

МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРАВОБЕРЕЖЖЯ КАНІВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Іванік)

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 відображено активні зсувні ділянки. Стисло описано метод DinSAR з акцентом на етапах фільтрації даних для картографування активізації зсувів. Зафіксовано високу кореляцію даних і підтверджено наявність зон активних зміщень на березі 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 унаслідок часової декореляції радіолокаційного сигналу в районах з великою кількістю рослинності. Через значну декореляцію отриманих результатів заліснених та обводнених ділянок об'єднано методику DinSAR, цифрову модель рельєфу (DEM), аналіз карт базисних поверхонь та результати обчислень спектральних індексів для виявлення ділянок активних зсувів, спричинених перезволоженням породних комплексів дніпровських схилів. Проведені дослідження демонструють доцільність використання DinSAR для виявлення та моніторингу деформації поверхні.

Ключові слова: небезпечні геологічні процеси, зсуви, моніторинг, радарна інтерферометрія, ГІС.

Вступ

Проблема дослідження зсувів актуалізується в умовах інтенсивного антропогенного впливу та кліматичних змін. Зсуви виникають унаслідок втрати рівноваги ґрунтів та підстильних порід, чим більша крутизна корінного схилу, тим швидше рухається тіло зсуву. Геологічні методи дослідження зсувів передбачають створення геодезичної основи на зсувонебезпечних ділянках і періодичні безпосередні вимірювання. Серед досліджуваних показників: координати зсувів, висоти геодезичних знаків, встановлення меж та об'ємів зсувних мас, визначення величин сповзання земляної маси в плані та по висоті (Кравець, 2020), швидкість та напрямок зсувів.

Спостереження за зсувами геологічними методами є трудомістким і небезпечним. Дистанційний моніторинг зсувних процесів забезпечує раннє виявлення потенційно небезпечних зсувних ділянок. Моніторинг стану схилів, з використанням радіолокаційних космічних даних та інтерферометричних методів їх обробки, допомагає визначити їхню динаміку та ідентифікувати ризики, пов'язані з можливими зсувами.

Синтетично-апертурна радіолокація (SAR) відіграє ключову роль в оперативному моніторингу зсувів завдяки можливостям дистанційного спостереження – незалежно від наявності хмар, широкого поля огляду та здатності сканування поверхні цілодобово. Зокрема, диференціальна радарна інтерферометрія (DinSAR) широко використовується для раннього виявлення, моніторингу та оцінки ризиків, пов'язаних зі зсувами.

Методика радарної інтерферометрії з диференціальною синтетичною апертурою (DinSAR) є технологією мікрохвильового дистанційного зондування, яка дає змогу досліджувати явища деформації поверхні з високою точністю, від сантиметра до міліметра (Stankevich et al., 2020), та зі значним просторовим охопленням. Зокрема, в нашому дослідженні використано різницю фаз, тобто сформовано інтерферограму як різницю між двома SAR-зображеннями, що мають відношення до часово розділених спостережень досліджуваної області та забезпечують вимірювання проекції деформації ґрунту в напрямку лінії прямої видимості радара (LOS, line of sight).

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) є основним джерелом даних для представлення земної поверхні, яке включає висотні дані (Бурштинська та ін., 2007) для різних точок земної поверхні. У дослідженні модель рельєфу, тобто DEM, отримано за даними супутника Sentinel-1. Для створення моделі рельєфу висоти точок земної поверхні (гори, долини, водні поверхні та ін.) підлягають інтерполяції та обробці для видалення помилок і надання моделі більшої точності. На основі оброблених даних формується DEM, де для кожної точки вказується її висота відносно еталонного рівня (середній рівень моря). Використання DEM дозволяє ідентифікувати ділянки зі значними висотними змінами та нахилами, порівняння DEM, отриманих в різночасові періоди, дає змогу виявляти зміни в рельєфі, пов'язані зі зсувами.

У процесі дослідження правобережжя Канівського водосховища використано *структурно-морфометричні методи* для аналізу тектогенезу та морфогенезу. Зазвичай долини водотоків успадковують активні розломні порушення, напрямок рухів яких збігається з векторами градієнтів геопотенціалів. Дослідження долинної мережі проводили (Іванік та ін., 2020; Tustanovska et al., 2020).

Геоморфологічний зміст карт базисних поверхонь полягає в тому, що вони відображають форму і нахил поздовжніх річкових долин, по яких ці поверхні побудовані, поздовжній профіль річки є чутливим індикатором геоекологічних змін (Пересацько, 2008).

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* використовуються як додаткові дані для підтвердження результатів, отриманих іншими методами дослідження небезпечних ерозійних геологічних процесів.

Метою даного дослідження є супутниковий гео-моніторинг зсувонебезпечних схилів за даними диференціальної радарної інтерферометрії та ідентифікація нових або активізованих, раніше стабілізованих зсувів.

У геоструктурному відношенні територія досліджуваної ділянки Витачів–Стайки, Середнього Придніпров'я розташована в зоні зчленування північно-східного схилу Українського щита з Дніпровсько–Донецькою западиною (Snitynskyi et al., 2020). Особливістю рельєфу досліджуваної території є суттєвий перепад висот, коливання базису ерозії та кутів нахилу схилів. Багато вчених приділяють значну увагу класифікації типів зсувів (Байрак, 2018; Пазинич, 2017) та розумінню механізму їх утворення та активізації.

У роботах (Ліщенко та ін., 2017) закладено основи супутникового моніторингу зсувонебезпечних територій на базі ГІС-технологій. Важливим аспектом досліджень є вивчення конкретних регіонів, де зсуви найактивніші. Для регіону Середнього Придніпров'я у дослідженнях (Демчишин, 2004) надано розгорнуту інформацію про розвиток, причини, класифікацію зсувів та розроблено стратегії мінімізації ризику для місцевого населення.

Більшість проведених досліджень має регіональний характер. Головною метою цих досліджень є аналіз геологічних і геоморфологічних явищ дрібного масштабу та створення карт, що відображають поширення екзогенних геологічних процесів.

Проведення детальних і спеціалізованих досліджень для вивчення небезпечних зсувів на конкретних ділянках вказує на необхідність і доцільність здійснення комплексного аналізу факторів, що впливають на їхнє формування. Це значно підвищує об'єктивність як загальної оцінки цих процесів, так і можливість прогнозування їхнього розвитку.

За попередніми дослідженнями (Беспалова, 2001) виділяється два типи зсувів на правобережжі Канівського водосховища:

- I тип зсувів – геологічний розріз включає лесоподібні суглинки четвертинного віку, неогеново-нижньочетвертинні бурі й червоно-бурі глини, строкаті глини неогену, піски новопетровської світи неогену, берекської та межигірської світи, мулові ґрунти обухівської світи та глини. Для цього типу зсувів характерно підвищене гіпсометричне положення мергельних шарів. Процес зсуву розгортався у декілька видів структурних зсувів, зокрема циркоподібних. Верхня частина схилу має форми видавлювання, які переходять у пластичні зсуви.

- II тип зсувів – геологічна основа включає відклади бурих і строкатих глин, пісків неоген-палеогенового віку. Товщина лесового горизонту менша ніж 10,5 м у нижній частині схилу, нижче залягають глинисті алевроїти обухівської світи. У даному випадку формуються фронтальні зсуви з площиною зсуву. Зазначені типи зсувів відрізняються спільними геологічними особливостями та характером розвитку зсувних процесів.

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. Протягом останніх десяти років не повідомлялося про значні за обсягом зсувні процеси.

У нашому дослідженні для завірки сталого рівня земної поверхні було 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. Завіркові поля розташовані 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 використання.

Реперні поля, зарослі різноманітними дикорослими рослинами, переважно злаково-різнотравними асоціаціями, являють собою рудеральні ценози, ці землі не оброблювали десятиків років. Коливання гіпсометричного рівня поверхні в межах даних ділянок не перевищує 0,3 см за рік. Досліджувана територія розчленована потужною яружно-балковою мережею, більша частина дніпровських схилів ускладнена зсувними формами та ерозійно-денудаційними явищами і має дуже хвилясту верхню бровку. Основну кількість зсувів зареєстровано в межах трьох-, п'ятикілометрової смуги корінного берегу, розчленованого порівняно густою та глибокою яружною сіткою.

Для визначення вертикальних зміщень у нашому дослідженні було обрано дев'ять тестових точок. У межах усіх точок 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, є загальним для всіх точок, що сприяє активізації небезпечних геологічних процесів; для всіх зсувів характерна наявність глинистих, суглинкових та делювіальних ґрунтів, схильних до зсувів; частина ділянок природно стабілізована завдяки наявності рослинного покриву; зсувні процеси підсилюються внаслідок антропогенного впливу, наприклад видобутком глини у кар'єрах.

Опис тестових, зсувних ділянок. Розвиток екзогенних геологічних процесів характерний уздовж правобережжя Канівського водосховища. Тестовий полігон належить 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 (рис. 1), на які вплинули активні деформації поверхні та п'ять контрольних ділянок, які не зазнають зсувних процесів (завіркові поля).

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

Точка 2 (рис. 1б): це активна зсувна ділянка зі свіжою стінкою відриву у середній частині схилу, відслонення якої зафіксовано у нижньому плейстоценовому шарі та пісках міоцену. Стінка відриву до 7 м, ширина зсувної ділянки до 20 м. Тіло зсуву у вигляді делювіально-колювіального потоку;

Точка 3 (рис. 1в): характеризується невеликою зсувною ділянкою у вигляді потоку. Верхня частина зсувної ділянки ще зберігає стінку відриву, але делювіальні відклади вже поросли кущами та деревами віком до 5 років, що є причиною природної стабілізації ділянки;

Точка 4 (рис. 1г): невеликий зсув у гребеневій частині схилу (1-го 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;

Точка 5 (рис. 1д): особливістю цієї точки є велике відслонення 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 півніжній 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). У нижній частині розташовані колювально-делювіальні рихлі породи – делювіального шлейфу, сильно насичені водою;

Точка 6 (рис. 1е): має сильно розчленований схил у результаті підрізання кар'єром, характеризується перемикуванням гребенеподібних та яружних форм рельєфу. Відклади нижньої частини схилу є більш стійкою частиною зсуву – плейстоценовими строкатими глинами. Нижній рівень займають осипні міоценові піски, під ними розташовані пластичні вологі глини верхнього палеогену. Ділянка має вигляд "бедленду" із загостреними гребнями. У нижній частині акумулюються пролювіально-делювіальні пухкі відклади, що зазнають сильної ерозії та опливання;

Точка 7 (рис. 1е): активний зсув, нижня частина зсувного тіла перекрита колювально-делювіальним матеріалом, що постійно рухається, за рахунок обвалювання, ерозії та зсування;

Точка 8 (рис. 1ж): верхня частина схилу досліджуваної ділянки представлена фронтальним зсувом 1-го порядку, лесоподібний 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;

Точка 9 (рис. 1з): стінка відриву зсуву на ділянці під номером дев'ять сформована гребенеподібними стовпчастими останцевими формами лесоподібних суглинків у верхній частині схилу, що сильно вивітрюється та руйнується під дією ерозії.

Польові роботи на описаних вище ділянках проводилися у квітні 2023 р. Під час польових робіт отримано дані про стан рослинності досліджуваного регіону, літологію відкладів, крутизну схилів та зсувну активність. Графік польових робіт був узгоджений з датами прольоту супутника Sentinel-1A.

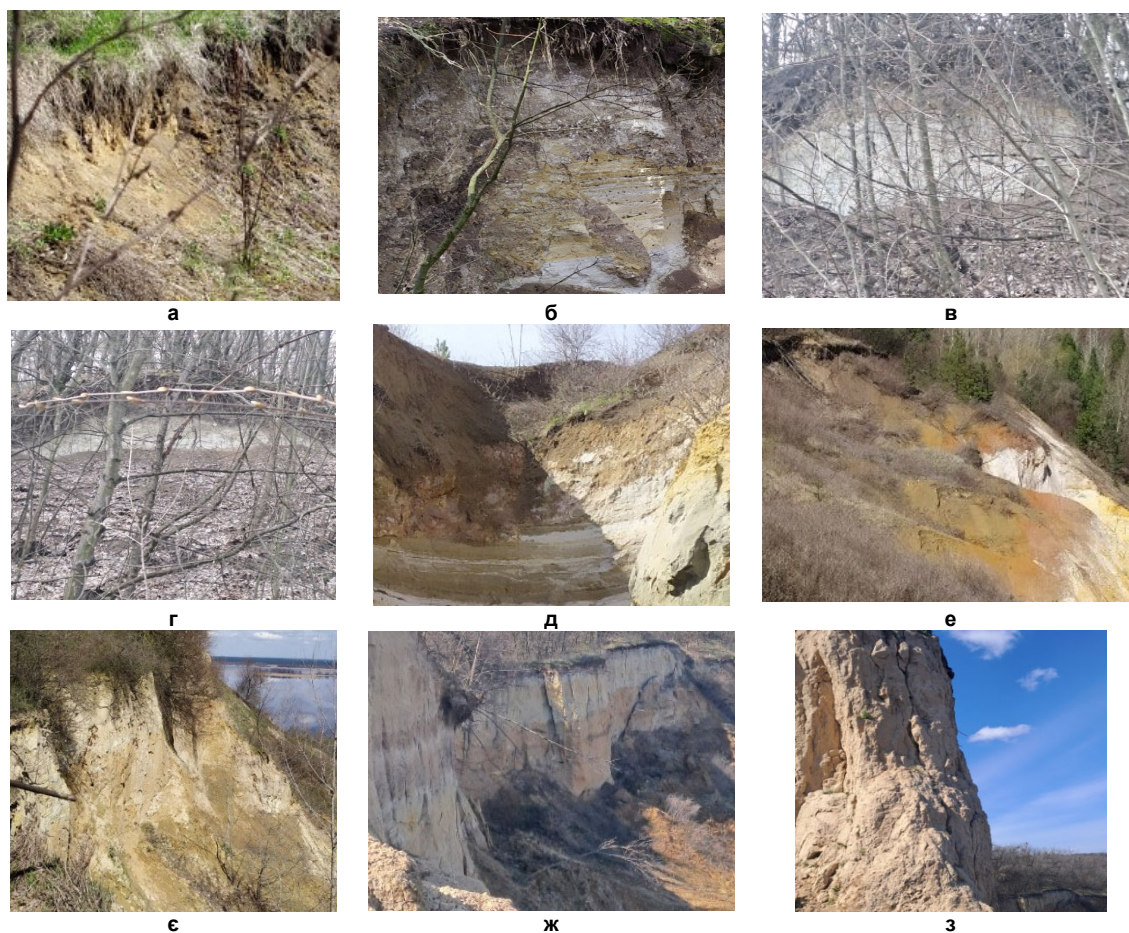


Рис. 1. Зсуви у межах північної частини ділянки Витачів–Стайки

Аналіз вертикальних зміщень земної поверхні в межах полігону Витачів–Стайки. Для правобережжя Канівського водосховища характерна густа рослинність, унаслідок чого відбитий сигнал повністю змінюється за короткий проміжок часу. Тому періодом дослідження було обрано весняні місяці березень–квітень, для яких характерний низький рівень густоти рослинності та підвищена кількість опадів. На зворотний сигнал

розсіювання, отриманий супутником Sentinel-1, та якість сформованої інтерферограми впливають вид розчленування рельєфу, його ступінь, тип рослинності, ступінь зволоження поверхні, характер мінеральних та органічних пухких відкладів (Krill, Shekhunova, 2019).

Вхідними даними, що використані в дослідженні, є пара радарних зображень та відповідні навігаційні дані. Для формування коректної інтерферограми здійснено

підбір пари радіолокаційних зображень супутника Sentinel-1. Головними параметрами вибору є коротка часова базова лінія – час між першим і другим зображенням становить 12 днів, другим ключовим параметром є відповідність перпендикулярної базової лінії – відстань між положенням супутника на момент отримання зображення має становити від 300 до 500 м. Орбіта прольоту супутника є низхідною за весь період дослідження. Дотримання цих вимог забезпечило отримання правильного кута нахилу між обома знімками та дозволило отримати топографічні варіації ефектів. Обробка радарних даних супутника Sentinel-1 проводиться в програмному середовищі з відкритим доступом SNAP (step.esa.int/main/snap).

Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні здійснено за такою послідовністю.

Підбір радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1, з урахуванням параметрів орбіти, напрямку знімання супутника, часових характеристик та значення базових ліній; корекція знімків відповідно до орбітальних параметрів, а також вилучення для подальшого дослідження смуг радарного знімку, що містять область дослідження; застосування модуля спільної кореєстрації зображень та створення їх стеку з підвищенням спектральної яскравості даних та, як результат першого етапу, формування вихідної інтерферограми. Наступним кроком є видалення топографічної фази, усереднення отриманих

інтерферометричних значень з використанням модуля Multilooking. Фільтрація отриманих даних за методом Goldstein забезпечує нівелювання шуму на зображенні. Розгортка інтерферометричної фази була проведена із застосуванням модуля Snapu у програмному середовищі SNAP. Наступний крок це трансформація отриманих значень фази (в радіанах) у фізичні величини (метри). Коректне значення результатів розгорнутої фази досягається із застосуванням опції маскуванню областей низької когерентності. Коефіцієнт 0,3 є мінімальним для застосування фільтрації, оскільки відповідає рослинним і водним об'єктам у межах досліджуваної ділянки. Оскільки тестова ділянка це берег водосховища, поріг фільтрації підвищено до значень 0,4 та 0,5 (Орленко, 2023). Також необхідним є вирівнювання отриманих результатів та вибір точок, зміщення яких дорівнює нулю. Це поля, що не обробляються з 2013 р. та мають сталий рівень рослинності під час весняного періоду. Проведено повторну корекцію результатів вже з урахуванням значень на цих ділянках. Фінальним кроком створення картосхеми вертикальних зміщень земної поверхні (рис. 2) є геометрична корекція отриманого результату та визначення величини зміщень кожної досліджуваної точки.

Отримана картосхема зміщень на рис. 3 відображає зміну відстані вздовж прямої видимості від датчика до земної поверхні в кожній з обраних тестових точок.

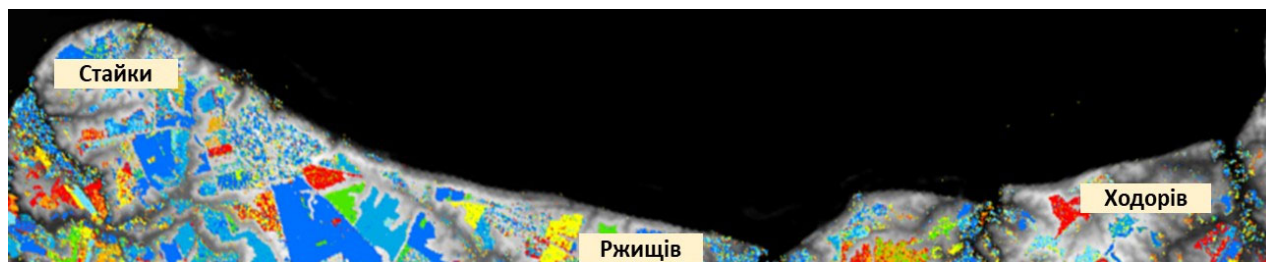


Рис. 2. Картосхема поширення вертикальних зміщень земної поверхні на ділянці Витаців-Ходорів

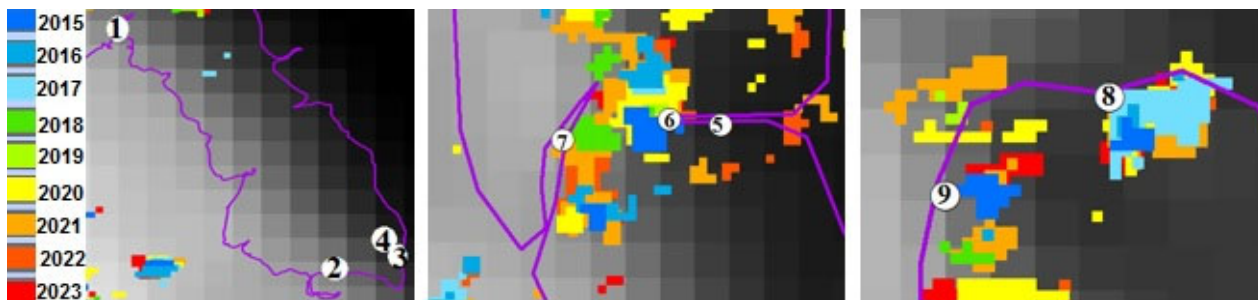


Рис. 3. Активні вертикальні зміщення в дослідних точках з 2015 по 2023 роки, фіолетова лінія – фрагменти дослідницького маршруту

Згідно з отриманими даними за період з 2015 по 2023 роки точки 1–5 є неактивними, це стабілізовані зсувні ділянки зі значною кількістю рослинності. Точки під номером 6–9 є активними протягом усього періоду розрахунків.

За графіками вертикальних зміщень точок 2 та 9, (рис. 4) можна зробити висновок про цілковиту стабілізацію точки під номером 2 та активність точки 9 впродовж усього періоду спостережень. Найбільше зміщення для зсувної ділянки номер 9 зафіксовано у 2017 р., значення якого досягло 10 см. Позитивні значення зміщення (рис. 4) 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.

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. Отримані числові значення зміщень демонструють, наскільки зрушилася земна поверхня порівняно із завірковими ділянками. У даному дослідженні зміщення вимірюються в сантиметрах, чим більші значення, тим більш значним є рух ґрунтового покриву.

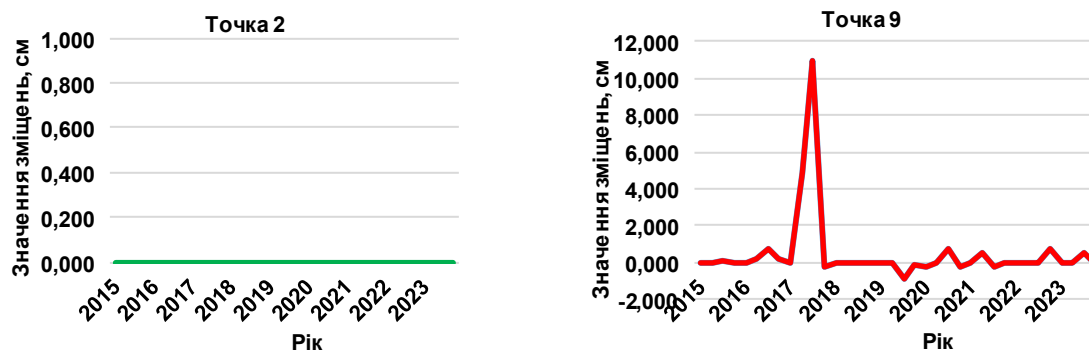


Рис. 4. Графік вертикальних зміщень точок 2 та 9

Застосування DEM для аналізу зсувів. Для створення цифрової моделі рельєфу за даними Sentinel-1 (Liu, 2008; Pham, 2001; Renard, 1997), було обрано пари радіолокаційних зображень за 12 та 24 жовтня 2017 р. і 29 вересня та 11 жовтня 2021 р. Дані про абсолютну висоту поверхні, джерелом яких є сервіс Alaska Satellite Facility – Distributed Active Archive Center (<https://asf.alaska.edu/how-to/data-tools/data-tools/>) порівнювалися з даними, цифрової моделі рельєфу (ЦМР), який був побудований на основі топокарт з геодезичною прив'язкою до опорних точок для території правобережжя Канівського водосховища. Крок основних горизонталей ЦМР становив 5 м. Створення DEM включає видалення шумів, корекцію систематичних похибок, видалення дерев, будівель та інших об'єктів, які не пов'язані з поверхнею землі. Для отримання повної DEM дані інтерпольовано між точками вимірювань та створено гладку поверхню. Одержана DEM використовувалася для аналізу рельєфу та виявлення ознак зсувів (рис. 5), включно з виявленням нахилів та аномалій рельєфу, які свідчать про можливі зсуви.

Виявлено, що абсолютні усереднені відмітки поверхні отримані внаслідок побудови DEM розбігаються з абсолютними відмітками поверхні, порівняно 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 збігаються. Аналіз даних отриманих із Sentinel-1 та виконаних розрахунків і перетворень показав, що невисоке просторове розрізнення даної зйомки не дало можливість достовірно встановити місця активізованих ділянок схилів і 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 їхнє горизонтальне розчленування слабо проявляється. Тому потрібно застосовувати не тільки DEM для оцінки розвитку зсувних процесів, але й залучати методику побудови карт активізації вертикальних зміщень за даними Sentinel-1 і карт базисних поверхонь за даними SRTM.

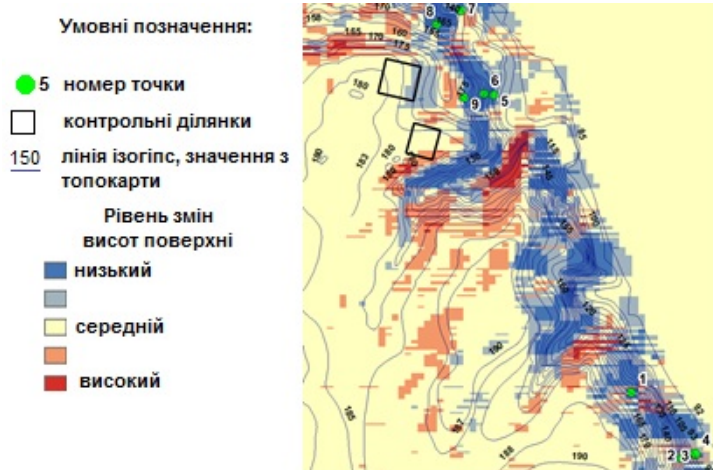


Рис. 5. Картохема різниці DEM за 2017 та 2021 роки

Геоморфологічні дослідження. Для аналізу тектоногенезу і морфогенезу використано структурно-морфометричні методи, що дає змогу побудувати карту ураженості території зсувними процесами та густоти ерозійного розчленування території. Територія Канівського водосховища має значну протяжність і значну кількість рослинності у вегетаційний період. Побудова картосхем базисних поверхонь для досліджуваного регіону виконувалася на основі карт порядків долин третього та четвертого порядку водотоків у програмному середовищі ArcGIS, які відповідають саме за формування берегів Канівського

водосховища. 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.

Для побудови карти порядків долин і вододілів було використано топографічну основу дрібного, середнього і великого масштабів та космоснімки з якісним та верифікованим зображенням рельєфу території. Як джерело супутникових даних про рельєф території навколо Канівського водосховища, було використано топографічні

дані високої розрізненості, отримані за допомогою програми NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) у 2000 р. (Farr et al., 2007). У межах досліджуваного регіону було використано топографічні карти регіону досліджень масштабу 1 : 25000. Карти в растровому форматі завантажувалися в середовище ArcGis-Online зі створенням геопросторової прив'язки із застосуванням програмного модуля Georeferencing. Для коректного відображення даних автор застосовував географічну координатну систему World Geodetic System 1984 Zone 36-N.

Для побудови карт порядків водотоків використано набір інструментів пакета "Hydrology", який міститься 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 елементу 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 проєкту залежить від розмірів досліджуваного полігону, який становить 123 м x 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 "Tpo to Raster", спеціально розроблений для створення гідрологічно правильних цифрових моделей рельєфу. За даними довжин водотоків побудовано картосхему базисних поверхонь (рис. 6) та визначено на ній водотоки 3-го та 4-го порядків довжин водотоків з координатами їх витоків.

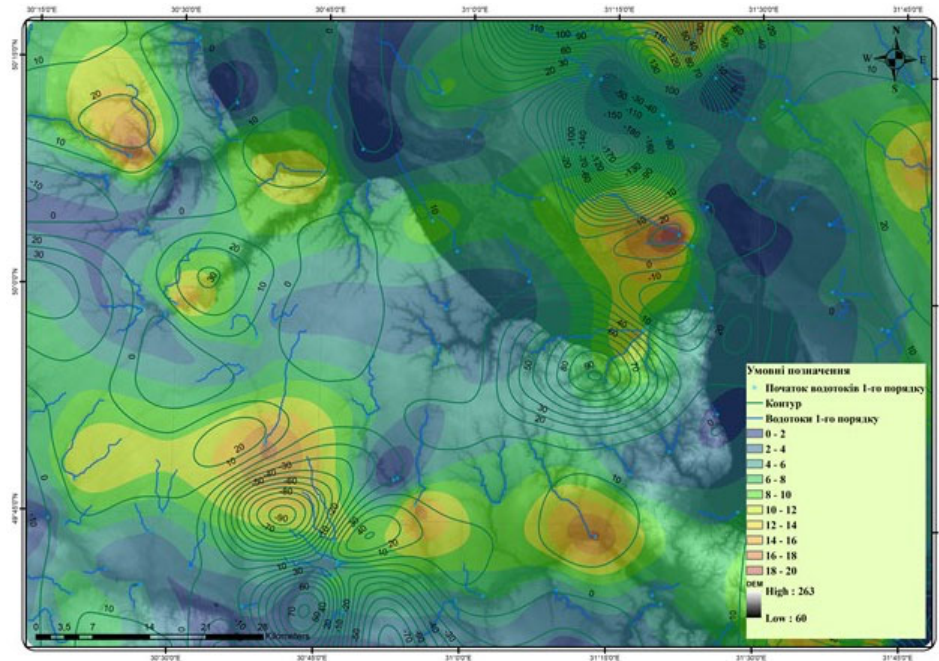


Рис. 6. Картосхема базисних поверхонь Правобережжя Канівського водосховища

Згідно з результируючою картою базисних поверхонь водотоків 3-го порядку найбільш геодинамічно активні зони характерні для м. Українка, м. Канів та Трахтемирівського півострова.

Дослідний полігон Витачів–Стайки має середній рівень геодинамічної активності, що також визначає певний вплив на інтенсифікацію зсувних процесів.

Особливо несприятливими ділянками є місця перетину геодинамічних зон різного напрямку, а саме, зон глибинних розломів, активних на сучасному геологічному етапі розвитку та зон розущільнення гірських порід, які не проявляються у чітко виражених глибинних розломах. Висока проникність гірських порід є одним із чинників підйому ґрунтових вод, що веде до підтоплення територій, порушення фундаментів будівель, підземних комунікацій та інших об'єктів, і як наслідок – підвищується ризик зсувних процесів.

Розрахунок спектрального індексу NDVI. Індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) є важливим інструментом для визначення динаміки зсувних процесів. 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. Для розрахунків спектральних індексів було використано знімки супутника Landsat-8 з 2015 по 2023 роки, за період березень–квітень, згідно з проведеними інтерферометричними дослідженнями, з просторовою розрізненістю 30 м. Використано було тільки знімки Landsat, оскільки запуск Sentinel-2, з вищим рівнем просторової розрізненості, відбувся лише у 2016 р. та перші знімки досліджуваного регіону датовані весною 2017 р. Саме тому для коректного порівняння результатів було

розраховано індекси за даними супутника Landsat (Лубський та ін. 2023).

Значення індексу NDVI (рис. 7) коливається від $-0,15$ до $0,96$. 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 дослідної ділянки Витачів–Стайки, зокрема в точках 5–9, які пов'язані з кар'єром з видобутку глини.

Прогнозування розвитку зсувних процесів у межах правобережжя Канівського водосховища. Для ідентифікації зон підвищеної зсувної небезпеки було проаналі-

зовано дані, включаючи дані ЦМР (цифрова модель рельєфу), DEM (цифрова модель рельєфу, отримана за даними Sentinel-1) в поєднанні з геодинамічною активністю, показниками вертикальних зміщень земної поверхні та станом рослинного покриву на досліджуваній території. На основі цього комплексного аналізу було зроблено висновок щодо поширення та стабілізації зсувних процесів.

Картосхему поширення активних зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища наведено на рис. 8 за візуальним аналізом отриманих даних у середовищі QGIS, у результаті злиття теоретичних, практичних і розрахункових даних. Крім того, внаслідок зіставлення картосхеми вертикальних зміщень земної поверхні, DEM (де зафіксовані зміни абсолютних висот), картосхеми базисних поверхонь 3-го порядку водотоків та розподілу індексу NDVI, було детально виділено ділянки поширення активних зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища.

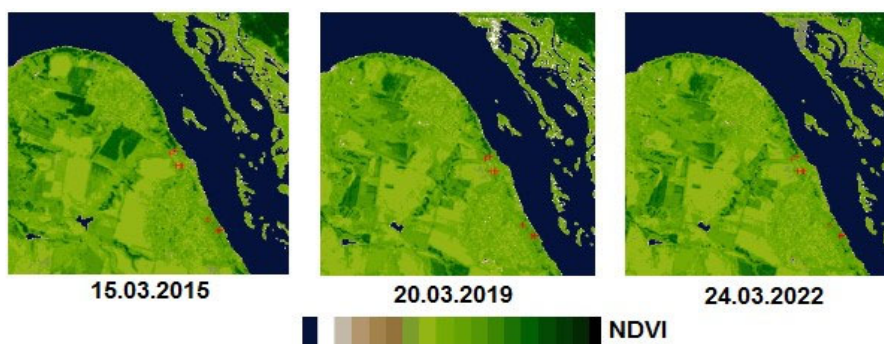


Рис. 7. Просторовий розподіл значення NDVI в межах дослідного полігону

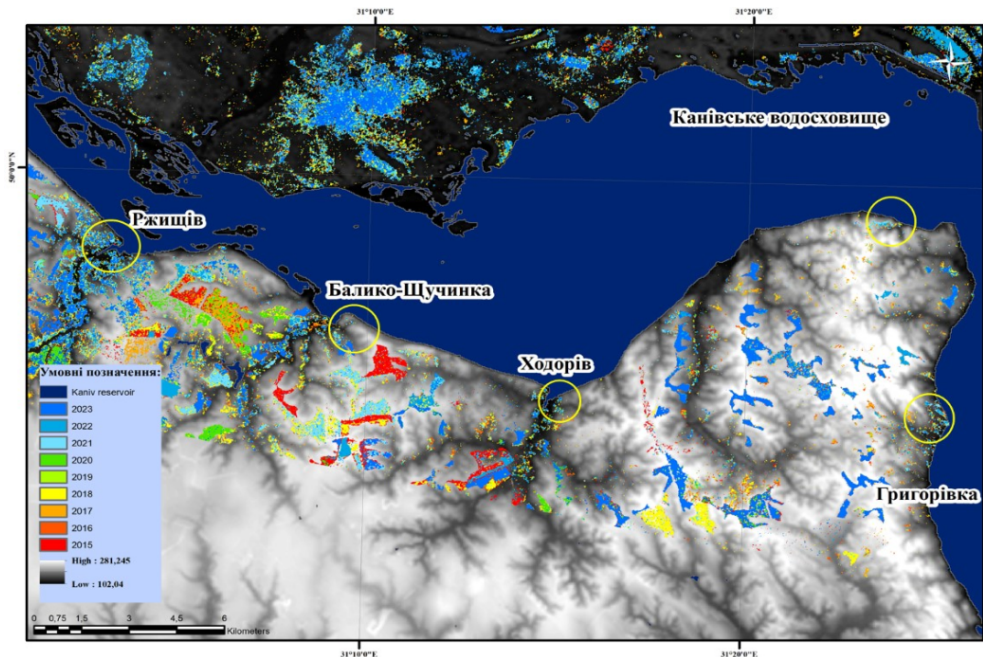


Рис. 8. Картосхема поширення активних зсувних процесів правобережжя Канівського водосховища

Отже, досліджено динаміку активізації зсувів правобережжя Канівського водосховища. Активними потенційними ділянками зсувів є околиці міста Ржищів (рис. 9а), околиці селища Балико-Шучинка (рис. 9б), околиці села Ходорів (рис. 9в), фрагмент на півострові Трахтемирів

(рис. 9г), околиці села Григорівка (рис. 9д). У більшості випадків активний зсув, той що відбувся нещодавно або процес відбувається й надалі, проявляється на результатному зображенні внаслідок процесів відслонення геологічних порід і сповзання значних мас ґрунту.

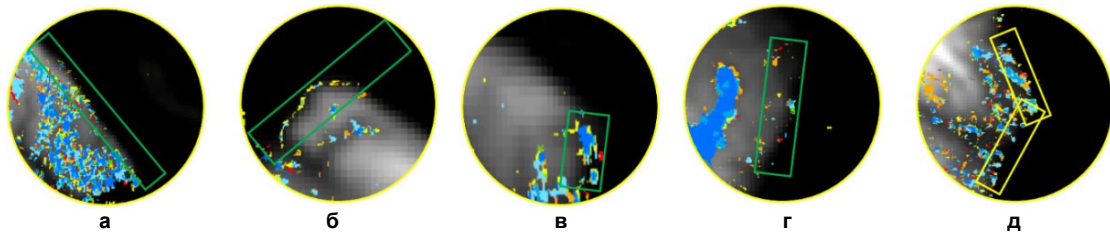


Рис. 9. Збільшений масштаб ділянок з підвищеним ступенем ризику зсувів:
а – околиці міста Ржищів, б – околиці селища Балико-Щучинка, в – околиці села Ходорів,
г – фрагмент на півострові Трахтемирів, д – околиці села Григорівка

Висновки

Отже, комплексне застосування геологічних, геоморфологічних, даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій надало можливість виявити ділянки активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів. Побудовано карту вертикальних зміщень земної поверхні для весняного періоду з 2015 по 2023 роки. Швидкість деформації на дослідних ділянках лежить у діапазоні від 1 до 15 см на рік, водночас повільний рух характерний саме для схилів. Аналіз DEM отриманої за даними Sentinel-1 показав, що невисоке (10 м) просторове розрізнення даної зйомки не дало змогу достовірно встановити місця активізованих ділянок схилів і нестабільних ділянок через незначні і регулярні амплітуди коливань, які присутні як на зсувних, так і на стабільних поверхнях. Встановлено регулярну відмінність у показаннях на схилах різних експозицій. Найбільших коливань в аналізованих значеннях зазнають схили, але їх горизонтальне розчленування слабо проявляється. Тому необхідним є застосування не тільки DEM для оцінки розвитку зсувних процесів, але й залучення методики побудови карт активізації вертикальних зміщень за даними Sentinel-1. Згідно з результуючою картою базисних поверхонь водотоків 3-го порядку найбільш геодинамічно активні зони характерні для м. Українка, м. Канів та Трахтемирівського півострова. Дослідний полігон Витачів–Стайки розташований у межах геодинамічної аномалії, що може бути одним із факторів розвитку зсувних процесів і має певний вплив на їхню інтенсифікацію. Проаналізовано динаміку збільшення та зменшення кількості рослинного покриву в межах зсувних ділянок, зафіксовано її зменшення в місцях активних зсувів та незначні коливання для стабільних точок зсувів. Рослинність на правобережжі Канівського водосховища виступає стабілізуючим фактором схилів. Збіг усіх чотирьох досліджуваних показників на тестовій ділянці означає високий рівень геологічної небезпеки, якщо показники збігаються, при цьому маючи близько до нуля значення, ділянка неактивна – ризик низький. Якщо значення одного або двох показників відмінні від нуля, це означає середній рівень небезпеки. За градацією ризиків досліджуваної території створено прогнозну карту потенційно-небезпечних зсувних ділянок правобережжя Канівського водосховища, на яких збігаються дані розрахованих параметрів, серед них околиці м. Ржищів, м. Ходорів, с. Григорівка, с. Балико-Щучинка та півострів Трахтемирів.

Список використаних джерел

- Байрак, Г. (2018). *Методи геоморфологічних досліджень*. ЛНУ імені Івана Франка.
- 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.
- Бурштинська, Х., Василюха, І., Коваль, П. (2007). Технологія побудови цифрової моделі рельєфу для створення плану дна ріки. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 69, 135–144.

Демчишин, М. Г. (2004). *Техногенні впливи на геологічне середовище території України*. Гнозис.

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

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.

Кравець, О. Я. (2020). Використання геоінформаційних технологій для дослідження зсувних процесів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 30(2), 113–117. <https://doi.org/10.36930/40300220>.

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. doi:10.36023/ujsr.2017.15.11.

Лубський, М., Орленко, Т., Пестова, І., Андреев, А., Лисенко, А. (2023). Оцінка індикаторів опустелювання регіону Олешківські піски за довготривалими часовими рядами даних супутникового знімання Landsat. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10(1), 17–28. doi:10.36023/ujsr.2023.10.1.229.

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. doi:10.36023/ujsr.2017.13.104.

Пересадко, В. А., Лобанова, Ю. Ю. (2008). *Методичні вказівки з побудови карт різнопорядкових долин, базисних поверхонь та залишкового рельєфу для студентів геолого-географічного та екологічного факультетів*. ХНУ імені В. Н. Каразіна.

Орленко, Т. А. (2023). Методика дистанційного моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні за даними радарної інтерферометрії. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10 (3), 16–20. doi:10.36023/ujsr.2023.10.3.247.

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

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*. doi:10.3997/2214-4609.201903176.

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:10.1007/s12524-023-01738-5.

Sentinel Application Platform (SNAP). (н.д.). <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.

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*, 1, 9–15. doi:10.23939/tbtp2020.01.009.

Stankevich, S., Piestova, I., Kozlova, A., Titarenko, O., & Singh, S. K. (2020). Satellite radar interferometry processing and elevation change analysis for Geoenvironmental Hazard Assessment. *Techniques for Disaster Risk Management and Mitigation*, 125–139. doi:10.1002/9781119359203.ch10.

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. *International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020*. doi:10.3997/2214-4609.2020geo048.

References

- Bayrak, H. (2018). *Methods of geomorphological research*. Ivan Franko National University [in Ukrainian].
- Bespalova, O. M. (2001). Types of landslide displacements of the right bank of the Middle Dnieper as a reflection of the microstructure of clayey soils. *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 82–90 [in Ukrainian].
- Burshtynska, H., Vasyliukha, I., Koval, P. (2007). Methodology of construction of Digital Elevation Models of river bottom. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 69, 135–144 [in Ukrainian].
- Demchyshyn, M. H. (2004). *Technogenic influences on the geological core territory of Ukraine*. Gnosis [in Ukrainian].

- Demchyshyn, M.H. (1992). *Modern dynamics of slopes on the territory of Ukraine*. Nauk. dumka [in Ukrainian].
- 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 [in Ukrainian].
- 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.
- Kravets, O. Ya. (2020). The use of geoinformation technologies in the study of landslide processes. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(2), 113–117. <https://doi.org/10.36930/40300220> [in Ukrainian].
- 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*. doi.org/10.3997/2214-4609.201903176.
- Lisichenko, L., Pazynych, N., & Filipovych, V. (2018). Satellite monitoring of landslide development in the Pridneprovskaya Zone of Kyiv. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 15, 11–22. doi:10.36023/ujrs.2017.15.111 [in Ukrainian].
- Lubskyi, M., Orlenko, T., Piestova, I., Andreiev, A., & Lysenko, A. (2023). Evaluation of indicators for desertification risk assessment of Oleshky Sands Desertification based on Landsat Data Time Series. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 10(1), 17–28. doi:10.36023/ujrs.2023.10.1.229 [in Ukrainian].
- 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.
- Orlenko, T. A. (2023). Vertical displacement monitoring technique using radar interferometry data. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 10(3), 16–20. doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.247 [in Ukrainian].
- Pazynych, N. (2017). Research and forecasting of landslide phenomena of the DNIPER zone of Kyiv based on the remote sensing data and Geomorphological Studies. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 13, 10–16. doi:10.36023/ujrs.2017.13.104 [in Ukrainian].
- Peresadko, V. A., Lobanova, Yu. Yu. (2008). *Methodical guidelines for the construction of maps of different-order valleys, base surfaces and residual relief for students of geological, geographical and ecological faculties*. KhNU named after V. N. Karazin [in Ukrainian].
- Sentinel Application Platform (SNAP). (n.d.). <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.
- 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*, 1, 9–15. doi:10.23939/jtbp2020.01.009.
- Stankevich, S., Piestova, I., Kozlova, A., Titarenko, O., & Singh, S. K. (2020). Satellite radar interferometry processing and elevation change analysis for Geoenvironmental Hazard Assessment. *Techniques for Disaster Risk Management and Mitigation*, 125–139. doi:10.1002/9781119359203.ch10.
- Tustanovska, L. V., Ivanik, O. M., Shovkoplyas, T. V., Hadiatska, K. P., Kruchenik, Y. A. (2020). Geoinformation assessment of Kanivsky Prydniprov'ye Paleorelief by structural morphometry. *International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020*. doi:10.3997/2214-4609.2020geo048.

Отримано редакцією журналу / Received: 15.06.23
Прорецензовано / Revised: 09.09.23
Схвалено до друку / Accepted: 18.10.23

Tetiana ORLENKO, PhD Student
ORCID ID: 0000-0002-4933-7750
e-mail: tetianaorlenko@ukr.net
State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the IGS of the NAS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

MONITORING OF VERTICAL DISPLACEMENTS OF THE EARTH SURFACE OF THE RIGHT BANK OF THE KANIV RESERVOIR

Monitoring of vertical displacements of the earth's surface on the right bank of the Kaniv Reservoir in the Vytachiv-Stajky region was carried out using the differential radar interferometry (DinSAR) technique. According to the results of observations during the spring period from 2015 to 2023, active landslide areas are displayed. The DinSAR method is briefly described, emphasising data filtering steps for landslide activation mapping. A high data correlation was recorded, and the presence of zones of active shifts on the shore of the reservoir was confirmed. The spread and intensity of landslide manifestations are determined by the peculiarities of the geological and geomorphological structure of the territory, its tectonic, neotectonic and seismic regimes, and hydrological and climatic conditions. Limitations of the method arising from the temporal decorrelation of the radar signal in regions with a large amount of vegetation are determined. Due to the significant decorrelation between the obtained results of forested and watered areas, the DinSAR technique, a digital elevation model (DEM), analysis of base surface maps and the results of spectral index calculations were combined to identify regions of active landslides caused by waterlogging of the Dnieper slopes. The study demonstrates the feasibility of using DinSAR to detect and monitor surface deformation.

Keywords: dangerous geological processes, landslides, monitoring, radar interferometry, GIS.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.