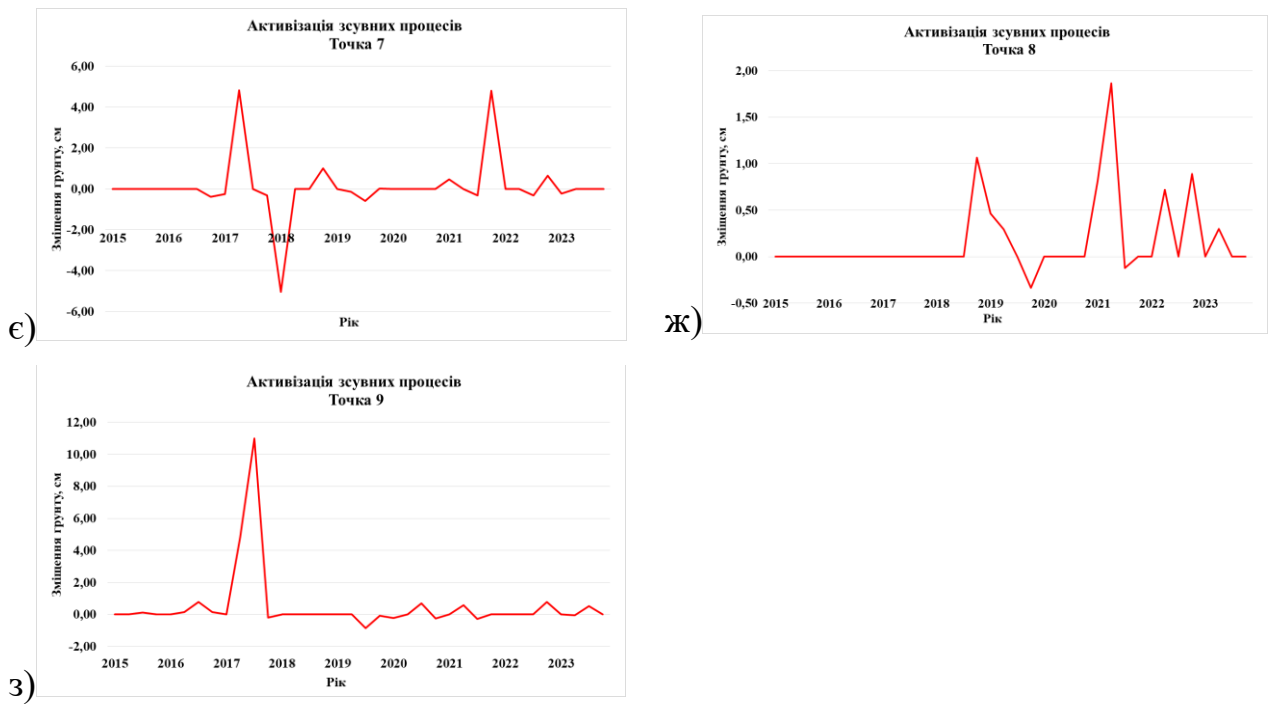


Рис. 4.5. Графік вертикальних зміщень ділянок 1-9

За результатами проведених у 2023 році польовими дослідженнями створено карто-схему вертикальних зміщень наведену на рис. 4.6.

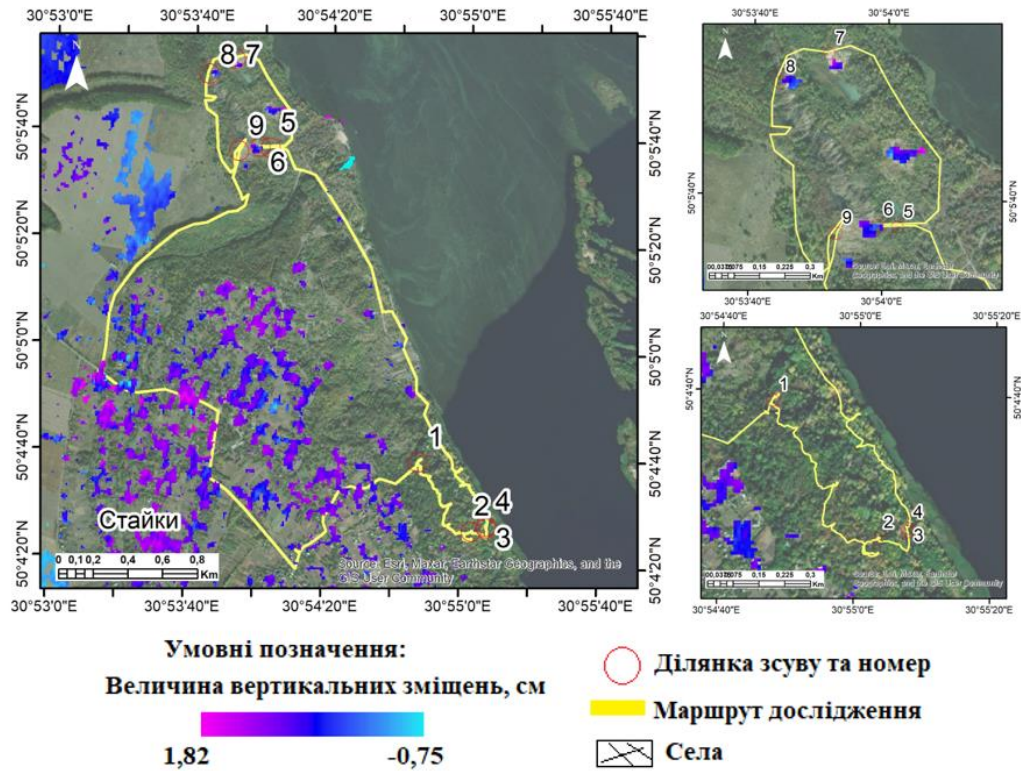


Рис. 4.6. Активізація зсувів північної частині села Стайки у 2023 році

Отже у 2023 році активними зсувними ділянками є номер 6-9 де зафіксовано вертикальні зміщення земної поверхні, неактивними під час проведення польових робіт та при створенні карто-схеми є ділянки під номером 1-3 та 5, на території ділянки 4 зафіксовані зміщення, які потребують детального аналізу.

Від'ємні значення зміщень означають, що поверхня змістилася вниз або ближче до лінії видимості супутника. Для зсувів негативне зміщення свідчить про осідання ґрунтів. Цей процес відображається у вигляді сповзання матеріалу вниз або його ущільнення (*Orlenko, 2023*). Отримані числові значення зміщень демонструють наскільки зрушилася земна поверхня, порівняно із завірковими ділянками. В даному дослідженні зміщення вимірюються в сантиметрах, чим більші значення, тим більш значним є рух ґрунтового покриву.

4.3 Результати визначення зон активізації зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища

Карто-схема поширення активних зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища від Ржищева до Григорівки наведена на рис. 4.7 за візуальним аналізом отриманих даних в середовищі ArcGisPro. В результаті злиття теоретичних, практичних та розрахункових даних, виділено ділянки поширення активних зсувних процесів на території Ржищівської ОТГ.

Зсуви, що мають значне поширення та активний розвиток у природно-штучній системі «схил-водойма», приносять значні збитки та є причиною підвищення рівня ризику ведення господарської діяльності. Вивчення та прогнозування зсувів є важливою складовою екологічної та техногенної безпеки території на регіональному та місцевому рівнях.

За характером четвертинних відкладів та зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища (*підрозділ 1.1.*) розділено на два типи. За особливостями геологічної будови схилу перший та другий типи геологічних систем не мають масштабних змін на значних площах. Однак на схилових ділянках першого і другого типу геологічні структури схилу показали, що мінімальні та максимальні значення демонструють екзогенні геологічні процеси, які корелюють з геологічними даними території дослідження.

Середні числові значення вертикальних зміщень земної поверхні за період розрахунків з 2015 по 2023 рр., кожного року, весняного періоду окремо наведено в Додатку В. Результуючі карто-схеми свідчать про те, що у 2015 році найбільш активні зсуви характерні для південної околиці села Стайки, Ржищів та селища Балико-Щучинка. Найбільша величина зміщень сягає 4,5 см. У 2016 році найбільше значення зміщень не перевищує 2 см, але активні ділянки розповсюджені вздовж правобережжя Канівського водосховища. У 2017 році зміщення досягають 6 см та є активними на території всієї Ржищівської ОТГ.

У 2018 році максимальне значення дорівнює 8 см та має високу концентрацію активності у межах досліджуваного маршруту. Для 2019 року характерним є низькі значення вертикальних зміщень та поширення здебільшого в межах берегової лінії, 2020 рік є подібним до 2019 року. За період весни 2021 року інтенсивність розподілу зсувних ділянок є вищою, порівняно з минулими роками. Для 2022 та 2023 років характерним є спільний просторовий розподіл активних зсувних ділянок на території дослідження та значній кількості зсувів на березі Канівського водосховища.

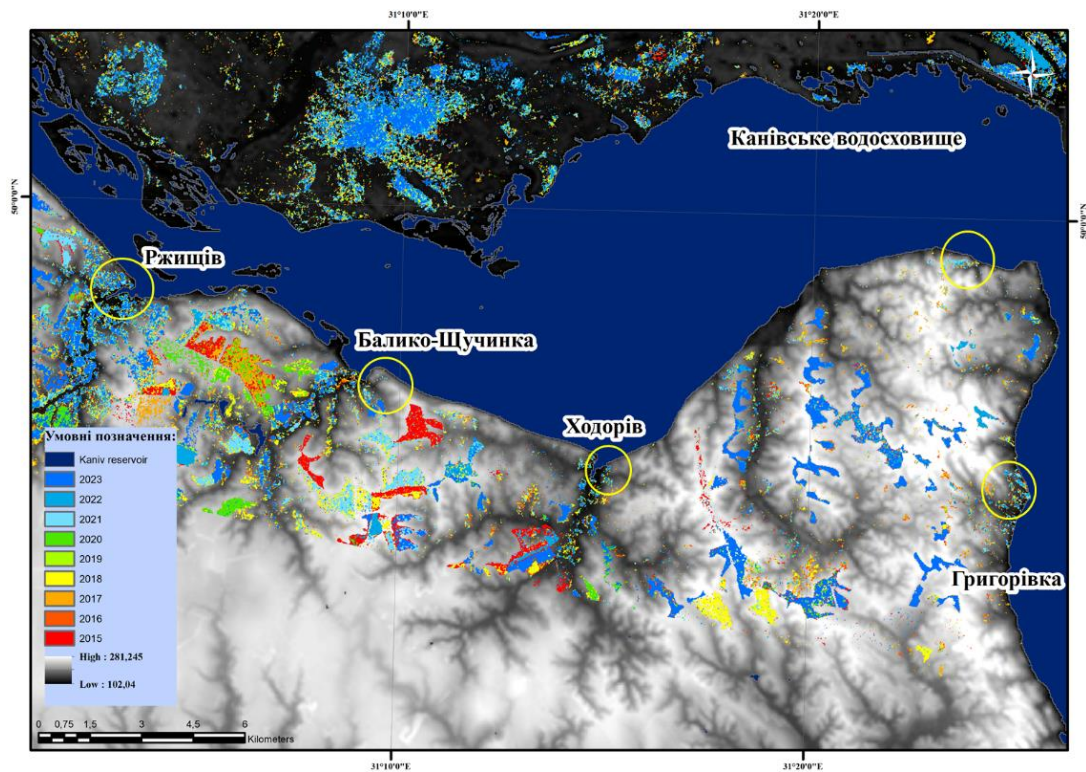


Рис. 4.7. Карто-схема поширення активних зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища від Ржищєва до Григорівки

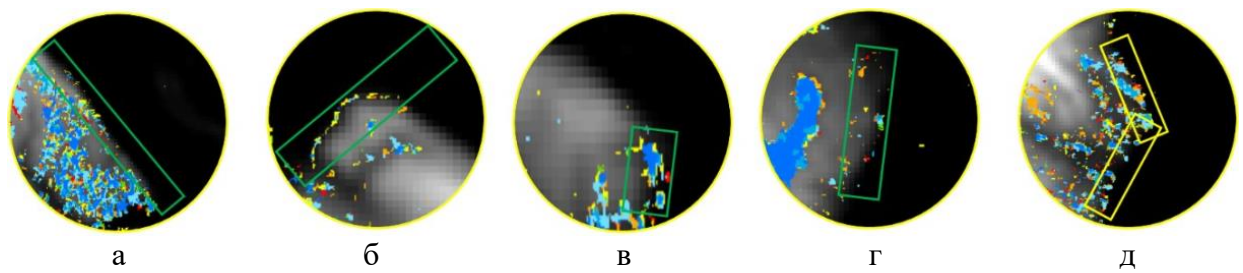


Рис. 4.8. Збільшений масштаб ділянок з підвищеним ступенем ризику зсувів: а – околиці міста Ржищів, б – околиці селища Балико-Щучинка, в – околиці села Ходорів, г – фрагмент на півострові Трахтемирів, д – околиці села Григорівка.

Отже, досліджено динаміку активізації зсувів правобережжя Канівського водосховища. Потенційними ділянками зсувів є околиці міста Ржищів (рис. 4.8а), околиці селища Балико-Щучинка (рис. 4.8б), околиці села Ходорів (рис. 4.8в), фрагмент на півострові Трахтемирів (рис. 4.8г), околиці села Григорівка (рис. 4.8д).

В більшості випадків активний зсув, той що відбувся нещодавно або процес відбувається й надалі, проявляється на результуючому зображенні, внаслідок процесів відслонення геологічних порід та сповзання значних мас ґрунту.

Отримані величини зміщень земної поверхні сприяють глибшому розумінню механізмів зсувних процесів на узбережжі Канівського водосховища та є основою для розробки ефективних стратегій геоекологічного управління цими процесами для збереження стабільності екосистеми та екологічної безпеки на досліджуваній території.

4.4 Результати аналізу геолого-геоморфологічних факторів активізації зсувних процесів

Автором використано структурно-морфометричні методи для аналізу тектоногенезу і морфогенезу території, що дає можливість побудувати карту ураженості досліджуваної ділянки зсувними процесами та густоти ерозійного розчленування території. За польовими даними, висвітленими у літературних джерелах (*Інформаційний щорічник, 2017, 2021*) створена карто-схема ураженості території зсувними процесами (рис. 4.9). Більшість зсувів розповсюджена на березі водосховища та на схилах балок.

Карто-схема крутизни схилів (рис. 4.10), отримана за даними SRTM, демонструє значущий внесок геологічних та геоморфологічних факторів у формування рельєфу даної території. Аналіз крутизни схилів дозволив зрозуміти розподіл та ступінь їх нахилу, визначити зони з підвищеною крутизною, які є найбільш вразливими до зсувів. Виявлено, що абсолютні усереднені відмітки поверхні отримані внаслідок побудови карто-схеми крутизни схилів розбігаються з абсолютними відмітками поверхні, у порівнянні з даними топографічних карт, зафіксовано їх перевищення на 26-30 м, але загальна картина простягання цих ізогіпс більш менш чітко повторює горизонталі отримані з ЦМР, хоча їх рисунки не співпадають.



Рис. 4.9. Карто-схема ураженості території зсувними процесами

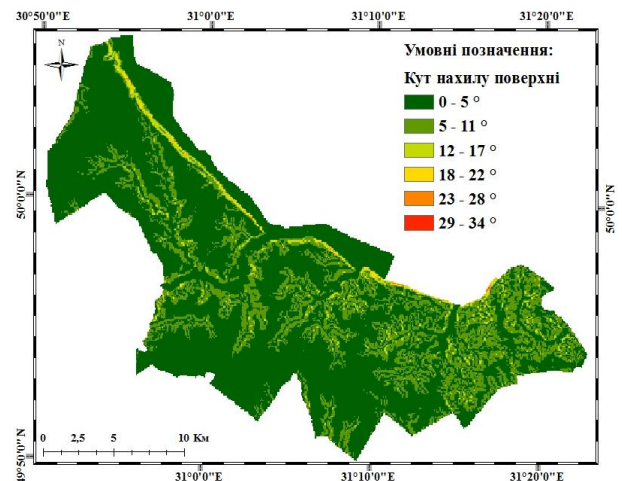


Рис. 4.10. Карто-схема крутизни схилів в межах Ржищівської ОТГ

Аналіз даних отриманих з SRTM та виконаних розрахунків і перетворень показав, що недостатня просторова розрізненність даної зйомки не дала можливість достовірно встановити місця активізованих ділянок схилів та нестабільних ділянок через незначні і регулярні амплітуди коливань, які присутні як на зсувних, так і на стабільних поверхнях. Найбільших коливань в аналізованих значеннях зазнають схили, але їх горизонтальне розчленування слабо проявляється. Тому необхідним є застосування не тільки SRTM для оцінки розвитку зсувних процесів, але й залучення методики побудови карт вертикальних зміщень за даними Sentinel-1, та карт базисних поверхонь за даними SRTM. Отже, на отриманій карто-схемі виділено основні зони за ступенем крутизни схилів.

Найвищі кути нахилу поверхні характерні для прибережної зони та балок, ці ділянки мають найвищий ризик активізації зсувних процесів, виділяючись на карто-схемі червоним та жовтим кольорами.

Детальні дослідження включали структурне дешифрування матеріалів космічного знімання з метою виділення лінеаментів та їх зон активності, за алгоритмом 3.3 На основі морфоструктурного аналізу карт дочетвертинної будови території дослідження та структурного дешифрування матеріалів SRTM побудовано карто-схему щільності лінеаментів (рис. 4.11), що є джерелом інформації про неотектонічну активність на території дослідження.

Після автоматичного вилучення лінійних елементів показано кількість лінеаментів на одиницю площі, що полегшує ідентифікацію регіонів з високою щільністю ліній, а також областей, де відсутні лінеаменти. Автором досліджено щільність лінійних елементів, створених інструментом просторового аналітика в програмі ArcGISPro шляхом підрахунку ліній цифровим способом на одиницю площі (кількість/км²). Лінеаменти на території Ржищівської ОТГ мають просторові варіації в напрямку, частоті та довжині. Оцінюючи побудовану карто-схему щільності лінеаментів можна спостерігати два переважаючих напрямки лінеаментів: північно-західний та південно-західний.

Карто-схема літологічних різностей представляє собою детальне зображення розподілу геологічних порід на території досліджень. Різні класи гірських порід відображені в різних кольорах та мають числові коефіцієнти (рис. 4.12), які вказують на їх сприйнятливість до зсувів. Передумовами для активних вертикальних зміщень є структура схилів та геологічні умови, водночас тригерним фактором виступають тривалі періоди екстремальних опадів, а також коливання рівня ґрунтових вод та рівня р. Дніпро. Зсуви досліджуваної території пов'язані з гідрофільними бурими або строкатими глинами, перезволоження яких спричиняє активізацію зсувів. Використання числових коефіцієнтів дозволило провести ранжування сприйнятливості геологічних порід до зсувів. За формалізованими геологічними даними найвищий ступінь піддатливості до зсувів мають глини (коефіцієнт 6), мергель (коефіцієнт 5), суглинки (коефіцієнт 4) та леси (коефіцієнт 3). Опісочені глини (коефіцієнт 2) та піски (коефіцієнт 1) є породами найменш

схильними до утворення чи активізації зсувів. Використаний автором підхід дозволив виділити зони поширення геологічних порід найбільш сприйнятливих до зсувів, через особливості їх літологічного складу.

Побудова карто-схеми базисних поверхонь (рис. 4.13), за *алгоритмом 3.4*, для досліджуваного регіону виконана на основі карт порядків долин третього та четвертого порядку водотоків, які відповідають саме за формування берегів Канівського водосховища у неоген-четвертинний період розвитку. Долини першого та другого порядку, які, в основному, сформувались на голоценовому етапі розвитку території, не були залучені до аналізу через їхню невелику довжину і розвиток переважно у пухких лесових покривах, а отже слабкий зв'язок з тектонічною тріщинуватістю геологічного субстрату. Аналіз долининної мережі проводився в програмному середовищі ArcGisPro, за даними супутника SRTM.

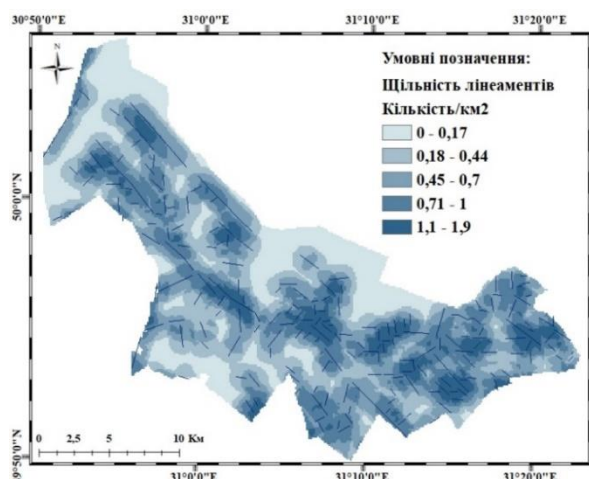


Рис. 4.11. Карто-схема щільності лінеаментів

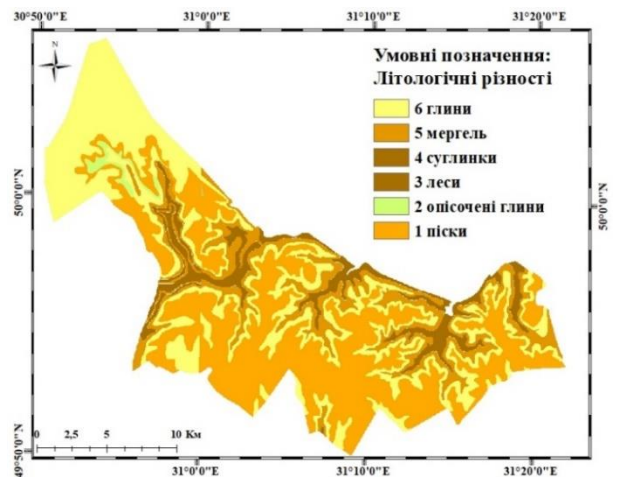


Рис. 4.12. Карто-схема літологічних різностей

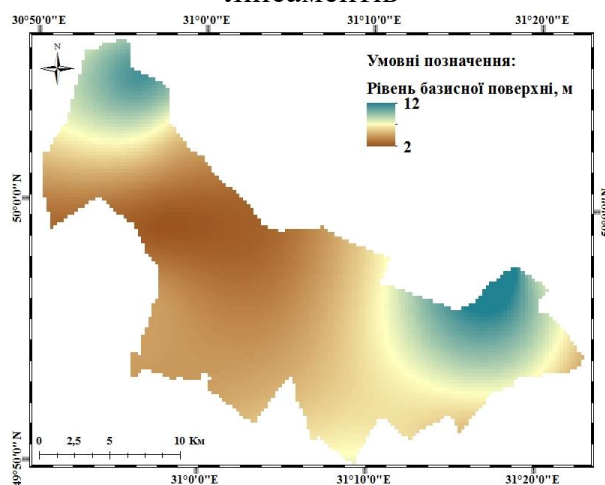


Рис. 4.13. Карто-схема базисних поверхонь

Аналіз долинної мережі проводився в програмному середовищі ArcGisPro, за даними супутника SRTM. Для побудови карти порядків долин та вододілів використано топографічну основу дрібного, середнього, і великого масштабів та космознімки з якісним та верифікованим зображенням рельєфу території. В межах досліджуваного регіону використано топографічні карти регіону досліджень масштабу 1: 25000. Карти в растровому форматі завантажено в середовищі ArcGisPro зі створенням геопросторової прив'язки з застосуванням програмного модуля Georeferencing. Для коректного відображення даних автором застосовано географічну координатну систему World Geodetic System 1984 Zone 36-N. Для побудови карт порядків водотоків використано набір інструментів пакета «Hydrology», який знаходиться у програмному комплексі ArcToolbox у модулі Spatial Analyst. На етапі попередньої обробки створено шейп-файл досліджуваної території та застосовано функцію “Clip” для вилучення досліджуваного полігону з мозаїчного зображення SRTM. Алгоритм формування карти порядків водотоків полягає в послідовному використанні операцій: “Fill” (заповнення понижень у ґриді), “Flow Direction” (напрямок стоку для кожного пікселя цифрового зображення), “Flow Accumulation” (аккумулятивний потік на основі поверхні ухилу). Наступним кроком є продовження роботи з командами блоку “Hydrology” та використання функції “Stream Order”. Визначено порядок водотоків у растровій моделі. Фінальним кроком є гідрологічне моделювання растрової моделі мережі потоків з конвертацією у векторну модель (“Stream to Feature”) та визначення для кожного елемента мережі його порядку. Застосуванням інструменту “Fishnet” створено клас об’єктів, що містить мережу прямокутних комірок. Для створення сітки використано три основні набори інформації: просторовий розмір ажурної сітки, кількість рядків і стовпців. Розмір сітки виконаного проекту залежить від розмірів досліджуваного полігону, який становить 123 м * 82 м, відповідно сітка поділена на 25 колонок та 17 рядків. Наступним кроком є обрахування статистичних даних щодо кількості та протяжності створених порядків водотоків. Після об’єднання даних побудовано карту ізоліній та застосовано інтерполяційний інструмент “Toro to Raster”, спеціально розроблений для створення гідрологічно правильних

цифрових моделей рельєфу. За даними довжин водотоків побудовано карто-схему базисних поверхонь на якій визначено на ній водотоки 3-го та 4-го порядків довжин водотоків з координатами їх витоку.

Згідно з результуючою картою базисних поверхонь водотоків 3-го порядку полігон досліджень Витаців-Стайки має середній рівень геодинамічної активності, що також визначає певний вплив на інтенсифікацію зсувних процесів. Висока проникність гірських порід на досліджуваній території є одним із чинників підйому ґрунтових вод, що веде до підтоплення територій, порушення фундаментів будівель, підземних комунікацій та інших об'єктів, як наслідок, підвищується ризик зсувних процесів.

4.5 Результати аналізу біофізичних факторів активізації зсувних процесів за даними дистанційного зондування Землі

Відносна поверхнева вологість ґрунту вирахована методом лінійного масштабування, нормованого за кутом зворотного розсіювання між найнижчим та найвищим значенням в кожному пікселі (<https://land.copernicus.eu/global/products/sm>). Карто-схема вологості ґрунту (рис. 4.14) відображає відносний вміст води у верхніх кількох сантиметрах ґрунту.

Високі значення вказують на перенасиченість ґрунту вологою, що призводить до збільшення ризику зсувів. Найбільший рівень вологи має узбережжя Канівського водосховища, низький рівень вологи має центральна частина досліджуваної ділянки, яка не задіяна у сільськогосподарській обробці через великий ступінь ураженості яружною ерозією, середній рівень вологи ґрунту характерний для сільськогосподарських ділянок.

З використанням хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets>) здійснено вирішення завдання, а саме, використано набір супутникових даних для створення карто-схеми класифікації земного покриття та карто-схеми розподілу значення індексу NDVI (Лялько та ін. 2023).

Створена карто-схема класифікації земного покриття за типами використання (рис. 4.15) відображає сім різноманітних класів земної поверхні на досліджуваній території, які мають різний вплив на утворення зсувів.

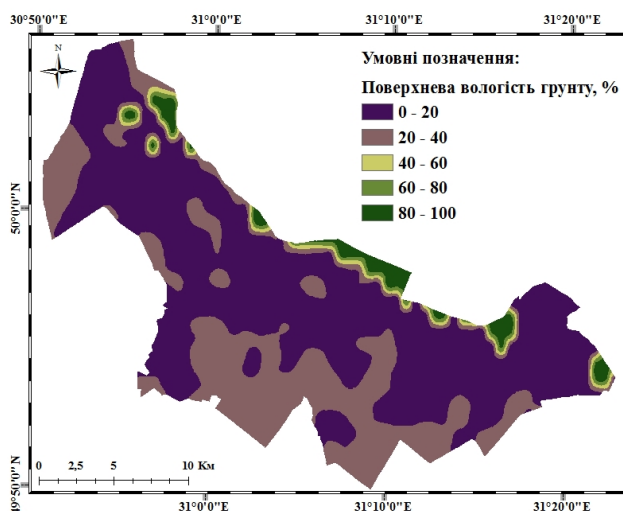


Рис. 4.14. Карто-схема вологості ґрунту

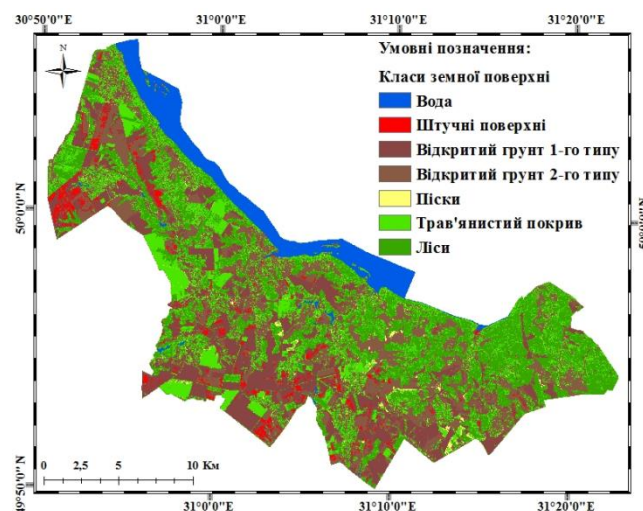


Рис. 4.15. Карто-схема класифікації земного покриття за типами використання

Класифікація типів земного покриття досліджуваного регіону проведено з використанням супутникових багатоспектральних знімків Sentinel-2, за весняний період 2023 року.

Пікселам багатоспектрального зображення присвоєно класовий атрибут на основі близькості спектру цього піксела до еталонного спектра. Спектри зображення подані у вигляді набору коефіцієнтів спектрального відбиття в певних спектрональних областях. Класи являють собою типи ландшафту, які можна вирізнити за спектром. Навчальні вибірки є попередньо підготовленими наборами полігонів на зображенні. За набором пікселів, які входять до вибірки конкретного класу, сформовано розподіл значень спектрального відбиття, за якими далі в межах всього зображення всі піксели, що максимально подібні до пікселів в цій вибірці, віднесено до певного класу. Відбір багатоспектральних супутникових даних здійснено за критеріями відсутності хмарного покриття та дефектних пікселів. Для досліджуваної території сформовано навчальні вибірки для наступних класів: вода, штучні поверхні, відкритий ґрунт 1-го типу (ґрунти з більшим рівнем

зволоженості), відкритий ґрунт 2-го типу (ґрунти з меншим рівнем зволоженості), піски, трав'янистий покрив та ліси.

Описана послідовність класів співпадає з коефіцієнтом їх впливу на зсувні процеси. Тобто відкрита водна поверхня, штучні поверхні та відкриті ґрунти найбільше впливають на активізацію зсувних процесів. Найменше піддіються дії активних зсувних процесів території з густим лісовим та трав'янистим покривом, а також ділянки зі значною кількістю піску. За результатами використання нормалізованого диференціального вегетаційного індексу визначено ділянки з високим та низьким ступнем зволоженості у межах Ржищівської ОТГ.

Для розрахунків нормалізованого вегетаційного індексу (рис. 4.16) використано знімки супутника Landsat-8 з 2015 по 2023 роки, з просторовою розрізненністю 30 м, за період березень-квітень, згідно проведених інтерферометричних досліджень. Використано тільки знімки Landsat, оскільки запуск Sentinel-2, з вищим рівнем просторової розрізненності, відбувся лише у 2016 році та перші знімки досліджуваного регіону датовані весною 2017 року. Саме тому для коректного порівняння результатів за повний період спостережень розраховано індекси за даними супутника Landsat (Лубський та ін. 2023).

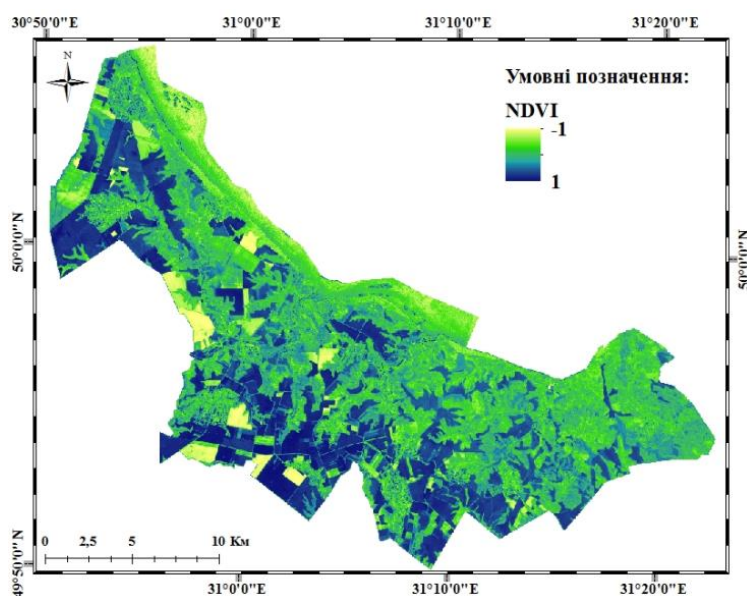


Рис. 4.16. Карто-схема розподілу NDVI

Значення індексу NDVI коливається від -1 до 1 . Зменшення значень NDVI спричиняє збільшення значень спектрального відбиття у видимому діапазоні та зменшення відбиття у NIR-діапазоні через знищення рослинності, деградацію землі або оголеного ґрунту. Області з негустою рослинністю, такі як деградовані луки та чагарники, мають низькі значення NDVI ($0,2-0,5$). Значення NDVI високі на ділянках із високою густотою рослинності на правобережжі Канівського водосховища. Загалом результати застосування індексу NDVI демонструють зменшення кількості рослинності в межах ділянки дослідження Витачів-Стайки, зокрема, на ділянках 5-9 які пов'язані з кар'єром з видобутку глини (Орленко, 2023б).

4.6 Результати застосування методу аналізу ієрархій

Для визначення відносної ваги факторів використано метод аналізу ієрархій (MAI), за яким визначено пріоритет факторів та субфакторів, що є причиною зсувів на правобережжі Канівського водосховища.

За методом MAI фактори та альтернативи одержали вагу за дев'ятибальною порядковою шкалою шляхом попарного порівняння між ними.

Фактори впорядковано у формі матриць, яка містить рівну кількість рядків і стовпців, де бали записуються з одного боку діагоналі, тоді як значення 1 розміщуються на діагоналі матриці.

Аналіз факторів впливу на зсуви реалізовано в кілька послідовних кроків, таких як: розробка ієрархічної структури визначеної задачі, виконання двійкових порівнянь критеріїв, встановлення порівняльної матриці суджень, обчислення векторів пріоритетів, надання значення випадковому індексу (RI), обчислення середнього значення, створення таблиці оцінювання ступенів важливості критеріїв моделі та прийняття остаточного рішення на основі узагальненого критерію.

MAI дав змогу сконструювати необхідну цільову функцію й оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи.

Отримавши значення векторів локальних пріоритетів (вагових коефіцієнтів), визначено значення згортки узагальненого критерію $K(x)$ згідно з формулою (4.1),

що дало змогу оцінити території, сприятливі до зсувів, за всією сукупністю індикаторів та складових запропонованої ієрархії.

$$K(x) = \prod_{j=1}^n K_j^{a_j}(x), \quad , \quad (4.1)$$

де $K(x)$ – узагальнений критерій для альтернативи $x \in X$, який показує зсувонебезпечність території; $K_1(x), \dots, K_j(x), \dots, K_n(x)$ – набір вхідних індикаторів; n – число вихідних критеріїв; a_j – відносна вага (важливість) часткового критерію K_j .

Для ваг виконується умова нормування вхідних значень $\sum_{j=1}^n a_j = 1$, яка необхідна, щоб результати, отримані в різних умовах, можна було порівняти між собою.

Аналіз при вивченні зсувів на правобережжі Канівського водосховища, в межах Ржищівської ОТГ базується на трьох принципах: декомпозиція, порівняльне судження та синтез пріоритетів. Ієрархічна структура факторів та показників дослідження показана на рис. 4.17.

Головною метою дослідження автором визначено отримання оцінки сприйнятливості території до зсувів, що є водночас нульовим рівнем ієрархії.

На першому рівні аналізу визначено два критерії стану досліджуваної території: стабільність та нестабільність території.

На другому рівні автором обрано вісім показників, що призводять до розвитку зсувів, серед яких: карта вертикальних-зміщень досліджуваної території, схема літологічних різностей, карто-схема базисних поверхонь, карто-схема щільності лінеаментів, карто-схема крутизни схилів, площинний розподіл значення вегетаційного індексу NDVI, карто-схема класифікації земного покриття за типами використання, карта поверхневої вологості ґрунту.

На третьому рівні обрано потенційні сценарії розвитку зсувів, що включають: незначний рівень небезпеки, помірний рівень небезпеки, підвищений рівень небезпеки, високий рівень небезпеки, дуже високий рівень небезпеки.

Автором здійснено порівняння елементів нижнього рівня ієрархії, стосовно кожного з елементів верхнього рівня, відповідно до мети дослідження – оцінки сприйнятливості території до зсувів, *Додаток Г- Д.*

Кожний із двох напрямків змін стану території Ржищівської ОТГ, стабільність (низький рівень активності зсувів) та нестабільність (високий рівень активності зсувів) характеризується питомою вагою з точки зору його значимості до сприйнятливості території до зсувів.

Матриця складена за схемою запису елементу вищого рівня вгорі та перелічення підпорядкованих елементів нижнього рівня у стовпчику та рядку (табл. 4.3-4.4). В матрицю записано результат попарного порівняння елементів (*підрозділ 3.4*) матриці, що є основою створення карти сприйнятливості території до зсувів.



Рис. 4.17. Ієрархічна представлення задачі оцінки сприйнятливості території до зсувів

Під час парного порівняння об'єктів, автором та експертами виставлено оцінки, що показують величину – на скільки, один із об'єктів важливіше іншого (табл. 4.3-4.4). Для виявлення суперечностей результатів при заповненні матриці використано індекс узгодженості.

Для складеної матриці переваг для визначення стабільного стану території параметри перевірки складають: розмірність матриці попарних порівнянь – $\text{Dim} = 8$; Максимальне власне значення матриці – $\lambda_{\max} = 8,9495$; Індекс однорідності (узгодженості) матриці попарних порівнянь – $\text{CI} = 0,1356$; Відношення однорідності (узгодженості) матриці попарних порівнянь – $\text{CR} = 0,0862$.

Для складеної матриці переваг для визначення нестабільного стану території параметри перевірки складають: розмірність матриці попарних порівнянь – $\text{Dim} = 8$; Максимальне власне значення матриці – $\lambda_{\max} = 8,6082$; Індекс однорідності (узгодженості) матриці попарних порівнянь – $\text{CI} = 0,0869$; Відношення однорідності (узгодженості) матриці попарних порівнянь – $\text{CR} = 0,0616$.

Для реалізації МАІ при оцінюванні зсувної небезпеки в межах досліджуваної території для обраних даних сформовано матрицю переваг, на основі якої визначено вагові коефіцієнти впливу на зсувну небезпеку для кожного типу даних. Для одержаних матриць коефіцієнти узгодженості менше $\approx 8 \%$, що менше припустимих за теорією МАІ 10%.

На другому рівні матриці переваг створюються для кожного параметру, визначеного за даними дистанційного зондування Землі, визначено важливість п'яти сценаріїв розвитку зсувів. Кожна комірка вказує, наскільки важливим є один сценарій порівняно з іншим для кожного з факторів впливу *Додаток Д*.

Загальний характер матриць відповідає наданню кількісної оцінки відносної важливості між елементами ієрархії, що є ключовим для подальшого використання методу аналізу ієрархій у межах програмного забезпечення ArcGisPro.

Таблиця 4.3

Матриця переваг для визначення стабільного стану території

Нестабільність території	Зміщення земної поверхні	Крутизна схилів	Літологічні різності	Поверхнева вологість ґрунту	Базисні поверхні	Щільність лінеаментів	Вегетаційний індекс NDVI	Типи земного покриття	Відносна вага критерію
Зміщення земної поверхні	1	2	2	2	2	5	0,33	2	0,42
Крутизна схилів	0,5	1	2	2	3	2	2	2	0,18
Літологічні різності	0,5	0,5	1	2	2	2	2	2	0,10
Поверхнева вологість ґрунту	0,5	0,5	0,5	1	2	2	2	2	0,09
Базисні поверхні	0,5	0,333	0,5	1	1	5	2	2	0,07
Щільність лінеаментів	0,2	0,5	0,5	0,5	0,2	1	2	2	0,06
Вегетаційний індекс NDVI	3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	2	0,05
Типи земного покриття	0,019	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,04

Таблиця 4.4

Матриця переваг для визначення нестабільного стану території

Стабільність території	Зміщення земної поверхні	Крутизна схилів	Літологічні різності	Поверхнева вологість ґрунту	Базисні поверхні	Щільність лінеаментів	Вегетаційний індекс NDVI	Типи земного покриття	Відносна вага критерію
Зміщення земної поверхні	1	6	5	6	6	7	3	5	0,24
Крутизна схилів	0,167	1	2	2	3	2	2	2	0,18
Літологічні різності	0,2	0,5	1	2	4	2	2	2	0,15
Поверхнева вологість ґрунту	0,167	0,5	0,5	1	3	2	2	2	0,12
Базисні поверхні	0,167	0,333	0,25	1	1	4	2	4	0,11
Щільність лінеаментів	0,143	0,5	0,5	0,5	0,25	1	2	4	0,07
Вегетаційний індекс NDVI	0,333	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	2	0,07
Типи земного покриття	8,8183 4E-06	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,5	1	0,06

Для співставлення отриманих значень згортки узагальненого критерію F Додаток E для порівнюваних сценаріїв розвитку зсувів (альтернатив) дозволяє оцінити вірогідність їхнього настання (табл. 4.5.).

Таблиця 4.5.

Значення узагальненого критерію F для порівнюваних сценаріїв розвитку зсувів відносна шкала експертних оцінок значення оцінки сприйнятливості території до зсувів

Сценарії (альтернативи)		Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
F	Стабільність території	0,353	0,261	0,167	0,123	0,096
	Нестабільність території	0,079	0,108	0,182	0,259	0,372

Отримані результати свідчать про стабільність території за умови переважання незначного та помірної рівня небезпеки. Нестабільність території підтверджена для високого та дуже високого рівнів небезпеки зсувів. Наочно вірогідність стабільного чи нестабільного варіанту стану досліджуваної території наведено на рис. 4.18.

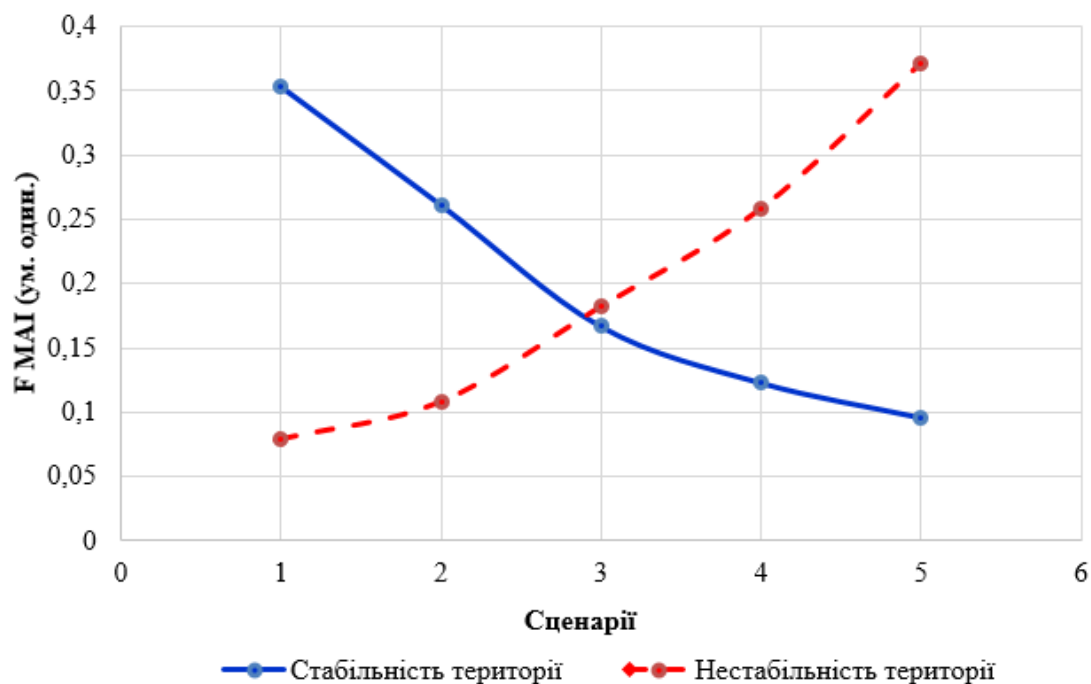


Рис. 4.18. Оцінка сприйнятливості території до зсувів

Багатокритеріальний підхід до моделювання стану навколишнього середовища на основі МАІ є досить поширеним в дослідженнях, в яких застосовуються гетерогенні дані дистанційного зондування, оскільки він позитивно себе зарекомендував для формування відносних багатofакторних оцінок ризиків, ступеня зсувонебезпечності території та інших задач, тому є основою для створення карти сприйнятливості території до зсувів (Орленко та ін., 2023).

4.7 Результати розробленої методики створення карти сприйнятливості території до зсувів

В результаті застосування методики дистанційного геоecологічного моніторингу зсувів Правобережжя Канівського водосховища на прикладі ділянки Витачів-Стайки (*підрозділ 3.6, рис. 3.10*) створено карту сприйнятливості території (*алгоритм 3.5*) до зсувів (рис. 4.19 – 4.20), з використанням ArcGisPro. Для коректного відображення результатів використано модуль АНР (Analytic Hierarchy Process), основною матрицею для розрахунків обрано матрицю переваг для визначення нестабільного стану території наведену в табл. 4.4.

Для демонстрації стабільності території обрано дані для змінних параметрів, таких як індекс NDVI, вологості земної поверхні та зміщень земної поверхні у період їхньої максимальної стабільності, та найнижчої ймовірності розвитку зсувів. Індекс NDVI обрано за 22 жовтня 2023 року, через найменший рівень рослинності в цей період, карту вологості обрано за 23 серпня 2023 року, найсухіший період на території дослідження, значення зміщень розраховано за травень 2023 року.

На рис. 4.19 наведено карту сприйнятливості досліджуваної території до зсувів за сприятливого сценарію. На рис. 4.20 наведено карту сприйнятливості досліджуваної території до зсувів за несприятливого сценарію.

Градаціями кольору показано інтенсивність розвитку зсувних процесів за п'ятьма категоріями: незначний рівень небезпеки – темно-зелений колір, помірний рівень небезпеки – зелений колір, підвищений рівень небезпеки – жовтий колір, високий рівень небезпеки – помаранчевий колір, дуже високий рівень небезпеки – червоний колір.

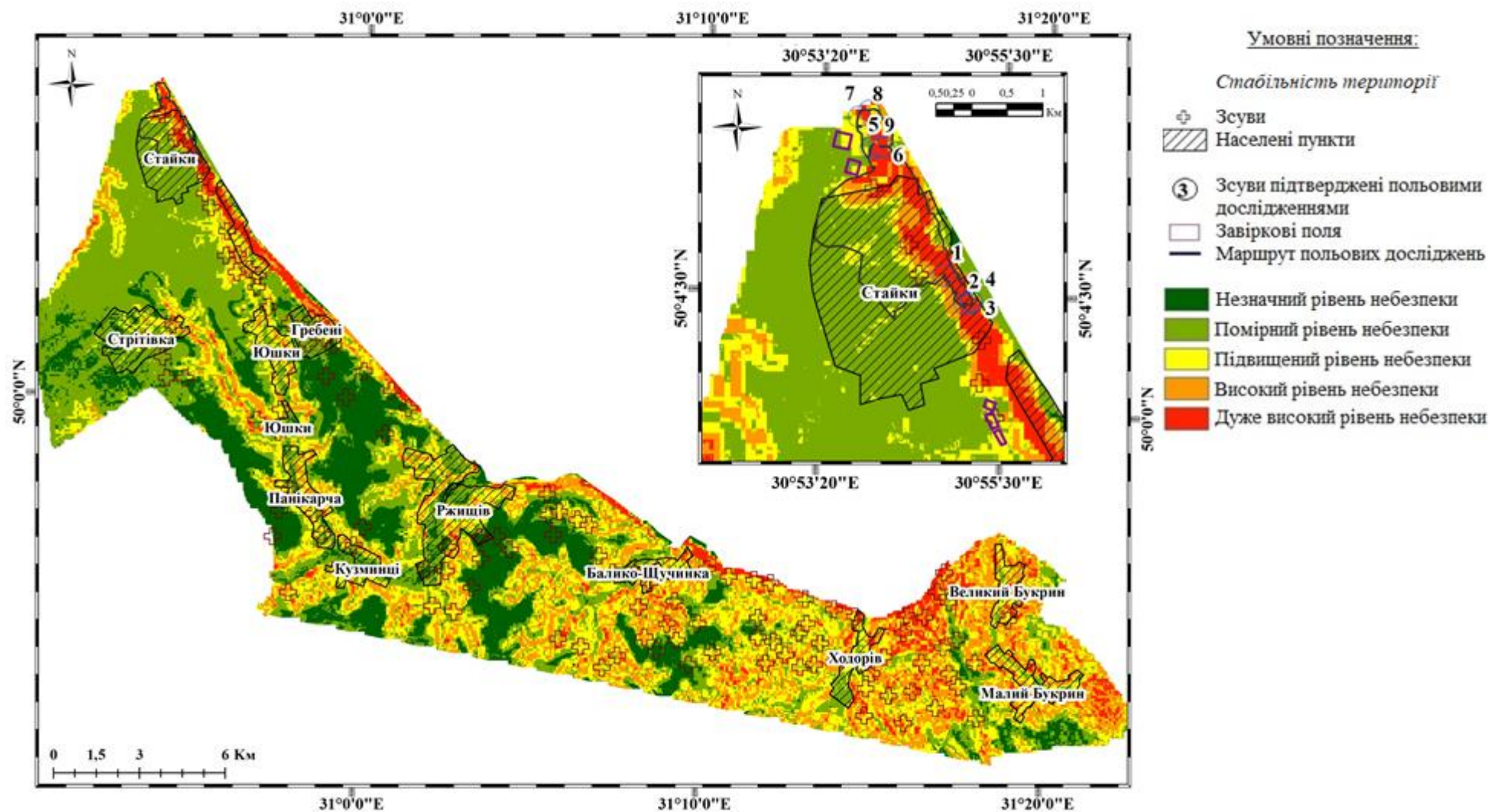


Рис. 4.19 Карта сприйнятливості досліджуваної території до зсувів за сприятливого сценарію

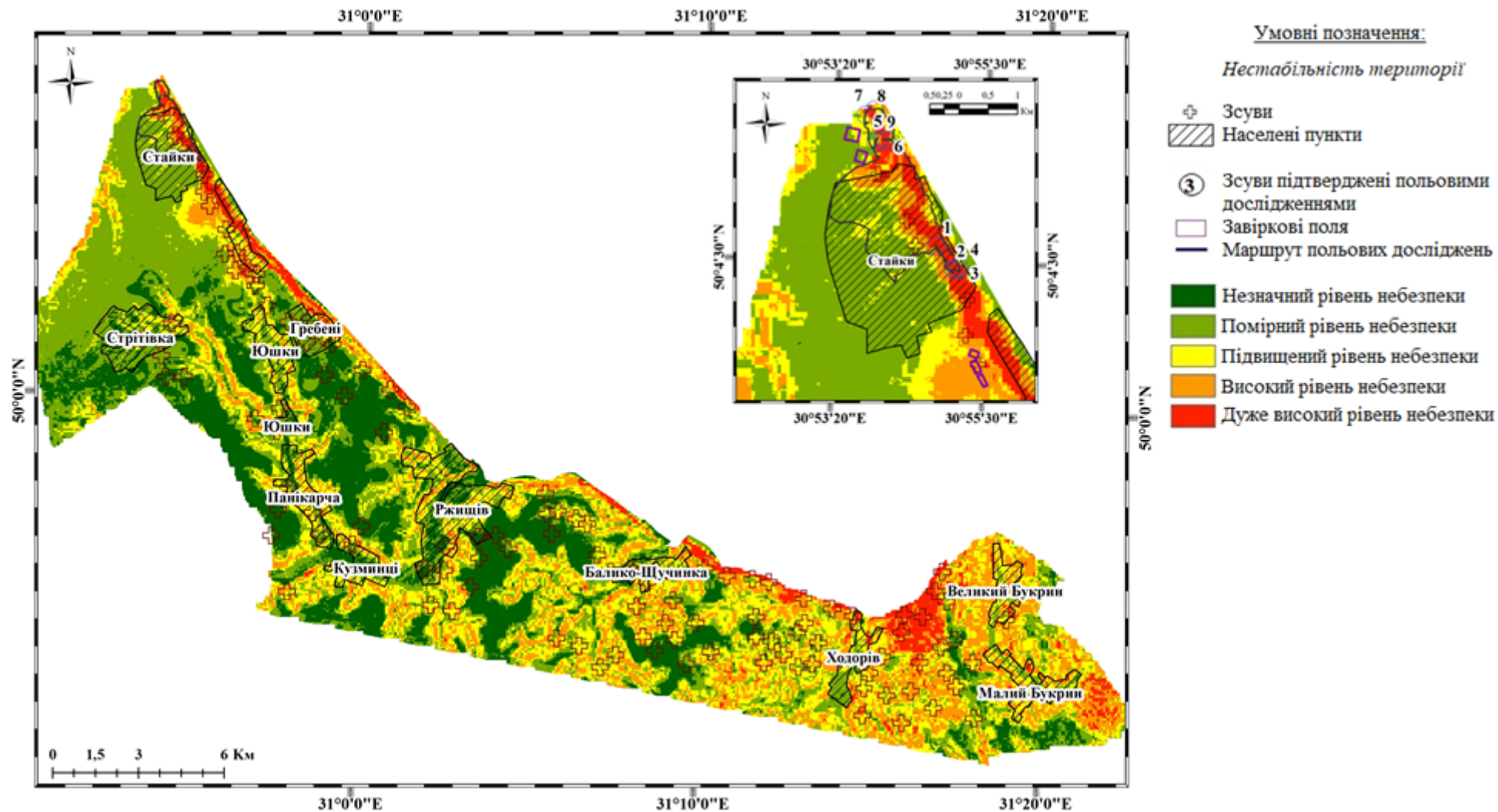


Рис. 4.20 Карта сприйнятливості досліджуваної території до зсувів за несприятливого сценарію

За умови реалізації сприятливого сценарію розвитку зсувів територія дослідження має переважаючий помірний та підвищений рівень небезпеки розвитку зсувних процесів. Найбільш активними ділянками є околиці села Стайки, берегова лінія водосховища, околиці селищ Балико-Щучинка та Ходорів. Ділянки з розповсюдженою яружною балковою системою мають підвищений та помірний рівень небезпеки, за умови низького рівня зволоженості ґрунтового покриву та щільному рослинному покриві.

Водночас нестабільний розвиток зсувних процесів характеризується переважанням кількості ділянок з дуже високим рівнем небезпеки. Активні зсувні ділянки займають берегову лінію водосховища, розповсюджені в межах всіх населених пунктів та в яружно-балкових системах.

В межах маршруту польових досліджень зсувні ділянки мають дуже високий рівень небезпеки за умов як сприятливого так і несприятливого сценарію розвитку подій. Відповідно до величини вертикальних зміщень дослідних ділянок 5-9 протягом усього періоду дослідження на карті схильності до зсувів мають дуже високий рівень небезпеки. Водночас ділянки 1-4, що були майже неактивними під час усього дослідження мають також дуже високий рівень небезпеки, що в свою чергу пояснюється застосуванням програмного модуля АНР, згідно з яким всі дані мають просторову розрізненність 10 м, відповідно результат аналізу є більш узагальненим.

Завіркові поля, що мають стабільний рівень земної поверхні та не зазнають впливу господарської діяльності відносяться до підвищеного та помірного рівня небезпеки, за умови розвитку обох сценаріїв, що підтверджує їх вилучення з сільськогосподарського вжитку та мінімальний рівень антропогенного впливу.

Дуже високий рівень небезпеки мають круті схили Канівського водосховища. Найбільша площа належить незначному та помірному рівню небезпеки. Найменша площа має дуже високий рівень небезпеки. Нестабільність території визначається для рівня вологості ґрунтового покриву, індексу NDVI та величини зміщень земної поверхні. Результатом синтезу цих показників є створення карти сприйнятливості до зсувів у якій значення червоного кольору відповідають найвищому рівню

зсувонебезпеки, зеленим кольором визначено ділянки зсуви на яких є неможливими

Підвищений та високий рівень небезпеки мають схили балкової мережі. Низький рівень небезпеки зафіксовано на вододільних ділянках з густим лісовим покривом та рідколіссям.

Територія з відносним значенням крутизни схилів у діапазоні від 12° до 17° , $18-22^\circ$, $23-28^\circ$ та $29-34^\circ$ становить більше половини усіх потенційно активних зсувних ділянок відносно всієї площі дослідження. Крутизна схилів впливає на розвиток рослинності, як правило, більш круті схили важче заростають і потребують додаткових заходів для заліснення і засадження чагарниками, таким чином ділянки з вищим рівнем крутизни мають більшу схильність до розвитку зсувів. Розподіл індексу NDVI свідчить про збільшення кількості зсувів на території з низьким значенням індексу 0,3-0,5 (рідколісся, відкритий ґрунт). Функціональні процеси водосховища мають також негативний вплив на активацію зсувів.

Карто-схема щільності лінеаментів свідчить про підвищений рівень небезпеки на ділянках підвищеної щільності лінеаментів, що свідчить про розущілення геологічних верств і зони впливу глибинних тектонічних розломів. Так само, ділянки неотектонічної активності підкреслюють значення базисних поверхонь. Розподіл літологічних відкладів свідчить про належність території до геологічно-нестійких, основою яких є глини, мергель, суглинки та лесові породи. Різні типи землекористування мають значні відмінності щодо стабілізації ґрунту через різний розвиток рослинності.

На території дослідження зсуви найбільше поширені на ділянках з трав'янистим покривом та відкритими ґрунтами, найстабільнішими ділянками є території вкриті лісами. Найбільша кількість вологи та, відповідно, зсувів характерна саме для правого берега Канівського водосховища.

Значення зміщень земної поверхні є основним критерієм оцінки, демонструючи кореляцію вертикальних зміщень поверхні та сприйнятливості території до виникнення зсувів.

4.8 Оцінка точності та достовірності розробленої методики

Оцінка точності та достовірності карти сприйнятливості території до зсувних процесів проводилася шляхом порівняння даних карти розповсюдження зсувів та динаміки їх розвитку на правобережжі Канівського водосховища за даними на 2006 рік (*підрозділ 1.3*) та отриманих результатів карти сприйнятливості досліджуваної території до зсувів за сприятливого та несприятливого сценаріїв (*підрозділ 4.7*), з використанням експертної оцінки. Відповідність визначення категорій стану зсувного процесу наведено у таблиці 4.6.

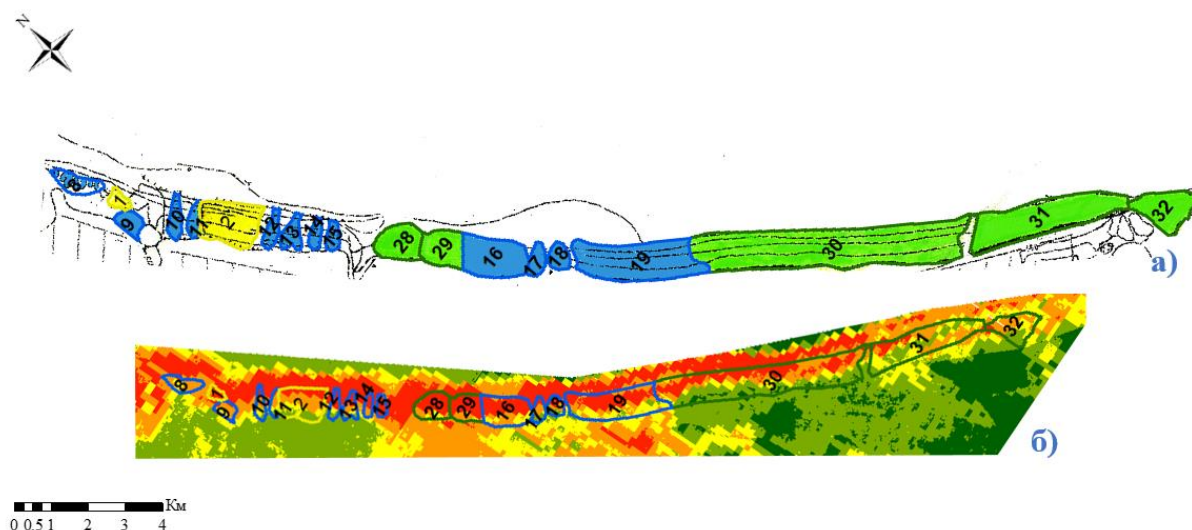
Таблиця 4.6

Співвідношення класифікацій типів активізації зсувних процесів

Класифікація типів зсувів за картою розповсюдження зсувів та динаміки їх розвитку на правобережжі Канівського водосховища 2006 р. (<i>підрозділ 1.3</i>)	Колір класу зсуву	Класифікація стану території за результатами карти сприйнятливості досліджуваної території до зсувів за сприятливого та несприятливого сценаріїв (<i>підрозділ 4.7</i>)	Колір рівня небезпечності території
Зсув, що стабілізувався	Жовтий	Незначний рівень небезпеки	Темно-зелений
Зсув, що тимчасово стабілізувався	Синій	Помірний рівень небезпеки	Зелений Жовтий
		Підвищений рівень небезпеки	
Зсув частково діючий	Зелений	Підвищений рівень небезпеки	Жовтий
		Високий рівень небезпеки	Помаранчевий
Зсув діючий	Червоний	Дуже високий рівень небезпеки	Червоний

Оцифровано карту ділянок зсувних процесів в межах правобережжя Канівського водосховища за даними Кондратюка, 2006 (*підрозділ 1.3*) та обчислено рівень небезпечності для кожної з зсувних ділянок окремо за алгоритмами, описаними у Розділі 3, та побудованими картами для правобережжя Канівського водосховища з аналізом за сімома факторами впливу, продемонстрованими у підрозділах 4.1 – 4.7 (рис. 4.21, рис. 4.22).

За результатами методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів надано детальну оцінку різних градацій змін стану ділянки кожного зсуву, порівняно з єдиною площадною оцінкою зсувної ділянки за даними 2006 року.

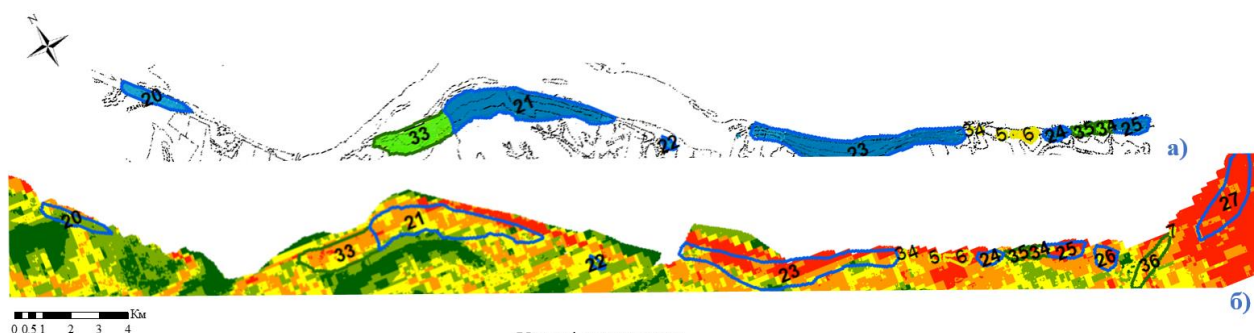


Умовні позначення:

- 21 Номер зсуву
- Класифікація типів зсувів за геологічними даними
- Зсув, що стабілізувався
 - Зсув, що тимчасово стабілізувався
 - Зсув частково діючий
 - Зсув діючий

- Класифікація типів зсувів за даними карти сприйнятливості території до зсувів
- Незначний рівень небезпеки
 - Помірний рівень небезпеки
 - Підвищений рівень небезпеки
 - Високий рівень небезпеки
 - Дуже високий рівень небезпеки

Рис. 4.21. Оцінка достовірності методики дистанційного геоекологічного моніторингу шляхом порівняння результатів: а – Карта поширення зсувів на правому березі Канівського водосховища на ділянці Ржищів – Гребені (Кондратюк, 2006), б – фрагмент карти сприйнятливості території до зсувів, за несприятливого сценарію (Орленко та ін, 2023)



Умовні позначення:

- 21 Номер зсуву
- Класифікація типів зсувів за геологічними даними
- Зсув, що стабілізувався
 - Зсув, що тимчасово стабілізувався
 - Зсув частково діючий
 - Зсув діючий

- Класифікація типів зсувів за даними карти сприйнятливості території до зсувів
- Незначний рівень небезпеки
 - Помірний рівень небезпеки
 - Підвищений рівень небезпеки
 - Високий рівень небезпеки
 - Дуже високий рівень небезпеки

Рис. 4.22. Оцінка достовірності методики дистанційного геоекологічного моніторингу шляхом порівняння результатів: а – Карта поширення зсувів на правому березі Канівського водосховища на ділянці Гребені-Ходорів (Кондратюк, 2006), б – фрагмент карти сприйнятливості території до зсувів, за несприятливого сценарію (Орленко та ін, 2023)

В результаті оцінювання стану 36 ділянок зсувів (*Додаток А, табл. А.1*) та динаміки їх розвитку на правобережжі Канівського водосховища (*підрозділ 1.3*) встановлено, що стабілізовані ділянки зсувів, станом на 2006 рік на сьогодні належать до територій з високим та дуже високим рівнем небезпеки (в середньому на 28% та 63% їх площі відповідно) за несприятливого сценарію розвитку зсувних процесів. За сприятливого сценарію умов розвитку зсувних процесів, сприйнятливість території до розвитку зсувних процесів на раніше стабілізованих ділянках має помірний та високий рівень небезпеки (в середньому на 28% та 41% їх площі відповідно), а площа територій з дуже високим рівнем небезпеки зменшується до 35%.

Ділянки, визначені за картою розповсюдження зсувів та динаміки їх розвитку на правобережжі Канівського водосховища, як тимчасово стабілізовані, станом на 2023 рік в основному при будь-якому сценарію зберігають свій стан та мають рівномірний розподіл за площею між підвищеним, високим та дуже високим рівнем сприйнятливості до зсувних процесів, що вказує на високу вірогідність їх активізації. Також визначено ділянки на яких видно стабілізацію зсувних процесів, майже по всій площі навіть за умови розвитку несприятливого сценарію (ділянка № 22; таблиця Ж1-Ж2, *Додаток Ж*). Деяка частина від розглянутих тимчасово стабілізованих ділянок вже знаходяться в дуже високому рівні небезпеки (ділянки № 15, 25, 27; таблиця Ж1-Ж2, *Додаток Ж*), що дає змогу зробити висновок про дестабілізацію зсувів та необхідність проведення подальших інженерно-геологічних досліджень.

Ділянки, що були визначені, як частково діючі зсуви станом на 2006 рік, за даними дослідження, проведеного нами у 2023 році, можна розподілити на дві категорії, в перших – зберігаються площі високого та дуже високого рівня небезпечності (в середньому більше 70% площі), що вказує на їх активність, а другі мають помірний та підвищений рівень небезпеки (в середньому більше 55% площі), що вказує на їх тимчасову стабілізацію.

Станом на 2006 рік на правобережжі Канівського водосховища не зафіксовано ділянок діючих зсувів.

Карта сприйнятливості досліджуваної території до зсувів – це растрова карта, тому площинна візуалізація об’єктів представлена пікселями, розмір яких визначається розміром пікселя растрового шару з розрізненністю 10 м. Відсоткові співвідношення кількості пікселів зсувних ділянок, за якими визначено рівень сприйнятливості території до зсувів наведено в *Додатку Ж*.

Оскільки за вивченням сучасних екзогенних геологічних процесів на території Київської, Чернігівської та Житомирської областей за 2006 рік створено саме площинну карту зсувних ділянок, кожному зсуву відповідає окремий полігон, в межах якого піксели даних відносяться до різних рівнів сприйнятливості території до зсувів. Кожне зсувне тіло локалізовано та розділено на рівні сприйнятливості до активізації зсувних процесів. Залежно від ділянки зсуву найбільш небезпечною частиною кожного із них є стінка зсуву, яка відноситься у 30 випадках до території з високим та дуже високим рівнем потенційної активізації зсувного процесу за реалізації сприятливого та несприятливого сценарію розвитку зсувів.

Під час проведення польових робіт в 2023 році визначено активні зсувні ділянки (*підрозділ 4.1*), за прогнозною оцінкою сприйнятливості території до зсувів для них визначений дуже високий рівень небезпеки (рис. 4.23). Проведена нами оцінка ділянок методом радарної інтерферометрії показала різний стан даних ділянок протягом 2015 – 2023 років (*підрозділ 4.2, рис. 4.4, 4.5*).

На ділянках 1, 4-9 спостерігались вертикальні зміщення у 2017, 2019, 2022 роках. На ділянках 2 та 3 протягом всього періоду спостережень вертикальних зміщень не зафіксовано. Станом на квітень 2023 року, коли здійснювались польові спостереження, на ділянках 1, 2, 3, 5, 9 вертикальних зміщень не зафіксовано. На ділянках 4, 6, 7, 8 зафіксовані вертикальні зміщення (*підрозділ 4.2, рис. 4.6*). Що підтверджує класифікацію даних зсувів як ділянок з дуже високим рівнем небезпеки.

Доречно зауважити, що обрані нами точки на карті 2006 року не позначені, як зсуви. При проведенні польових досліджень нами спостерігались зсуви, описані у підрозділі 4.1. та сфотографовані і представлені на рисунку 4.2 а-з.

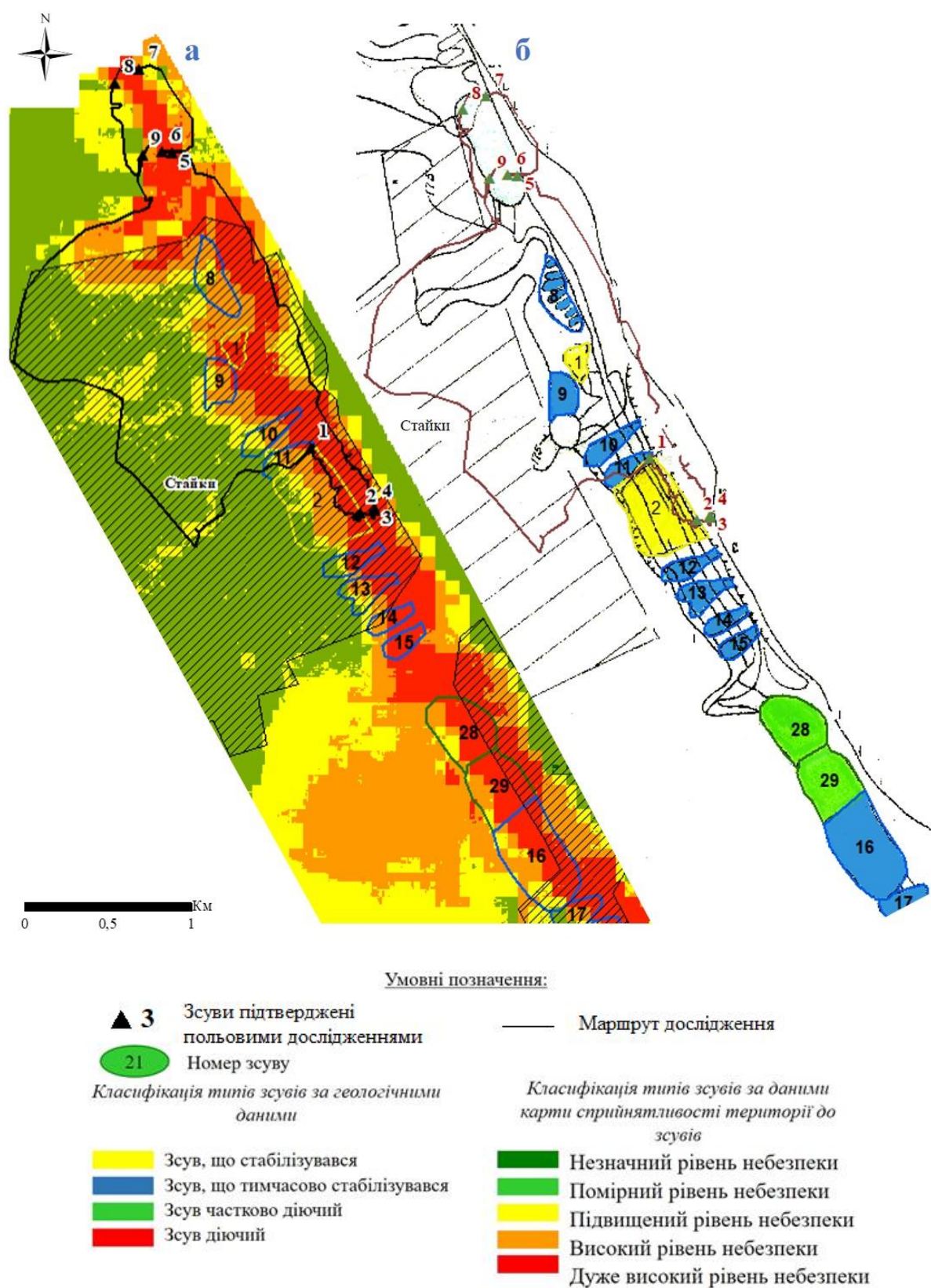


Рис. 4.23. Оцінка достовірності методики дистанційного геоecологічного моніторингу шляхом порівняння результатів: а – фрагмент карти поширення зсувів на правому березі Канівського водосховища на маршруті польових досліджень, проведених автором у 2023 році (Кондратюк, 2006), б – фрагмент карти сприйнятливості території до зсувів, за несприятливого сценарію на маршруті польових досліджень, проведених автором у 2023 році (Орленко та ін, 2023)

Точність і достовірність отриманих прогнозів сприйнятливості території до зсувів залежить від якості, типу та об'єму вхідної інформації та вибору оптимальної комбінації факторів активізації зсувних процесів, що напрямку залежить від характеристик досліджуваної території.

Перевагою використання даних ДЗЗ для оцінки сприйнятливості території до зсувів є їх оперативність та доступність. Оскільки польові геологічні дослідження вимагають детального попереднього планування проведення робіт та значного періоду часу їх реалізації від двох місяців до півроку, водночас використання дистанційних даних дозволяє проводити моніторинг зсувонебезпечних ділянок з періодичністю 12 днів.

Ще однією важливою перевагою застосування даних дистанційного зондування із застосуванням математичного апарату оброблення багатьох критеріїв для отримання результату є оглядовість, площинність. При плануванні і закладанні інженерно-геологічних досліджень, як правило увагу приділяють ділянкам уже відомим, з певною історією спостережень. При площинній оцінці території є можливість оцінити і ті ділянки, на яких попередні дослідження не проводились, але за даними дистанційного геоекологічного моніторингу є високий або дуже високий рівень небезпеки, а попередніми дослідженнями таких фактів не було виявлено, чи ці території не досліджувались.

Створення карти сприйнятливості території до зсувів із застосуванням методики дистанційного геоекологічного моніторингу може надати інформацію з високою періодичністю особам, які приймають рішення щодо розвитку інфраструктури та планування землекористування на локальному та регіональному рівнях.

4.9 Рекомендації щодо застосування методики

Результати проведених досліджень показали достатню точність та достовірність використання розробленої автором методики для виявлення небезпечних зсувних ділянок на території Ржищівської ОТГ, зокрема в межах дослідного полігону Витаців-Стайки на правобережжі Канівського водосховища.

Методика може бути використана місцевими радами об'єднаних територіальних громад та екологічними громадськими організаціями. Використання методики фахівцем вимагає у нього повної вищої освіти за геологічною, географічною, екологічною або технічною спеціальністю. Вміння користуватися програмами візуалізації та обробки даних дистанційного зондування Землі.

Необхідним програмним забезпеченням є наступні програмні комплекси SNAP, QGIS, SAGA, ArcGIS Online. Рекомендується використання 64-бітної операційної системи Windows 7 або новішої версії. Мінімальними вимогами до апаратного забезпечення є наступні: графічна робоча станція на базі 4-ядерного процесора, графічний адаптер з об'ємом пам'яті 512 МБ, об'єм оперативної пам'яті 16 ГБ, вільний об'єм жорсткого диску залежить від масиву даних що обробляються, у нашому дослідженні об'єм усіх даних перевищує 300 ГБ. Також необхідним є доступ до мережі Internet зі швидкістю завантаження не менше 5 МБ/с.

Для проведення дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів на регіональному та локальному рівні є використання знімків супутників Sentinel-1 та Sentinel-2 з просторовою розрізненністю 10 м. При можливості фізичного доступу до об'єкту дослідження необхідним є проведення геологічної оцінки досліджуваної території.

Застосування розробленої методики можливе для проведення дистанційного геоекологічного моніторингу зсувів на всіх ділянках, де зафіксовано розвиток старих чи появу нових зсувів під впливом геолого-географічних, кліматичних та антропогенних факторів.

Висновки до четвертого розділу

1. Проведено тестування розробленої методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів шляхом застосування повного комплексу методів і алгоритмів, описаних у Розділі 3. Одержано карто-схему вертикальних зміщень земної поверхні, карто-схеми просторових розподілів геолого-геофізичних, геоморфологічних, біофізичних параметрів земної поверхні за створеною методикою для території Ржищівської об'єднаної територіальної громади (ОТГ).

2. Для комплексування, аналізу і створення карти сприйнятливості до зсувів для обраної території Ржищівської ОТГ застосовано метод аналізу ієрархій. Аналіз факторів впливу на зсуви реалізовано в кілька послідовних кроків, таких як: розробка ієрархічної структури визначеної задачі, виконання двійкових порівнянь критеріїв, встановлення порівняльної матриці суджень, обчислення векторів пріоритетів, надання значення випадковому індексу (RI), обчислення середнього значення, створення таблиці оцінювання ступенів важливості критеріїв моделі та прийняття остаточного рішення на основі узагальненого критерію.

3. Отримано карти сприйнятливості території до зсувів за даними дистанційного зондування Землі, згідно з якими територію розкласифіковано на класи за п'ятьма категоріями: незначний рівень небезпеки, помірний рівень небезпеки, підвищений рівень небезпеки, високий рівень небезпеки, дуже високий рівень небезпеки. Дуже високий рівень небезпеки мають круті схили Канівського водосховища. Підвищений та високий рівень небезпеки мають схили балкової мережі. Низький рівень небезпеки зафіксовано на вододільних ділянках з густим лісовим покривом та рідколіссям.

4. Розроблено рекомендації щодо впровадження методики дистанційного геоекологічного моніторингу правобережжя Канівського водосховища на прикладі ділянки Витачів-Стайки Ржищівської ОТГ.

5. Подальші дослідження варто спрямувати на удосконалення алгоритмів моделювання параметрів впливу факторів на зсуви. Крім того, для коректної

роботи моделі необхідно залучення радарних даних з більшою просторовою розрізненістю. А також, вважаємо доцільним застосування комерційних даних дистанційного зондування Землі.

Список використаних джерел до четвертого розділу

Orlenko, T., Tomchenko, O., Lischenko, L., Sedlerova, O. (2023) Landslide Hazard Assessment Using Radar Data in the Staiky, Rzhyschiv Urban Hromada Ukraine. European Association of Geoscientists and Engineers. Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities, Sep. 2023, Volume 2023, p.1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500027>

Демчишин, М. Г. (1992). Современная динамика склонов на территории Украины. Киев: Наук. думка, 256 с.

Кондратюк, С.В. (2006). Вивчення сучасних екзогенних процесів на території Київської, Чернігівської та Житомирської областей за 2001 – 2005 рр. (Кн.1). Київ: ГГП ПДРГП «Північгеологія».

Лялько В.І., Дугін С.С., Сибірцева О.М., Дорофей Є.М., Голубов С.І., Орленко Т.А. (2023). Про можливості визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі. *Геологічний журнал*. No 4 (385). С. 61–78. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929>

Орленко Т. (2023а). Методика дистанційного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні за даними радарної інтерферометрії. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 2023, 10(3), 16–20. DOI:10.36023/ujrs.2023.10.3.247. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/247>.

Орленко Т. (2023б). Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні правобережжя канівського водосховища. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. 4(103), pp. 5-13 DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.103.01>

Орленко Т.А., Седлерова О.В., Лубський М.С., Голубов С.І., Хижняк А.В. (2023) Картування зсувонебезпечних районів із застосуванням методу аналізу ієрархій на прикладі правобережжя Канівського водосховища. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 2023, 10(4), 17-21. DOI:10.36023/ujrs.2023.10.4.251.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню актуального наукового завдання – створенню та науковому обґрунтуванню методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів у межах правобережжя Канівського водосховища, а також створенню алгоритму прогнозування виникнення нових або активізації стабілізованих зсувів за допомогою методів дистанційного зондування Землі, зокрема, з використанням радарних даних на основі методу аналізу ієрархій.

1. Розроблено методику картографування небезпеки зсувних процесів шляхом комплексування історичних даних наземного спостереження процесів зсувоутворення на правобережжі Канівського водосховища та даних дистанційного зондування Землі. Для виконання дисертаційного дослідження використано радарні супутникові дані Sentinel-1 SLC, просторовою розрізненністю 10 м, Landsat-8, просторовою розрізненністю 30 м, SRTM, просторовою розрізненністю 30 м.

2. Для отримання результату методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів проаналізовано та обрано, як суттєві, фактори вертикальних зміщень земної поверхні; геолого-географічні фактори, а саме: крутизна схилів балок і долин річок, неотектонічна активність, літологічний склад відкладів; біофізичні фактори, а саме: вологість ґрунту, розвиток рослинності; антропогенний фактор (розподіл земельних ділянок за способом використання), що обумовлюють активізацію зсувного процесу. Створено серію синтетичних карт для подальшого аналізу зсувів.

3. Розроблено алгоритм та побудовано, з використанням радарних даних супутника Sentinel 1, карто-схему вертикальних зміщень земної поверхні досліджуваної території, яка є найсуттєвішим фактором при комплексуванні даних.

4. Застосовано метод аналізу ієрархій для комплексування даних дистанційного зондування Землі, геологічних, структурних, геоморфологічних даних. Результатом аналізу є створена карта сприйнятливості території до зсувів для сприятливого сценарію і для несприятливого сценарію. Проведено

класифікацію території дослідження на класи за п'ятьма категоріями: незначний рівень небезпеки, помірний рівень небезпеки, підвищений рівень небезпеки, високий рівень небезпеки, дуже високий рівень небезпеки.

5. Проведено валідацію методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів на дослідному полігоні, проведена завірка результатів оцінки на конкретних зсувах ділянки Витаців-Стайки. Розроблена методика дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів та побудована карта сприйнятливості території до зсувів дозволяє зробити прогноз небезпечності не тільки для значної території, але й дати оцінку небезпечності певним ділянкам уже закартованого зсуву. У результаті валідації і проведених польових досліджень були закартовані зсуви, які раніше не були зазначені на картах.

6. Надано рекомендації щодо застосування методики дистанційного геоекологічного моніторингу зсувних процесів для конкретних користувачів. Описані вимоги до виконавців і апаратно-технічного забезпечення досліджень. Методика може бути застосована об'єднаними територіальними громадами для складання планів використання земель. Корисною ця методика може бути і конкретним підприємствам видобувної галузі або агропромислового комплексу.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця А.1.

Каталог зсувів Канівського водосховища, обстежених в 2001 - 2005 р.р. (Кондратюк, 2006)

№ з/п	Номер зсуву за кадастром	Номер зсуву за каталогом	Місцезнаходження зсуву	Розміри зсуву		Рік спостереження	Стан зсуву на період обстеження	Характеристика зсувного зміщення						Чинники, які провокують зміщення
				довжина, м ширина, м	площа, м			активна частина тіла зсуву	розміри		% активізації в поточно муроці відносно старої форми	Потужність порід що змістились, м об'єм, м³	характер зміщення порід	
									довжина, м ширина, м	площа, м				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Канівське водосховище Ділянка Халеп'я – Витачів														
9	349	I	с. Халеп'я, 250м на північний схід від цегельного заводу, правий схил долини р. Дніпро	$\frac{170}{87}$	13600	2004	ч.д.	н.ч.д.	$\frac{12}{10}$	120	0,88	$\frac{1,0}{120}$	Б.П	перезволоження раніше зміщених порід
10	350	II	с. Халеп'я, 300 м на північний схід від цегельного заводу, правий схил долини р. Дніпро	$\frac{200}{120}$	16500	2004	ч.д.	л.ч.д.	$\frac{30}{20}$	600	4	$\frac{0,8-1,0}{600}$	Б.П	перезволоження раніше зміщених порід
11	351	III	с. Халеп'я, 500м на схід від цегельного заводу, правий схил долини р.Дніпр	$\frac{205}{114}$	16500	2004	ч.д.	ц.ч.д.	$\frac{40}{20}$	800	5	$\frac{1,0}{750}$	Б.П	перезволоження раніше зміщених порід
12	352	IV	с. Халеп'я, 600 м на схід від цегельного заводу, правий схил долини р. Дніпро	$\frac{150}{85}$	12700	2004	ч.д.	п.ч.д.	$\frac{20}{15}$	300	2,4	$\frac{0,5-1,0}{250}$	Б.П	перезволоження раніше зміщених порід
13	296	V	с. Халеп'є 650м від цегельного заводу на ПнС, правий схил долини р. Дніпро	$\frac{175}{32}$	6350	2004	ч.д.	с.з.	$\frac{10}{5}$	50	0,8	$\frac{1,0}{50}$	ОС	перезволоження раніше зміщених порід
14	298	VII	с. Халеп'я, 750 м на північний схід від цегельного заводу, правий схил долини р. Дніпро	$\frac{140}{85}$	9070	2004	ч.д.	с.з.	$\frac{10}{2}$	20	0,2	$\frac{1,0}{20}$	ОС	перезволоження раніше зміщених порід

Продовження таблиці А.1.

№ з/п	Номер зсуву за кадастром	Номер зсуву за каталогом	Місцезнаходження зсуву	Розміри зсуву		Рік спостереження	Стан зсуву на період обстеження	Характеристика зсувного зміщення						Чинники, які провокують зміщення
				довжина, м ширина, м	площа, 2			активна частина тіла зсуву	розміри		% активізації в поточно мурозі відносно старої форми	Потужність порід що змістились, м об'єм, м³	характер зміщення порід	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Канівське водосховище Ділянка Халеп'я – Витачів														
15	303	XII	с. Халеп'я, 1,2 км на північний схід від цегельного заводу, правий схил долини р. Дніпро	$\frac{260}{100}$	16700	2004	ч.д.	д.	$\frac{35}{20}$	700	4,2	$\frac{0,3-1,0}{650}$	Б.П	перезволоження раніше зміщених порід
16	315	XXIV	Пн-Зх околиця с. Витачів, правий схил долини р. Дніпро	$\frac{355}{240}$	48000	2004	ч.д.	л.ч.д.	$\frac{55}{30}$	1650	3,4	$\frac{1,5-2,0}{1500}$	Б.П	перезволоження раніше зміщених порід
17	369	XXV	Пн-Зх околиця с. Витачів, правий схил долини р. Дніпро	$\frac{240}{630}$	190500	2004	ч.д.	с.з.	$\frac{5}{4}$	20	0,01	$\frac{1,0}{80}$	ОС	перезволоження раніше зміщених порід
18	373	XLVIII	Правий корінний схил долини р. Дніпро, Сх околиця с. Витачів	$\frac{165}{125}$	18562	2004	ч.д.	д.	$\frac{15}{10}$	150	0,8	$\frac{0,6}{100}$	Б.П	перезволоження раніше зміщених порід
19	374	XLIX	Правий корінний схил долини р. Дніпро Пд-Сх околиця с. Витачів	$\frac{185}{73}$	12154	2004	ч.д.	л.ч.д.	$\frac{30}{20}$	600	5	$\frac{0,5-1,0}{500}$	Б	перезволоження раніше зміщених порід
20	375	L	Правий корінний схил р. Дніпро на Сх околиці с. Витачів	$\frac{210}{140}$	26460	2004	ч.д.	п.ч.д.	$\frac{20}{10}$	200	0,76	$\frac{0,5-1,0}{150}$	Б.П	перезволоження раніше зміщених порід
21	376	LI	Правий схил долини.р. Дніпро Пд-Сх околиці с. Витачів	$\frac{450}{500}$	202500	2004	ч.д.	п.ч.д.	$\frac{70}{50}$	3500	1,7	$\frac{0,5-1,0}{3000}$	Б	перезволоження раніше зміщених порід
22	377	LII	Правий схил долини р. Дніпро, Пд-Сх околиця с. Витачів	$\frac{140}{625}$	87500	2004	ч.д.	д.	$\frac{30}{18}$	540	0,6	$\frac{1,0}{400}$	Б	перезволоження раніше зміщених порід
Ділянка Стайки														
23	471	CXIII	Правий корінний схилр. Дніпро, на Пд-Сх від цегельного заводу № 12 с. Стайки	$\frac{300}{450}$	120000	2004	ч.д.	д.	$\frac{40}{35}$	1400	1,2	$\frac{0,5-1,0}{1000}$	Б.П	виклиню-вання підземнихвод
24	480	CXIV	0,75 км на Пд-Сх від цегельного заводу № 12, правий корінний схил долини р. Дніпро	$\frac{375}{250}$	84375	2004	ч.д.	л.ч.д.	$\frac{20}{15}$	300	1,6	$\frac{1,0}{250}$	Б.П	виклиню-вання підземнихвод

Продовження таблиці А.1.

№ з/п	Номер зсуву за кадастром	Номер зсуву за каталогом	Місцезнаходження зсуву	Розміри зсуву		Рік спостереження	Стан зсуву на період обстеження	Характеристика зсувного зміщення						Чинники, які провокують зміщення
				<u>довжина, м</u> <u>ширина, м</u>	площа, 2			активна частина тіла зсуву	розміри		активізації в поточно му році відносно старої форми	<u>Потужність порід що змістились, м</u> <u>об'єм, м³</u>	характер зміщення порід	
									<u>довжина, м</u> <u>ширина, м</u>	площа, м				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ділянка Гребені														
25	490	CXXI	Пн-Сх околиця с. Гребені, правий схил долини р. Дніпро	<u>360</u> 1400	504000	2004	ч.д.	I зсувна тераса	<u>10 30</u> 20 40	4000	0,79	<u>0,5-3,0</u> 1100	Б.П	виклиню-вання підземних вод
26	493	CXXI V	1,25 км на Пд-Сх від Пд-Сх околиці с. Гребені, в правому схилі р. Дніпро	<u>110</u> 650	71500	2004	ч.д.	I зсувна тераса	<u>65</u> 10	650	0,9	<u>0,5-1,5</u> 1300	Б.П	виклиню-вання підземних вод
Ділянка Ржищів														
27	816	CXXV II	правий корінний схил долини р. Дніпро на Пн-Сх околиці смт Ржищів	<u>3750</u> 450	1687500	2004	ч.д.	I зсувна тераса	<u>90</u> 50	5000	0,3	<u>0,5-1,00</u> 4500	Б.П	абразія

Примітки: 1. У колонці 7 стан зсуву: ч.д. – частково діючий. 2. У колонці 8 активна частина зсуву: Д – депресія; л.ч.д – ліва частина депресії; п.ч.д – права частина депресії; ц.ч.д – центральна частина депресії; н.ч.д – нижня частина депресії; с.з – стінка зриву; ПБ – правий борт. 3. У колонці 13 характер зміщення порід: Б – блокове; БП – блоково-потокове; ОБ – обвалення; ОС – осипання

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1

Використані в дослідженні знімки супутника Sentinel-1

№	Дата знімання	Поляризація космічного знімку	Орбіта Космічного знімку	№	Дата знімання	Поляризація космічного знімку	Орбіта
1	20150301	VV+VH	Descending	26	20200310	VV+VH	Descending
2	20150313	VV+VH	Descending	27	20200322	VV+VH	Descending
3	20150325	VV+VH	Descending	28	20200403	VV+VH	Descending
4	20150406	VV+VH	Descending	29	20200415	VV+VH	Descending
5	20150418	VV+VH	Descending	30	20200427	VV+VH	Descending
6	20160307	VV+VH	Descending	31	20210305	VV+VH	Descending
7	20160319	VV+VH	Descending	32	20210317	VV+VH	Descending
8	20160331	VV+VH	Descending	33	20210329	VV+VH	Descending
9	20160412	VV+VH	Descending	34	20210410	VV+VH	Descending
10	20160424	VV+VH	Descending	35	20210422	VV+VH	Descending
11	20170302	VV+VH	Descending	36	20220312	VV+VH	Descending
12	20170314	VV+VH	Descending	37	20220324	VV+VH	Descending
13	20170326	VV+VH	Descending	38	20220405	VV+VH	Descending
14	20170407	VV+VH	Descending	39	20220417	VV+VH	Descending
15	20170419	VV+VH	Descending	40	20220429	VV+VH	Descending
16	20180309	VV+VH	Descending	41	20230307	VV+VH	Descending
17	20180321	VV+VH	Descending	42	20230319	VV+VH	Descending
18	20180402	VV+VH	Descending	43	20230331	VV+VH	Descending
19	20180414	VV+VH	Descending	44	20230412	VV+VH	Descending
20	20180426	VV+VH	Descending	45	20230424	VV+VH	Descending
21	20190304	VV+VH	Descending				
22	20190316	VV+VH	Descending				
23	20190328	VV+VH	Descending				
24	20190409	VV+VH	Descending				
25	20190421	VV+VH	Descending				

ДОДАТОК В

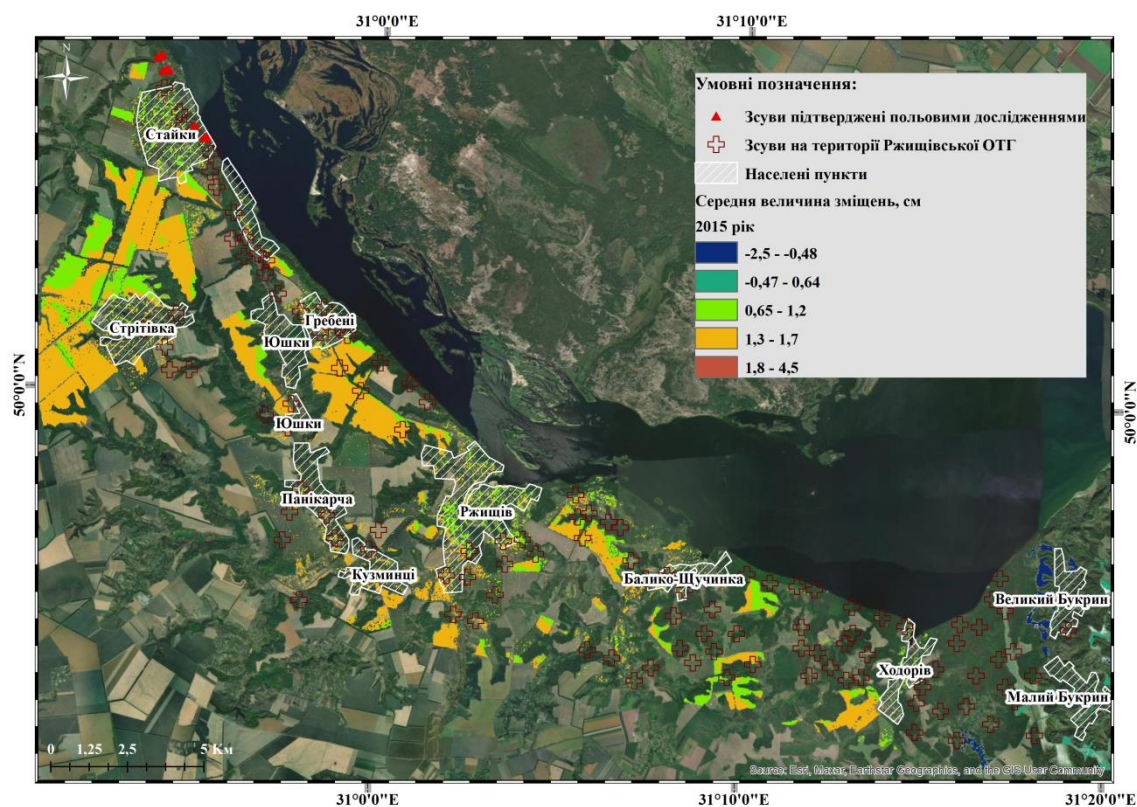


Рис. В1. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2015 року

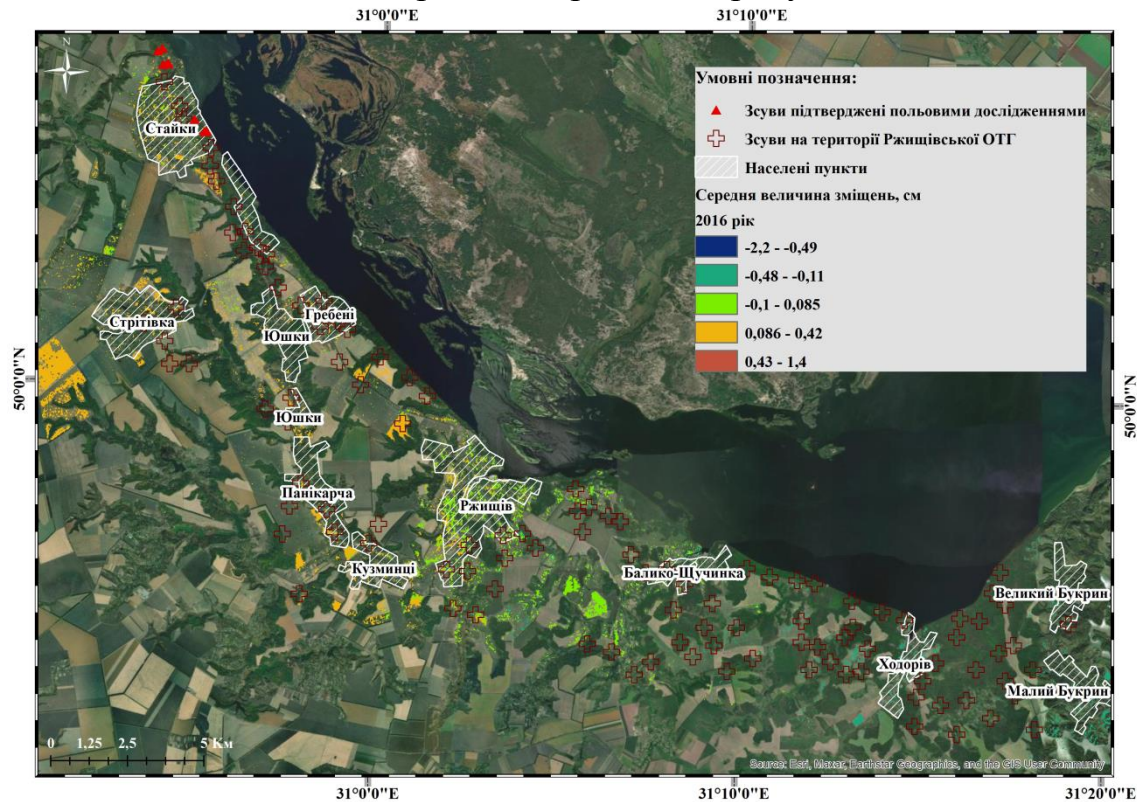


Рис. В2. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2016 року

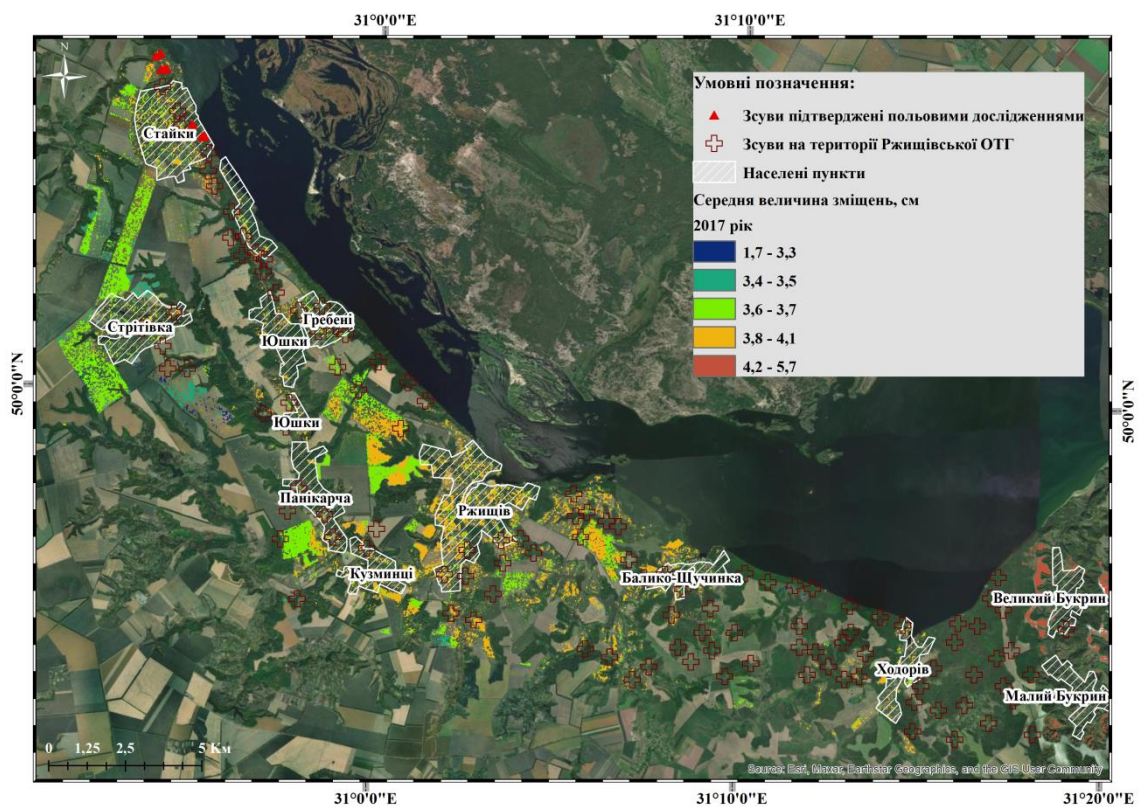


Рис. В3. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2017 року

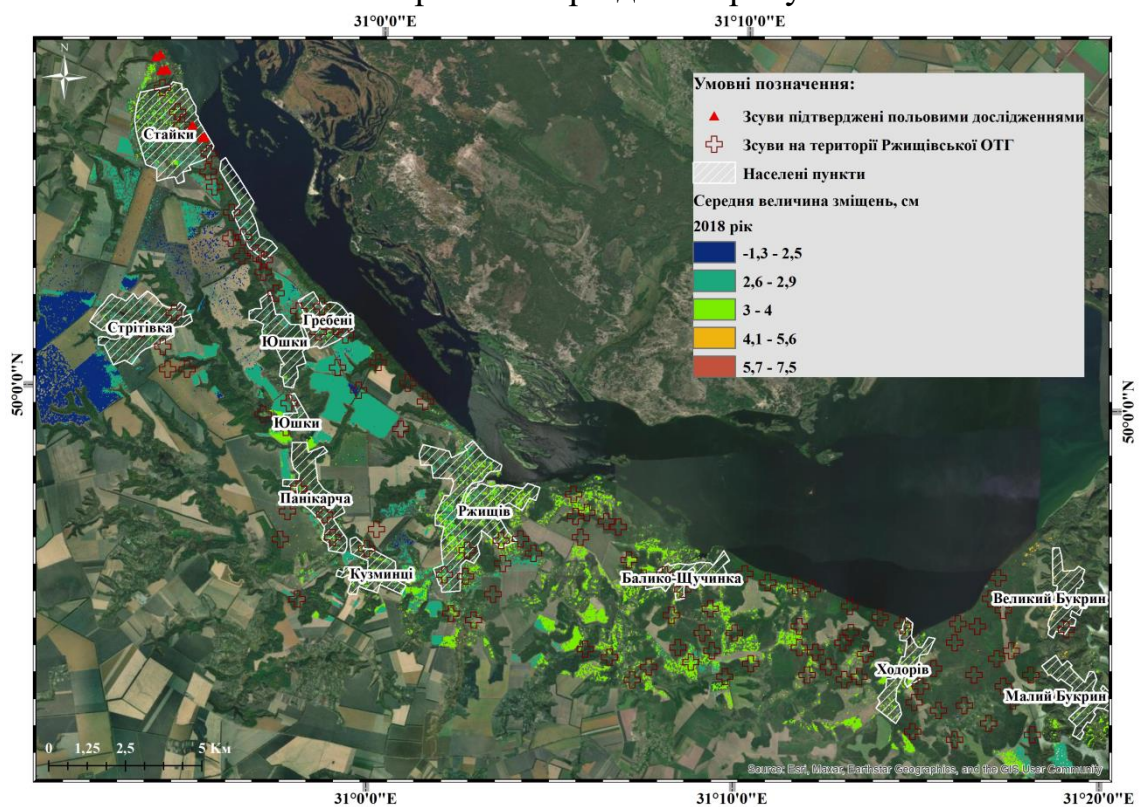


Рис. В4. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2018 року

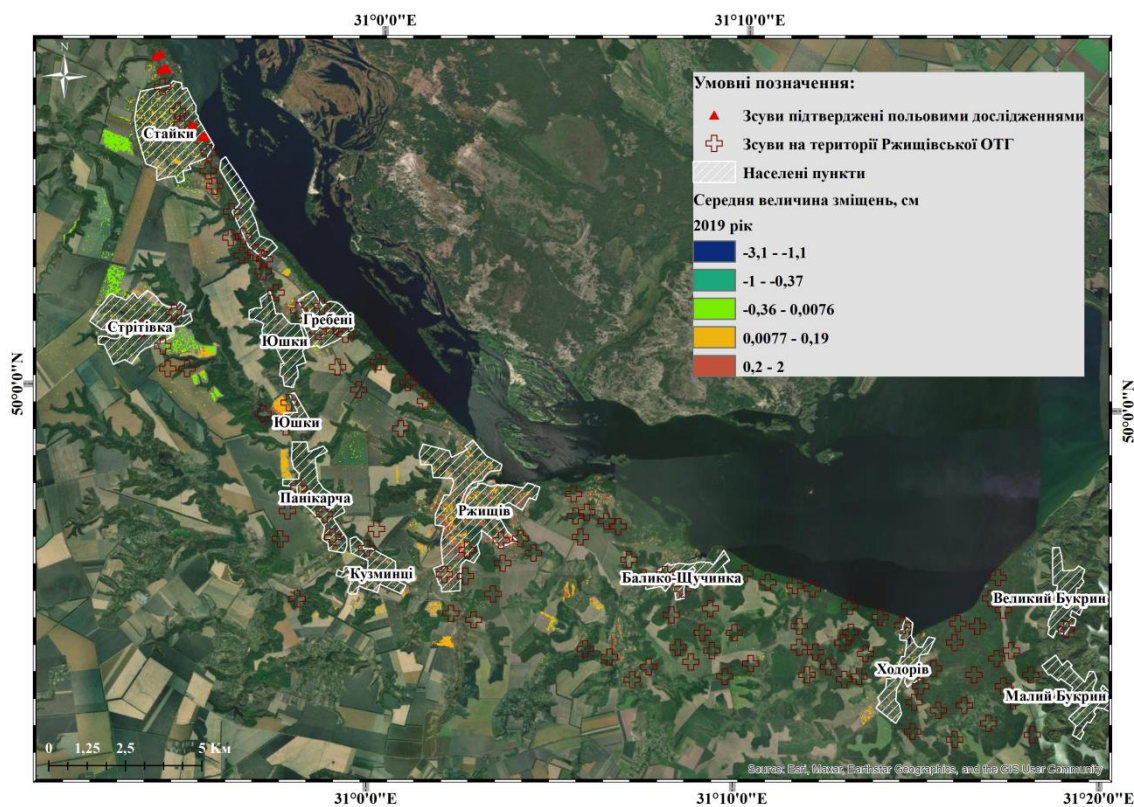


Рис. В5. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2019 року

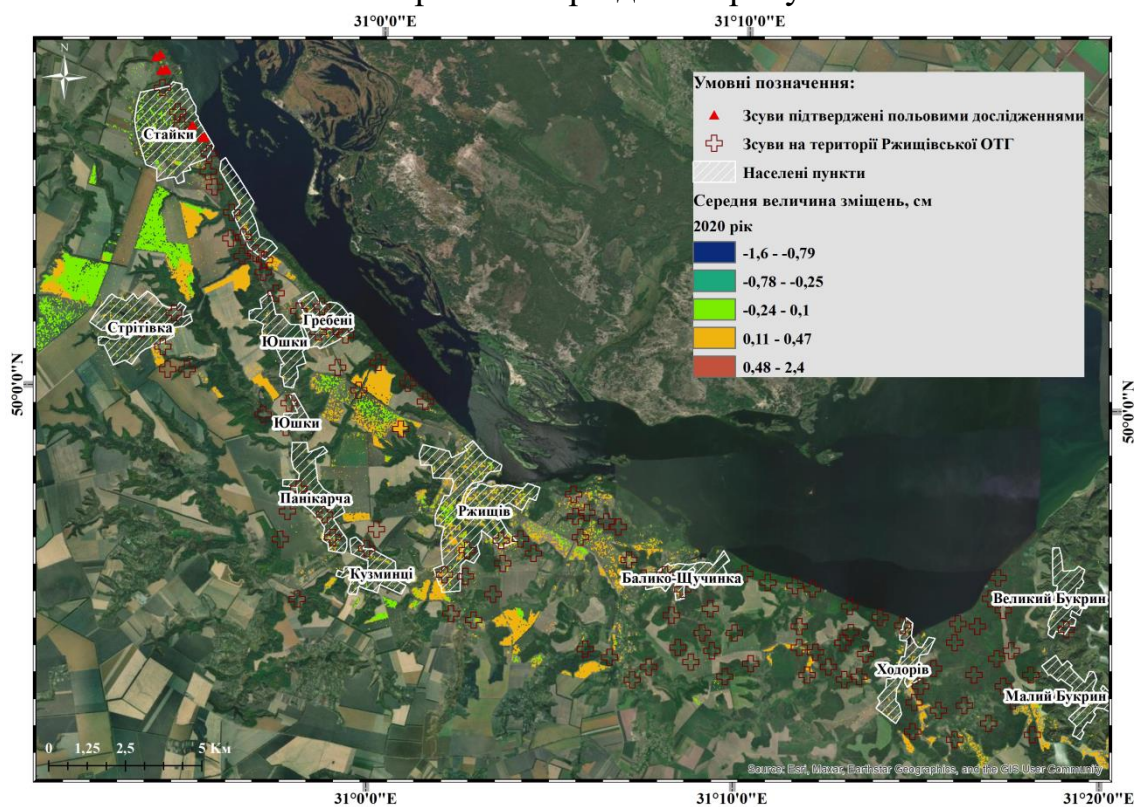


Рис. В6. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2020 року

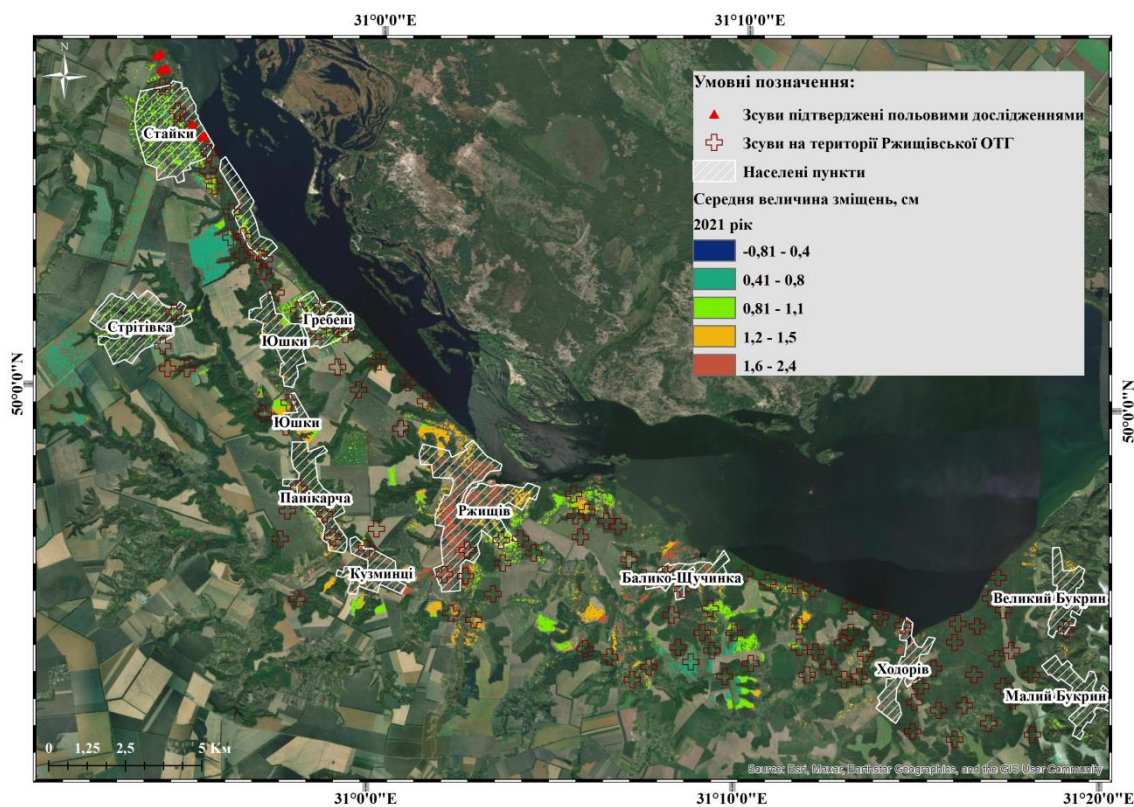


Рис. В7. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2021 року

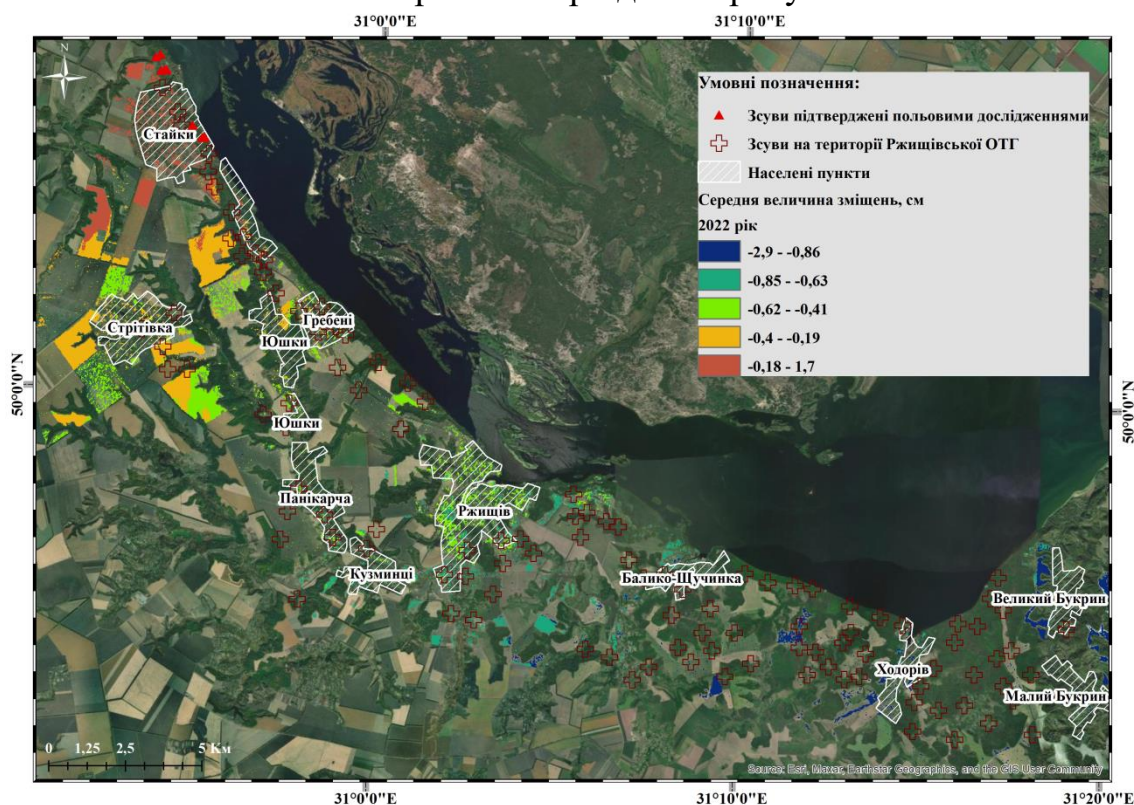


Рис. В8. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2022 року

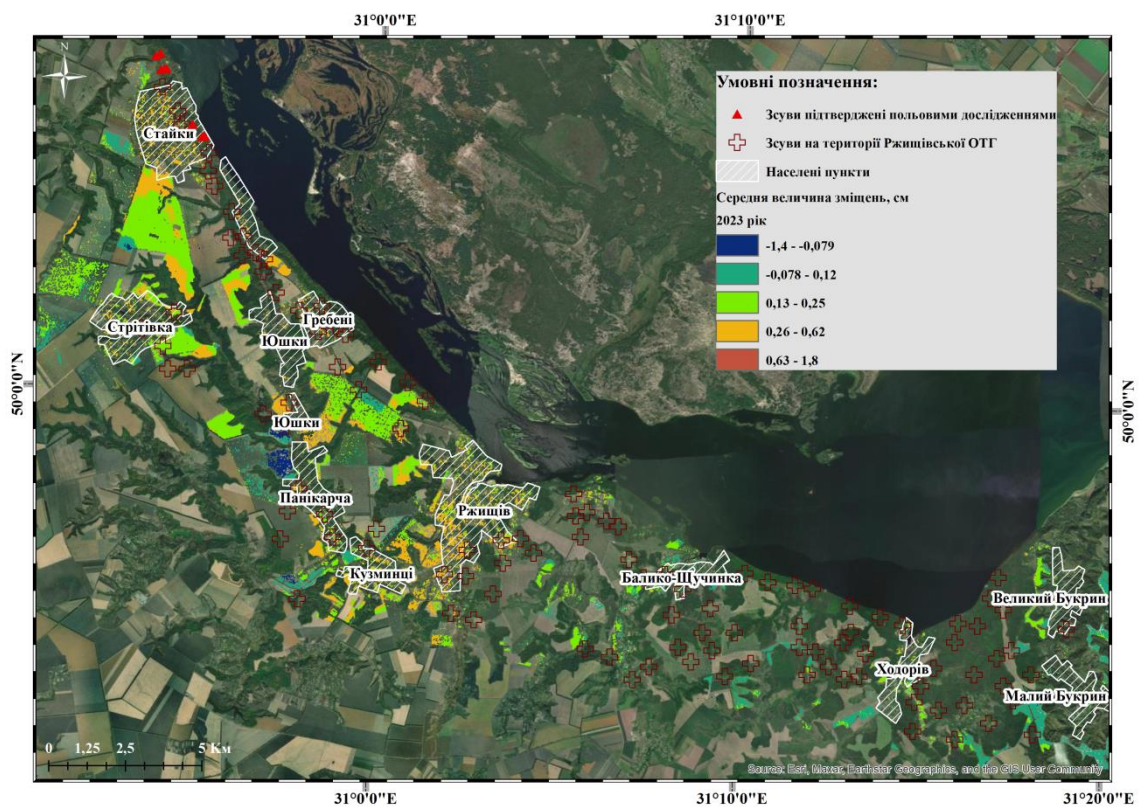


Рис. В9. Карто-схема середніх числових значення вертикальних зміщень земної поверхні за період 2023 року

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1

Матриця порівнянь для першого рівня ієрахії,
сприятливого сценарію розвитку зсувів

Рівень 1		
Оцінка сприйнятливості території до зсувів	Стабільний стан	Нестабільний стан
Стабільний стан	1	6,00000
Нестабільний стан	0,167	1
Сума	1,167	7,000

Таблиця Г.2

Матриця порівнянь для першого рівня ієрахії,
несприятливого сценарію розвитку зсувів

Рівень 1		
Оцінка сприйнятливості території до зсувів	Стабільний стан	Нестабільний стан
Стабільний стан	1	0,16667
Нестабільний стан	6,000	1
	7,000	1,167

ДОДАТОК Д

Таблиця Д.1

Матриця порівнянь для третього рівня ієрахії, параметру – Зміщення земної поверхні

Зміщення земної поверхні	Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
Незначний рівень небезпеки	1	2	3	4	5
Помірний рівень небезпеки	0,5	1	2	2	3
Підвищений рівень небезпеки	0,33	0,5	1	2	2
Високий рівень небезпеки	0,25	0,5	0,5	1	2
Дуже високий рівень небезпеки	0,2	0,33	0,5	0,5	1
Сума	2,28	4,33	7	9,5	13

Таблиця Д.2

Матриця порівнянь для третього рівня ієрахії, параметру – Крутизна схилів

Крутизна схилів	Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
Незначний рівень небезпеки	1	2	3	4	5
Помірний рівень небезпеки	0,5	1	2	2	3
Підвищений рівень небезпеки	0,33	0,5	1	2	2
Високий рівень небезпеки	0,25	0,5	0,5	1	2
Дуже високий рівень небезпеки	0,2	0,33	0,5	0,5	1
Сума	2,283	4,33	7	9,5	13

Таблиця Д.3

Матриця порівнянь для третього рівня ієрахії, параметру – Літологічні різності

Літологічні різності	Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
Незначний рівень небезпеки	1	2	3	3	4
Помірний рівень небезпеки	0,5	1	2	3	3
Підвищений рівень небезпеки	0,33	0,5	1	2	2
Високий рівень небезпеки	0,33	0,33	0,5	1	2
Дуже високий рівень небезпеки	0,25	0,33	0,5	0,5	1
Сума	2,42	4,16	7	9,5	12

Таблиця Д.4

Матриця порівнянь для третього рівня ієрахії, параметру – Поверхнева вологість ґрунту

Поверхнева вологість ґрунту	Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
Незначний рівень небезпеки	1	0,50	0,33	0,25	0,20
Помірний рівень небезпеки	2	1,00	0,33	0,33	0,25
Підвищений рівень небезпеки	3	3,00	1,00	0,50	0,33
Високий рівень небезпеки	3	3,00	2,00	1,00	0,50
Дуже високий рівень небезпеки	4	3	3	2	1
Сума	13	10,5	6,66	4,08	2,28

Таблиця Д.5

Матриця порівнянь для третього рівня ієрахії, параметру – Базисні поверхні

Базисні поверхні	Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
Незначний рівень небезпеки	1	2	2	2	3
Помірний рівень небезпеки	0,5	1	2	2	3
Підвищений рівень небезпеки	0,5	0,5	1	2	2
Високий рівень небезпеки	0,5	0,5	0,5	1	2
Дуже високий рівень небезпеки	0,33	0,33	0,5	0,5	1
Сума	2,83	4,33	6	7,5	11

Таблиця Д.6

Матриця порівнянь для третього рівня ієрахії, параметру – Щільність лінеаментів

Щільність лінеаментів	Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
Незначний рівень небезпеки	1	2	3	3	4
Помірний рівень небезпеки	0,5	1	2	3	3
Підвищений рівень небезпеки	0,33	0,5	1	2	2
Високий рівень небезпеки	0,33	0,33	0,5	1	2
Дуже високий рівень небезпеки	0,25	0,33	0,5	0,5	1
Сума	2,41	4,16	7	9,5	12

Таблиця Д.7

Матриця порівнянь для третього рівня ієрахії, параметру – Вегетаційний індекс NDVI

Вегетаційний індекс NDVI	Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
Незначний рівень небезпеки	1	0,50	0,33	0,33	0,33
Помірний рівень небезпеки	2	1	0,50	0,33	0,33
Підвищений рівень небезпеки	3	2	1	0,33	0,50
Високий рівень небезпеки	3	3	2	1,00	0,50
Дуже високий рівень небезпеки	3	3	2	2,00	1,00
Сума	12	9,5	5,833333333	4	2,666666667

Таблиця Д.8

Матриця порівнянь для третього рівня ієрахії, параметру – Типи земного покриття

Типи земного покриття	Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
Незначний рівень небезпеки	1	1	1	1	2
Помірний рівень небезпеки	1	1	1	1	2
Підвищений рівень небезпеки	1	1	1	1	2
Високий рівень небезпеки	1	1	1	1	1
Дуже високий рівень небезпеки	0,5	0,5	0,5	1	1
Сума	4,5	4,5	4,5	5	8

ДОДАТОК Е

Діаграми відсоткового співвідношення вагових критеріїв сценаріїв
(альтернатив) за методом аналізу ієрархій

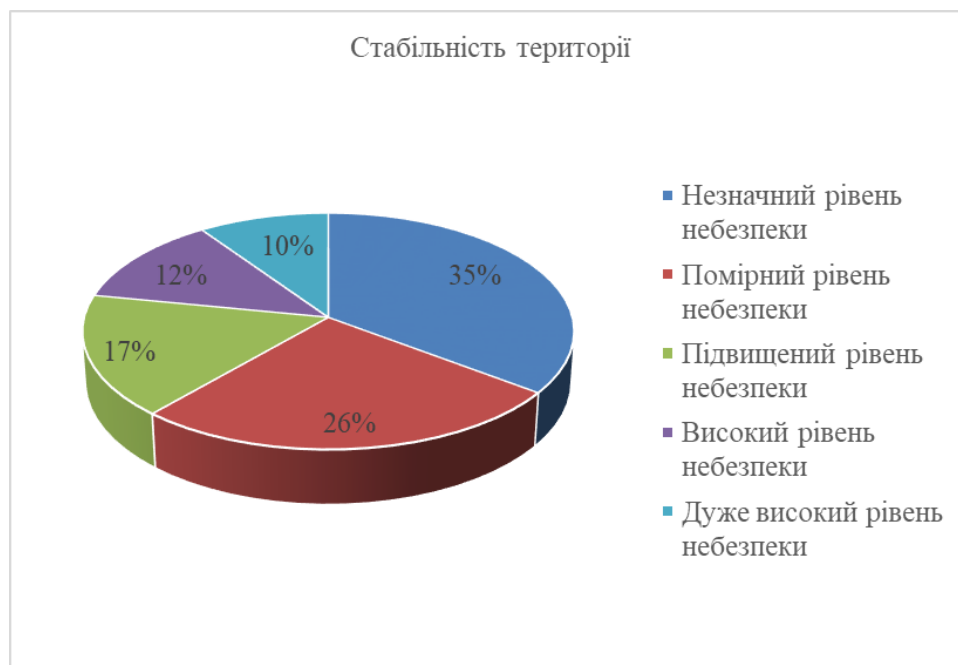


Рис. Е1. Відсоткове співвідношення вагових критеріїв стабільного стану
території

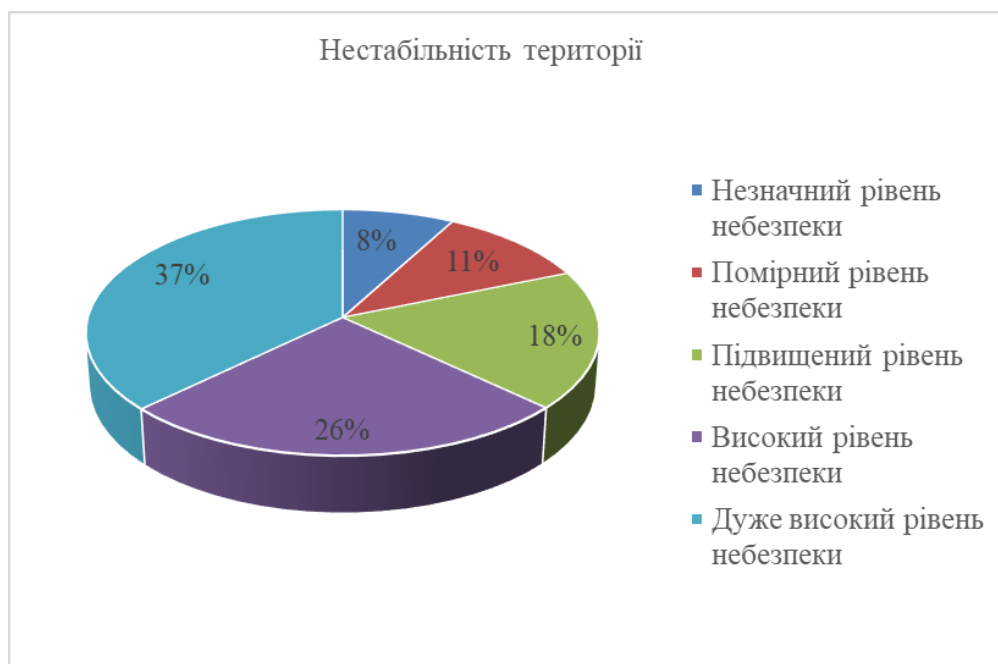


Рис. Е1. Відсоткове співвідношення вагових критеріїв нестабільного стану
території

ДОДАТОК Ж

Таблиця Ж 1

Відсотоків співвідношення пікселів на дослідних зсувних ділянках

Но ме р зсу ву	Стан зсуву	Несприятливий сценарій				
		Рівень сприйнятливості ділянки				
		Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
1	стабілізований				30,55	69,45
2	стабілізований		21,52	15,38	40,04	23,07
3	стабілізований				6,67	66,67
4	стабілізований				45,83	54,17
5	стабілізований				48,21	51,79
6	стабілізований				19,08	80,92
7	стабілізований				6	94
8	тимчасово стабілізований		5,32	21,29	68,91	4,48
9	тимчасово стабілізований		2,3	25,73	57,11	14,85
10	тимчасово стабілізований		12,04	35,87	34,49	17,59
11	тимчасово стабілізований		25,72	21,01	37,28	15,89
12	тимчасово стабілізований		27,08	17,97	3,39	51,56
13	тимчасово стабілізований		17,62	16,08	33,92	32,38
14	тимчасово стабілізований			8,03	36,86	55,11
15	тимчасово стабілізований				7,69	92,31
16	тимчасово стабілізований		0,69	17,03	26,95	55,33
17	тимчасово стабілізований		33,57	5,63	30,99	29,81
18	тимчасово стабілізований		22,47	5,05	32,11	40,37
19	тимчасово стабілізований		4,26	25,85	28,16	41,73
20	тимчасово стабілізований	0,5	22,44	6,22	20,58	2,83
21	тимчасово стабілізований	1,98	11,53	34,46	45,17	6,72
22	тимчасово стабілізований	5,99	71,16	22,84		
23	тимчасово стабілізований	1,5738	8,84	15,37	32,59	38,91

24	тимчасово стабілізований	0	0	21,63	65,48	10,22
25	тимчасово стабілізований	0	0	12,74	23,15	61,61
26	тимчасово стабілізований			16,68	54,79	28,83
27	тимчасово стабілізований	0	0	0	9,7	88,08
28	частково діючий			12,57	21,41	66,02
29	частково діючий			4,48	22,18	73,34
30	частково діючий	5,93	29,03	10,41	25,26	29,07
31	частково діючий		27,76	31,14	30,54	10,55
32	частково діючий	0	26,62	23	44,45	3,5
33	частково діючий	0,15	5,99	28,68	58,99	6,12
34	частково діючий	0	10,42	11,97	47,49	20,27
35	частково діючий	0	0	28,49	53,02	13,02
36	частково діючий	0	0,89	22,84	28,69	1,3

Таблиця Ж 2

Відсотоків співвідношення пікселів на дослідних зсувних ділянках

Но ме р зсу ву	Стан зсуву	Сприятливий сценарій				
		Рівень сприйнятливості ділянки				
		Незначний рівень небезпеки	Помірний рівень небезпеки	Підвищений рівень небезпеки	Високий рівень небезпеки	Дуже високий рівень небезпеки
1	стабілізований				21,1	78,9
2	стабілізований		25,84	11,33	39,76	23,07
3	стабілізований				35,56	37,78
4	стабілізований			33	34	33
5	стабілізований			48,21	47,02	4,76
6	стабілізований		0,37	18,72	40,92	40
7	стабілізований				72	28
8	тимчасово стабілізований		11,06	16,8	65,69	6,44
9	тимчасово стабілізований		2,93	27,41	53,14	16,53
10	тимчасово стабілізований		18,29	36,11	25,69	19,91
11	тимчасово стабілізований		34,1	12,71	36,99	16,19

12	тимчасово стабілізований		27,34	17,7	3,39	51,56
13	тимчасово стабілізований		17,84	17,4	30,84	33,92
14	тимчасово стабілізований			8,03	36,86	55,11
15	тимчасово стабілізований			0,33	6,02	93,65
16	тимчасово стабілізований		1,43	15,37	26,26	56,95
17	тимчасово стабілізований		30,52	8,22	31,22	30,05
18	тимчасово стабілізований		17,2	9,4	31,65	41,74
19	тимчасово стабілізований		11,05	23,22	18,86	46,87
20	тимчасово стабілізований	3,67	21,59	11,87	14,13	1,3
21	тимчасово стабілізований	0,17	10,73	25,05	53,12	10,79
22	тимчасово стабілізований			55,43	43,44	1,12
23	тимчасово стабілізований	0,03	8,36	20,63	27,69	37,75
24	тимчасово стабілізований	0	34,96	52,29	9,78	0,29
25	тимчасово стабілізований	0	0	2,26	12,5	
26	тимчасово стабілізований		1,28	31,29	37,9	29,51
27	тимчасово стабілізований	0	0	5,71	30,93	59,96
28	частково діючий		14,15	18,71	17,96	49,18
29	частково діючий		1,16	18,86	6,88	73,11
30	частково діючий	7,33	29,17	11,32	21,39	30,79
31	частково діючий	0,9	33,87	31,91	22,26	11,05
32	частково діючий	6,54	27,09	30,06	30,65	3,21
33	частково діючий	0	4,8	17,09	41,35	36,7
34	частково діючий	0	10,42	9,84	49,42	20,46
35	частково діючий	0	0	27,92	53,21	13,39
36	частково діючий	0	0	11,18	41,06	1,48

ДОДАТОК 3

Список публікацій за темою дисертації

Матеріали, опубліковані в періодичних виданнях:

1. Орленко Т. (2023) Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні правобережжя Канівського водосховища. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(103), 5-13. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.103.01>
2. Орленко Т. (2023) Методика дистанційного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні за даними радарної інтерферометрії. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10(3), 16– 20. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.247>
3. Орленко Т.А., Седлерова О.В., Лубський М.С., Голубов С.І., Хижняк А.В. (2023) Картування зсувонебезпечних районів із застосуванням методу аналізу ієрархій на прикладі правобережжя Канівського водосховища. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10(4), 17- 21. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.4.251> (Особистий внесок: обробка та аналіз дистанційних даних, підготовка топографічних, морфометричних та літологічних даних, застосування геоінформаційних методів дослідження, проведення експериментальних досліджень).
4. Лялько В.І., Дугін С.С., Сибірцева О.М., Дорофей Є.М., Голубов С.І., Орленко Т.А. (2023) Про можливості визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі. *Геологічний журнал*. 4 (385), 61–78. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929> (Особистий внесок: розрахунок вегетаційних індексів для ділянки дослідження за супутниковими даними, з використанням хмарного сервісу Google Earth Engine).
5. Лубський М. С., Орленко Т. А., Пестова І. О., Андреев А. А., Лисенко А. Р. (2023) Оцінка індикаторів опустелювання регіону Олешківські піски за довготривалими часовими рядами даних супутникового знімання Landsat. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10(1), 17– 28. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.1.229> (Особистий внесок: відбір індикаторів

вологи земного покриву, опис доцільності застосування даних дистанційного зондування Землі, розрахунків вегетаційних та водних індексів, побудова картографічного матеріалу, статистична обробка даних).

Апробація матеріалів дисертації:

6. Kril, T. and Orlenko, T. (2022) Surface Dynamics Assessment as a landslide hazard factor by Remote Sensing Data. Conference Proceedings *16th International Conference Monitoring of Geological*, Nov 2022, Volume 2022, 1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580246> (Особистий внесок: оцифрування картографічних матеріалів геологічного стану території, дешифрування та картування ділянок зсувів ґрунтових товщ, побудова карто-схеми вертикальних зміщень)

7. Orlenko, T., Tomchenko, O., Lischenko, L., Sedlerova, O. (2023) Landslide Hazard Assessment Using Radar Data in the Staiky, Rzhyschiv Urban Hromada Ukraine. Conference Proceedings *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, Sep 2023, Volume 2023, 1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500027> (Особистий внесок: оброблення та аналіз отриманих результатів даних дистанційного зондування, у тому числі радарної інтерферометричної зйомки, розрахунків та створення карто-схеми зсувів)

8. Piestova, I., Dugin, S., Orlenko, T. and Svideniuk, M. (2020) Assessing and forecasting landslide hazards of the Right Bank of the Kanev reservoir based on radar remote sensing data with corner reflectors using. Conference Proceedings, *XIV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*, Nov 2020, Volume 2020, 1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056082> (Особистий внесок: інтерпретація результатів польових досліджень, опис геологічного стану досліджуваної ділянки, написання висновків)

9. Lubskyi, M., Orlenko, T., Piestova, I., Lysenko, A., Andreiev, A. et al. (2022) Using Landsat satellite time series for desertification processes mapping: Case study for Oleshky sands, Ukraine. Conference Proceedings *16th International Conference*

Monitoring of Geological, Nov 2022, Volume 2022, 1 – 5.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580194> (Особистий внесок: відбір індикаторів вологи земного покриву, розрахунок вегетаційних та водних індексів, побудова картографічного матеріалу)

10. Yelistratova, L., Apostolov, A., Romanciuc, I., Orlenko, T., Tymchyshyn, M. et al. (2021) Application of remote sensing data for detection the landslide areas in Ukraine, Conference Proceedings *Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*, Sep 2021, Volume 2021, p.1 – 5.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215k1017> (Особистий внесок – обробка супутникових даних, застосування методики радарної інтерферометрії)

Праці, що додатково розкривають зміст дисертаційної роботи:

11. Khodorovskyi, A.Y., Apostolov, A.A., Yelistratova, L.A., Orlenko, T.A. (2023) Study on Irrigated and Nonirrigated Lands in Ukraine Under Climate Change Based on Remote Sensing Data. In: Pande, C.B., Moharir, K.N., Singh, S.K., Pham, Q.B., Elbeltagi, A. (eds) *Climate Change Impacts on Natural Resources, Ecosystems and Agricultural Systems*. Springer Climate. Springer, Cham, 391–411.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-19059-9_15 (Особистий внесок: обробка супутникових даних, застосування методики радарної інтерферометрії, побудова картографічного матеріалу).

12. Alexander Apostolov, Lesya Yelistratova, Artur Hodorovsky, Tetiana Orlenko, Maksym Tymchyshyn (2023) Geo-ecological consequences of the closure of coal mines of Donbas (based on radio-location satellite surveying materials), *SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Conference Proceedings*. 23(2.1), 1-8. <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s10.37> (Особистий внесок: розрахунок радарної інтерферометрії за даними супутника Sentinel-1, формування результуючої карти зміщень земної поверхні).

13. Khodorovskyi, A. Y., Apostolov, A. A., Yelistratova, L. A., Orlenko, T. A. (2023) Satellite-based technology assessing Ukraine's ecology under the War. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1), 012115, 1-10.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012115> (Особистий внесок: побудова картографічного матеріалу).

14. Орленко Т.А., Гусєва А.В. (2019) Лінеаментний аналіз території в межах функціонування гірничовидобувного підприємства з використанням даних ДЗЗ. *Ідеї та інновації в системі наук про Землю. Матеріали VIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції*, Київ, 10-12 квітня 2019 р., 56-57. Retrieved from: http://gc.igs-nas.org.ua/wp-content/uploads/2019/04/ZB_2019.pdf (Особистий внесок: автор ідеї, застосування методики лінеаментного аналізу, побудова картографічного матеріалу, тематична інтерпретація отриманих результатів).

15. Orlenko T.A. (2020) Landslide detection and mapping by geological and remote sensing data. *Сучасні проблеми гірничої геології та геоecології: Міжнародна наукова конференція*, Київ, 2020, 71-72. Retrieved from: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=108011581181107&set=pcb.108011374514461>

16. Орленко Т.А. (2020) Дослідження зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища. *XXII Міжнародна наукова конференція Астрономічна школа молодих вчених*, Україна, Київ. 1, 50-51. Retrieved from: <http://astro.nau.edu.ua/uk/school/2020.html>

17. Орленко Т.А. (2021) Супутниковий моніторинг зсувної активності Правобережжя Канівського водосховища. *Екологічна безпека держави: XV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів*, 1, 85-86. Retrieved from: <https://febit.nau.edu.ua/kafedry/kafedra-ekolohii/vseukrainska-naukovo-praktychna-konferentsiia-molodykh-uchenikh-i-studentiv-ekolohichna-bezpeka-derzhavy/>

18. Orlenko T.A. (2022) Використання супутникової радіолокаційної інтерферометрії для оцінки небезпеки зсувної активності. *Ідеї та новації в системі наук про Землю: Збірник матеріалів IX Всеукраїнської молодіжної наукової конференції*, Київ, 50-51. Retrieved from: <http://gc.igs-nas.org.ua>