

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Вінтонів Вікторія Вікторівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**Застосування спектрального аналізу для дослідження зсувних
процесів у гірських районах України на основі LiDAR та
цифрового аналізу рельєфу**

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня

В.В. Вінтонів

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Кухтар Денис Васильович, к.т.н, доцент

керівника)

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
Освітньо-професійна програма Геодезія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ГКЗ
Приходько М. М.

«__» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ
Вінтонів Вікторії Вікторівні

1. Тема роботи « Застосування спектрального аналізу для дослідження зсувних процесів у гірських районах України на основі LiDAR та цифрового аналізу рельєфу »

Керівник роботи доцент Кухтар Д.В.

Наказ ректора від « 8 » червня 2026 року № 292/7 .

2. Термін подання студентом роботи – 24 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи:

Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1. Досліджувані території

2. Методи дослідження

3. Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу: Карти пагорбів отримані за допомогою LiDAR

6. Дата видачі завдання – «08» квітня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури.	08.04.26 15.04.26	
2	Складання попереднього плану та змісту бакалаврської роботи.	19.04.26 25.04.26	
3	Досліджувані території	26.04.26 12.05.26	
4	Методи дослідження	13.05.26 29.05.26	
5	Результати дослідження	30.05.26 15.06.26	
6	Формування пояснювальної записки	16.06.26 18.06.26	
7	Оформлення бакалаврської роботи та додатків до неї, складання висновків.	19.06.26 23.06.26	

Студент

(підпис)

Вінтонів В.В.
(розшифровка підпису)

Керівник

(підпис)

Кухтар Д.В.
(розшифровка підпису)

Анотація

Зсувні карти, що фіксують зміщення мас ґрунту, є ключовими для визначення небезпеки зсувів та дослідження того, як стабільність схилів впливає на топографічні процеси.

Застарілі підходи до їх розробки, які покладалися на розшифровку аерофотознімків, опрацювання топографічних планів та обстеження на місці, не завжди гарантують вичерпність та неупередженість отриманих даних.

Водночас, прогрес у сфері лазерного сканування (LiDAR) та здешевлення доступу до деталізованих цифрових моделей висот (ЦМВ) відкривають шлях до застосування комп'ютеризованих способів документування зсувних явищ.

У цій кваліфікаційній праці приділено увагу дослідженню потенціалу використання спектрального аналізу цифрових моделей висот, сформованих із застосуванням LiDAR-знімання, для територій, розташованих на Передкарпатті та в гірських регіонах Закарпаття.

Метою є ідентифікація та автоматизоване виділення структурних елементів, що свідчать про наявність глибоко розташованих зсувних процесів.

Із цією метою було застосовано дискретне перетворення Фур'є, так і його двоеластичний вейвлет-аналог.

Такий підхід дав змогу встановити закономірності у просторових частотах рельєфу, які є типовими для зсувних утворень, зокрема для виявлення зсувних сходів, хвилеподібних деформацій поверхні та переміщених масивів ґрунтових або гірських порід.

Розбивка спектральної енергії по відповідних частотних смугах дала змогу виявити ті зони, де колись відбувалася нестійкість схилів, а також окреслити межі зсувних утворень.

Коли ми звірили точність отриманих даних із наявними картами зсувів, з'ясувалося, що запропонована методика дає змогу досягти середнього показника правильності класифікації приблизно на рівні 82% у межах обстежуваних територій.

Ці спостереження підтверджують слушність застосування програмних методів спектрального дослідження як дієвого засобу для створення карт зсувів та цифрової оцінки рельєфу на території України.

Розглядається завдання дипломної роботи бакалавра, що полягає у вивченні потенціалу використання механізованих підходів до спектрального аналізу цифрових мап земної поверхні.

У фокусі дослідження знаходяться явища зсувів та характерні риси вигляду рельєфу, спричинені зсувними процесами, на схилових місцевостях Прикарпаття та гірських зонах Закарпаття.

Суттю роботи є дослідження застосування алгоритмів для автоматизованого знаходження та відображення зсувів, базованих на спектральному розборі цифрових моделей висот, отриманих завдяки лазерному скануванню ландшафту.

Ключові слова: зсуви, інвентаризація зсувів, цифрова модель рельєфу, лазерне сканування, LiDAR, спектральний аналіз

Abstract

Slide maps, which record the displacement of soil masses, are key to determining the hazard of landslides and studying how slope stability affects topographic processes.

Outdated approaches to their development, which relied on the interpretation of aerial photographs, processing of topographic plans and on-site surveys, do not always guarantee the completeness and impartiality of the data obtained.

At the same time, progress in the field of laser scanning (LiDAR) and the reduction in the cost of access to detailed digital elevation models (DEMs) open the way to the use of computerized methods of documenting landslide phenomena.

This qualification work focuses on investigating the potential of using spectral analysis of digital elevation models generated using LiDAR for territories located in the Carpathian Mountains and in the mountainous regions of Transcarpathia.

The goal is to identify and automatically select structural elements that indicate the presence of deep landslide processes.

For this purpose, the discrete Fourier transform and its bi-elastic wavelet analogue were used.

This approach made it possible to establish patterns in the spatial frequencies of the relief, which are typical for landslide formations, in particular for the detection of landslide stairs, wave-like surface deformations and displaced massifs of soil or rocks.

The breakdown of spectral energy into the corresponding frequency bands made it possible to identify those zones where slope instability once occurred, as well as to outline the boundaries of landslide formations.

When we compared the accuracy of the obtained data with the available landslide maps, it turned out that the proposed method allows us to achieve an average classification accuracy of approximately 82% within the surveyed territories.

These observations confirm the validity of the use of software methods of spectral research as an effective tool for creating landslide maps and digital relief assessment in Ukraine.

The task of the bachelor's thesis is considered, which consists in studying the potential of using mechanized approaches to spectral analysis of digital maps of the earth's surface.

The focus of the study is on landslide phenomena and characteristic features of the relief appearance caused by landslide processes on the sloping terrain of the Carpathian region and the mountainous zones of Transcarpathia.

The essence of the work is to study the use of algorithms for automated detection and display of landslides based on spectral analysis of digital elevation models obtained through laser scanning of the landscape.

Keywords: landslides, landslide inventory, digital relief model, laser scanning, LiDAR, spectral analysis

Зміст

Вступ	9
1. Досліджувані території.....	12
1.1. Досліджувана ділянка Передкарпаття	13
1.2. Досліджувана ділянка Закарпаття.....	14
2. Методи дослідження.....	17
2.1. Двовимірне дискретне перетворення Фур'є (2D DFT).....	20
2.2. Двовимірне безперервне вейвлет-перетворення (2D CWT).....	22
2.3. Спектри Фур'є та вейвлет-спектри	26
2.4. Картування спектральної потужності.....	31
2.4.1. Віконне двовимірне перетворення Фур'є (2D DFT)	34
2.4.2. Двовимірне безперервне вейвлет-перетворення (2D CWT).....	35
2.5. Оптимізація вихідних результатів алгоритму.....	37
3. Результати дослідження.....	40
3.1. Карти зсувів.....	40
3.2. Карта домінантних довжин хвиль.....	47
Висновки	51
Список використаної літератури	54

Вступ

Зсувні явища становлять собою одну з наймасовіших і найбільш загрозливих серед екзогенних геоморфологічних процесів, які значно діють на екологічну ситуацію, громадську безпеку та працездатність техногенних систем.

Важливість питання зсувів особливо зростає стосовно території нашої держави, а саме для областей Карпатського регіону, його Передкарпаття та Закарпаття.

Тут спільна діяльність такої низки факторів, як складна геологічна структура, великі нахили схилів, сильні опади та людська діяльність, формує ідеальне підґрунтя для розгортання зсувної активності.

Створення детальних планів обліку зсувів є фундаментальним кроком у визначенні небезпеки, що її становлять зсуви, і становить невід'ємну частину при плануванні територіального розвитку, впровадженні стратегій управління ризиками та забезпеченні безпеки ділянок.

Окрім свого практичного застосування, подібні картографічні матеріали мають значущу вагу у фахових наукових пошуках, які сфокусовані на аналізі просторових та часових тенденцій еволюції зсувних явищ, а також природу рухів земних мас та гірських порід.

Класичні техніки для картування зсувів охоплюють вивчення топографічних планів, візуальне опрацювання аерофотокадрів, зокрема з використанням стереоскопічного обладнання, а також прямі інспекції на місці щодо рельєфоутворення схилів.

Попри їхню поширеність, ці методи мають певні важливі недоліки.

Топографічні карти часом не надають необхідної деталізації, щоб ідентифікувати невеликі чи малопомітні зсуви.

Аерофотознімки, особливо там, де густий рослинний покрив, не завжди дають змогу чітко визначити морфологічні сліди зсувних змін.

Полеві дослідження, зі свого боку, є доволі виснажливими, забирають чимало часу і стають значно складнішими в умовах гірської чи залісненої місцевості.

Окремою складною ланкою постає процес імпорту отриманих даних спостережень у картографічну основу, що може породжувати як похибки, так і певні невідповідності.

Як наслідок, реєстри зсувів, створені зусиллями різних науковців чи установ, часто демонструють відчутні розбіжності, а мапи, що існують, бувають або уривчастими, або не охоплюють повний обсяг необхідної інформації.

Застосування подібної інформаційної бази у подальших обчисленнях, пов'язаних із оцінкою зсувних загроз, здатне викривити визначення ризикованості й позначитися на висновках геоморфологічних та інженерно-геологічних експертиз.

Прогрес у сучасних підходах до зондування Землі з віддалених засобів, а особливо впровадження технології лазерного сканування місцевості (LiDAR), надає неабиякі перспективи для вивчення зсувних явищ.

Цифрові моделі рельєфу, збудовані на основі LiDAR-інформації з високою точністю, дають змогу достовірно реконструювати конфігурацію земної площі, навіть там, де присутній лісовий масив, адже лазерні промені здатні частково долати перешкоди рослинного ярусу.

За умови належної алгоритмічної підготовки, ці виміри відкривають шлях до ідентифікації незначних за розмірами морфологічних структур рельєфу, які мають безпосередній зв'язок зі зсувами.

Протягом останнього часу низка наукових праць довела, що застосування даних LiDAR є дієвим для створення мап зсувних явищ у непростих природних ландшафтах.

Однак, значна частина цих досліджень опирається на візуальне тлумачення Цифрової Моделі Рельєфу (ЦМР), що несе у собі відтінок суб'єктивності та визначається рівнем знань фахівця.

З огляду на це, виникає необхідність впровадження більш неупереджених та числових методів опрацювання топографії, що дадуть змогу зробити процедуру ідентифікації зсувів автоматизованою та мінімізувати вплив людського чинника.

Серед надійних шляхів розвитку виділяється впровадження спектрального аналізу у роботі з цифровими моделями висот.

Дослідження просторових частот рельєфу відкриває можливості для чисельного визначення морфологічних рис, притаманних зсувним процесам, а також для розкриття закономірностей їхнього просторового розташування.

Хоча окремі наукові пошуки у цій сфері вже існують, повноцінне використання значних обсягів деталізованих LiDAR-даних для висвітлення масштабних просторових тенденцій зсувів залишається питанням, яке потребує значного поглиблення, зокрема, для території нашої країни.

У цій бакалаврській праці використано методику створення карт для визначення зсувних явищ, що залягають глибоко, котра базується на використанні двовимірного перетворення Фур'є і неперервного вейвлет-перетворення стосовно високодеталізованих цифрових моделей рельєфу.

Шляхом дослідження змін спектральної потужності у визначених просторових частотних інтервалах стає можливим ідентифікувати топографічні ознаки зсувів і будувати їхні ареали розповсюдження на великих площах.

Окрім того, розробка карт з переважаючими довжинами хвиль надає інструмент для вивчення кінематики зсувів на рівні метрів, визначення сліду попередньої активності зсувів, а також оцінки впливу супутніх геоморфологічних явищ, як-от повільне переміщення мас ґрунту.

1. Досліджувані території

З метою здійснення наукового пошуку були відібрані дві ділянки, що типово представляють ландшафти України, де спостерігається інтенсивне протікання зсувних явищ.

Важливою умовою було те, що ці території мали доступ до високоточних цифрових моделей рельєфу (ЦМР), створених на основі даних лазерної аерофотозйомки (LiDAR).

Зазначені географічні зони охоплюють Передкарпаття та гірський масив Українських Карпат (зокрема, Закарпаття), які загально визнано належать до зон підвищеного ризику виникнення зсувів в межах держави.

Критерії для вибору цих територій ґрунтувалися на наявності сукупності екстремальних інженерно-геологічних умов, великих кутів нахилу схилів, значного ерозійного впливу водних потоків, а також взаємодії кліматичних змін та діяльності людини.

Високодеталізовані цифрові моделі місцевості, що уможливлують застосування кількісних підходів до аналізу морфології схилів та автоматизованого створення карт зсувів, є доступними для обох ареалів.

Аби підвищити ступінь достовірності аналізу, кожен територію, що перебувала на дослідженні, було сегментовано на менші, локальні ділянки, об'єднані схожими геоморфологічними характеристиками.

Здобуті результати роботи алгоритмів звірялися з існуючими картографічними даними, висновками попередніх геологічних пропрацювань та методом візуального тлумачення цифрових моделей висот.

У рамках цього наукового пошуку пріоритет надається вивченню морфологічних маркерів зсувів, які мають значну глибину залягання; натомість грязьові потоки та неглибокі зсуви беруться до уваги лише вторинно.

1.1. Досліджувана ділянка Передкарпаття

Дослідницька зона, що пролягає у межах Передкарпаття, прилягає до міста Яремче, що на Івано-Франківщині, та охоплює схили, що спускаються до долини річки Прут.

Ця місцевість вирізняється складним середньогірним ландшафтом, де амплітуда висот сягає 300–400 метрів, ухили схилів становлять 15–35 градусів, і тут спостерігається інтенсивна дія ерозійних явищ (див. рис. 1).



Рисунок 1. Карта пагорбів, отримана за допомогою LiDAR, досліджуваної області Передкарпаття

Склад порід геологічної основи складають флішові утворення Карпатського прогину.

Це, зокрема, смуги пісковиків, алевролітів та глинистих порід, які мають властивість набирати вологу та втрачати стійкість.

Стрімке заглиблення русла річка Прут у ці початкові породи викликає підмив схилів, чим сприяє розвитку великих, залягаючих глибоко, зсувних процесів.

На базі числових макетів земної поверхні, створених за допомогою технології LiDAR, площини зсувів на цій місцевості виразно проступають як нерівномірність мікрорельєфу, низк щаблів, зміщених масивів та змінених терас.

Найкраще збереглися структурні елементи давніх зсувових утворень на схилах, орієнтованих на південь та південний захід.

Дослідження ґрунтувалося на цифровій моделі рельєфу з точністю просторового розрізнення приблизно 1 метр, що дозволяє ідентифікувати форми рельєфу з точністю до метра.

В межах визначеної зони глибоко залягаючі зсуви охоплюють значну частку схилів, займаючи приблизно 40–50 відсотків загальної площі, що була об'єктом вивчення.

1.2. Досліджувана ділянка Закарпаття

Наступна ділянка, що підлягає дослідженню, знаходиться у межах Рахівщини Закарпаття, а саме – на північному боці Мармароського кристалічного хребта.

Ця місцевість вирізняється своєю гірською природою, відчутними нахилами схилів, глибокою мережею річкових долин та інтенсивними динамічними процесами, що відбуваються нині.

Фундамент геологічний цієї зони формують породи метаморфічного та осадового походження, які вкриті товстим шаром відкладів, що утворилися внаслідок вивітрювання та змиву (елювіально-делювіальні).

Надлишок вологи, разом із сезонними змінами температур та таненням снігу, створює сприятливі умови для формування великих зсувних

мас, особливо там, де є тектонічні розломи або де потоки води підмивають схили.

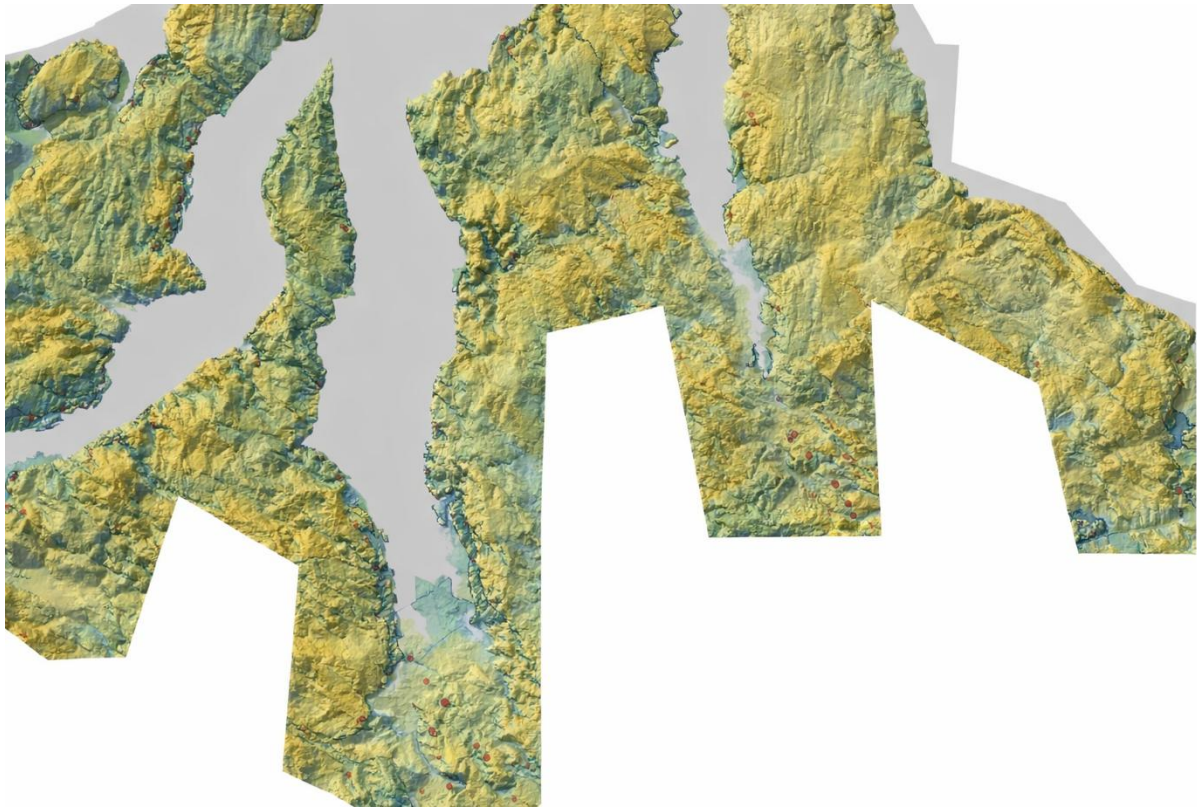


Рисунок 2. Карта пагорбів, отримана за допомогою LiDAR, досліджуваної області Закарпаття

На основі даних LiDAR-сканування рельєф схилів постає вельми викривленим, обтяженим великою кількістю терас зсувів, розколотих вершин, хвилястої топографії та лінійних структур потокового типу.

Усі ці риси характерні для поширення давніх, глибоко залягаючих зсувних деформацій.

Більшість масивів зсувів демонструють складну багаторівневу структуру, що вказує на багатовагому динаміку зсувних рухів у попередні епохи.

Для аналізу цієї зони було задіяно цифрову модель висот із точністю орієнтовно 1–2 метри.

У межах вивченої території масиви стародавніх зсувів охоплюють приблизно від п'ятої до третини загальної площі, концентруючись головним чином на схилах, орієнтованих на північ чи північний схід.

Завдяки використанню даних лазерного сканування високої деталізації, є можливість провести числовий аналіз просторових періодичностей рельєфу та зіставити отримані результати автоматичного картування із тими, що були здобуті шляхом візуального тлумачення.

Деталізовані фізико-географічні та геоморфологічні властивості територій, що досліджуються, представлено у Таблиці 1.

Таблиця 1 Загальні фізико-географічні та геоморфологічні характеристики досліджуваних територій

Характеристика	Передкарпаття (околиця м. Яремче, долина р. Прут)	Закарпаття (Рахівський район, Мармароський масив)
Адміністративне розташування	Івано-Франківська область, Яремчанська міська громада	Закарпатська область, Рахівський район
Фізико-географічна область	Передкарпатська височина	Українські Карпати
Тип рельєфу	Середньогірний, розчленований	Високогірний, сильно розчленований
Абсолютні висоти, м	500–900	700–1600
Відносні перевищення, м	до 300–400	до 600–800
Середня крутизна схилів	15–35°	20–40°
Геологічна будова	Флішові відклади (пісковики, алевроліти, глини)	Метаморфічні та осадові породи, елювіально- делювіальні відклади
Основні геоморфологічні процеси	Зсуви, ерозія, обвали, річкова денудація	Зсуви, обвали, повзучість грунтів
Типи зсувів	Глибоко закладені, багатофазні	Глибоко закладені, багаторусні
Частка зсувів на площі	40–50 %	20–30 %
Фактори активізації	Підрізання схилів р. Прут, опаді	Опади, сніготанення, тектонічні порушення
Рослинний покрив	Лісовий (хвойні та мішані ліси)	Лісовий та субальпійський
Джерело ЦМР	LiDAR-аерозйомка	LiDAR-аерозйомка
Просторова роздільна здатність ЦМР	~1 м	1–2 м
Придатність для спектрального аналізу	Висока	Висока

2. Методи дослідження

У межах цієї роботи, з метою проведення чисельного дослідження топографічних характеристик зсувних утворень, що знаходяться на значній глибині, а також задля неупередженого складання карти їхнього поширення, було задіяно дві методики цифрової просторової обробки інформації: двоетапне дискретне перетворення Фур'є (2D DFT) та двоетапне неперервне вейвлетне перетворення (2D CWT).

Ці обидві техніки застосовуються до аналізу цифрових рельєфових моделей із високою деталізацією, які були сформовані на підставі збору даних лазерного сканування (LiDAR).

Методи Фур'є-декомпозиції знаходять розлоге застосування у геонауках та геоінформаційних системах; ними оперують для розпізнавання просторових закономірностей терену, дослідження великомасштабних характеристик ландшафтів та чисельного визначення морфологічних рис земної поверхні.

Використання двовименсійної дискретної Фур'є-трансформації забезпечує перехід цифрової моделі рельєфу з її просторового представлення до частотного спектра, відкриваючи можливість з'ясувати, яким чином розсіюється потужність топографічних структур серед різноманітних просторових періодичностей.

В даній роботі для аналізу ми використали крім аналізу Фур'є вейвлет аналіз.

Вейвлет аналіз — це математичний метод дослідження сигналів та часових рядів, який, на відміну від перетворення Фур'є, дозволяє одночасно аналізувати як частотні, так і часові характеристики, забезпечуючи чітку прив'язку особливостей сигналу до часу.

Він використовує локалізовані "маленькі хвилі" (вейвлети), які розтягуються та стискаються для виявлення як низько-, так і високочастотних компонентів.

Вейвлет-аналіз, хоча й є доволі новим, але багатообіцяючим засобом для вивчення будови земної поверхні.

Його перевага — це здатність одночасно оцінювати як просторове розміщення, так і масштаб елементів рельєфу.

Завдяки двовимірному неперервному вейвлет-перетворенню, просторові відомості можна відобразити у площині, де співіснують позиція та частота, що уможливорює точне визначення виразних рис місцевості на обстеженій ділянці.

У цій праці обидва методи трансформації залучаються з метою встановлення тих значущих просторових розмірів та періодів, які властиві глибинним зсувним процесам.

Спираючись на виокремлені спектральні ознаки, було здійснено картографування територій, де вираженість топографічних проявів зсувів є найбільшою.

Протягом цього аналізу терміни "просторовий масштаб" та "довжина хвилі" беруться як еквівалентні, тоді як величина, обернена до довжини хвилі, інтерпретується як відповідна просторова частота топографічної конфігурації.

Щоб визначити, наскільки добре працюють запропоновані підходи до автоматичного створення карт, ми зіставили результати спектрального аналізу з тими картами, які вже існують щодо залягання глибоких зсувів на кожній ділянці, що досліджувалася.

Хоча ці карти, як будь-які облікові документи, можуть містити долю суб'єктивності, їх створювали, застосовуючи цифрові моделі рельєфу з високою деталізацією разом із класичними методами аналізу та спостереженнями "в полі".

Через це вони вважаються найбільш надійним джерелом відомостей стосовно розповсюдження глибинних зсувів на територіях, що були предметом нашого вивчення.

Уся розрахункова робота та маніпуляції з даними були здійснені на персональному комп'ютері, при цьому застосовувалося програмне забезпечення MATLAB.

Такий підхід гарантує, що отримані висновки можна буде повторити, а використані методики стануть доступними для майбутніх інженерно-геодезичних та геоінформаційних робіт, що проводяться на теренах України.

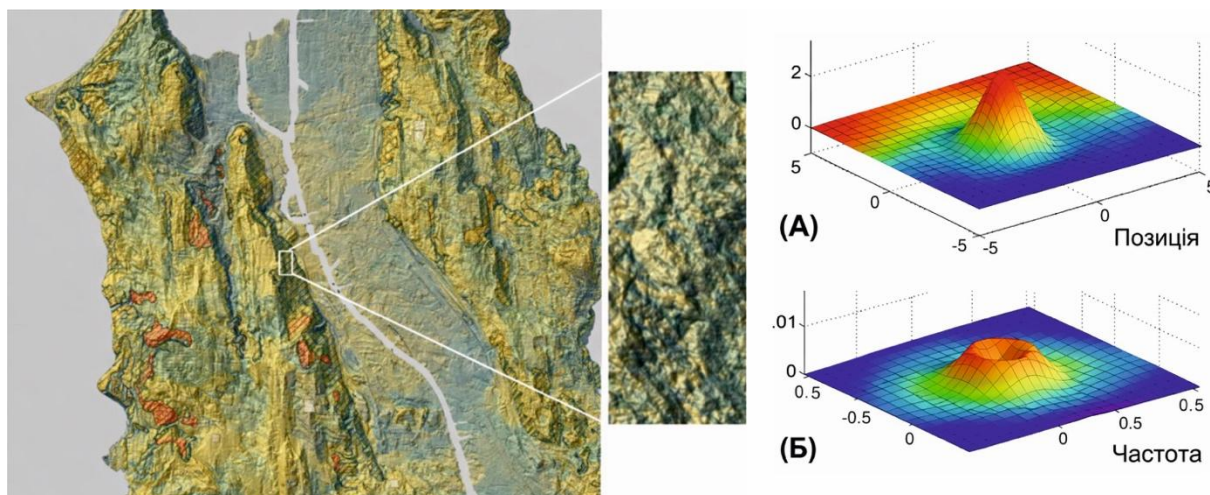


Рисунок 4. Трансформація сигналу

На рисунку 4 (А) зображено двовимірний вейвлет (в масштабі $s=1$), а (Б) — його спектральне відображення (через перетворення Фур'є).

На діаграмі (Б) можна помітити, що по мірі віддалення від центру квадратної сітки радіальна частота наростає, водночас довжина хвилі, що відповідає, (тобто просторовий масштаб) — спадає.

У ділянці (Б) кільцевий пік демонструє головну частоту вейвлета.

Ця частота, як відомо, прямо пропорційна оберненій величині до його властивій довжини хвилі (що відповідає певному просторовому розміру).

До того ж, помітно, що частотний розподіл у (Б) є широким, охоплюючи додаткові компоненти, розташовані симетрично відносно цього центрального, найвищого значення частоти.

2.1. Двовимірне дискретне перетворення Фур'є (2D DFT)

Проведення двовимірного перетворення Фур'є для цифрових моделей висот (ЦМВ) дає змогу кількісно зафіксувати просторову організацію рельєфу.

Це відкриває шлях до визначення розмаху, напрямку та конфігурації повторюваних або майже повторюваних морфологічних ознак у великому спектрі просторових періодів.

У площині дослідження топографії, такий метод дає змогу ідентифікувати домінантні поодинокі розміри рельєфу, котрі асоційовані з певними геоморфологічними явищами, як-от значні за розміром зсувні рухи, утворені водною ерозією структури, а також хвилясті контури схилових поверхонь.

Двовимірне дискретне перетворення Фур'є для сукупності даних $z(x,y)$, визначених на регулярній ґратці розміру $N_x \times N_y$, здійснює перехід від просторового відображення рельєфу до його частотного представлення.

Унаслідок цього кожній парі просторових частот асоціюється певне комплексне число, яке несе відомості про потужність (амплітуду) та зсув (фазу) відповідного гармонійного компонента.

Формула для 2D DFT виглядає наступним чином:

$$Z(k_x, k_y) = \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} z(x, y) \exp \left[-2\pi i \left(\frac{k_x x}{N_x} + \frac{k_y y}{N_y} \right) \right]$$

де k_x та k_y позначають дискретні просторові частоти, спрямовані вздовж осі x та осі y відповідно.

Амплітудний спектр, що виникає після виконання перетворення Фур'є, відображає, як енергія рельєфу розподілена серед різних просторових частот, даючи змогу ідентифікувати найбільш виразні довжини хвиль топографічних об'єктів.

Частоти, що мають низькі значення, корелюють із великими структурними елементами рельєфу, наприклад, пологими схилами чи значними зсувними тілами.

На противагу цьому, високі частоти вказують на наявність маломасштабних особливостей, зокрема уступів, тріщинуватості та дрібних нерівностей у структурі поверхні.

Оскільки двовимірне дискретне перетворення Фур'є (2D DFT) має властивість акумулювати відомості про рельєф у частотному спектрі, воно виявляється потужним засобом для ідентифікації специфічних просторових розмірностей зсувних утворень.

Однак, варто пам'ятати, що сам же метод Фур'є не дає можливості прив'язати частотні складові до конкретної точки у просторі, що ускладнює його використання при роботі з нерівномірними або локалізованими елементами рельєфу.

З огляду на це, у цій науковій роботі 2D DFT застосовується спільно з вейвлет-перетворенням, котре дає змогу одночасно брати до уваги як розмірність, так і координати топографічних елементів.

Одним із загальноновживаних методів визначення потужності спектру перетворення Фур'є Z є застосування періодограми, яка розраховується на підставі двовимірного дискретного перетворення Фур'є (DFT):

$$P(k_x, k_y) = \frac{1}{N_x N_y} |Z(k_x, k_y)|^2$$

де

- $P(k_x, k_y)$ — спектральна потужність на просторових частотах k_x та k_y ;
- $Z(k_x, k_y)$ — комплексне значення спектра Фур'є;
- N_x, N_y — кількість вузлів сітки у напрямках xx та yy ;
- $|\cdot|$ — модуль комплексного числа.

Для дослідження переважаючих просторових частот та подальшого відображення на мапі типових розмірів зсувних структур застосовується розрахована періодограма.

Ця періодограма демонструє, як енергія рельєфу розподіляється по різних просторових частотах, а також дає змогу ідентифікувати провідні довжини хвиль у топографічних об'єктах.

Піки на графіку періодограми вказують на ті масштаби рельєфу, які найсуттєвіше впливають на формування поверхні, наприклад, дрібні нерівності схилів чи саме розташування зсувів.

2.2. Двовимірне безперервне вейвлет-перетворення (2D CWT)

Двовимірне неперервне вейвлет-перетворення (2D CWT) являє собою потужний спосіб дослідження даних, що характеризуються просторовою змінною, адже воно дає можливість одночасно брати до уваги розмірність топографічних елементів та їхні координати у просторі.

На противагу традиційному перетворенню Фур'є, вейвлет-аналіз забезпечує точне визначення місця розташування частотних компонентів, що є критично необхідним при вивченні заплутаних геоморфологічних структур, наприклад, зсувів, що залягають на значній глибині.

Формула узагальненого двовимірного неперервного вейвлет-перетворення для поверхні з висотами $z(x,y)$, з використанням вейвлета масштабу s та центру (a,b) , має такий вигляд:

$$W(s, a, b) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) \psi^* \left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s} \right) dx dy$$

де

- $W(s, a, b)$ — вейвлет-коефіцієнт, що характеризує інтенсивність топографічних ознак масштабу ss у точці (a,b) ;
- $\psi(x,y)$ — материнський вейвлет;
- ψ^* — комплексно-спряжена функція;
- s — параметр масштабу, який визначає характерну довжину хвилі аналізованих форм;
- (a,b) — координати просторового зсуву вейвлета.

Параметр потужності s регулює габарити вейвлета: мізерні чисельності s відображають ледь помітні варіації місцевості, тоді як значні величини охоплюють об'ємні конфігурації, наприклад, обвальні масиви чи хвилеподібні схили.

Отже, двовимірне контурне перетворення Вейвлета (2D CWT) надає змогу ідентифікувати типові просторові розмірності зсувних явищ та досліджувати, як вони трансформуються у межах обстежуваної місцевості.

У рамках цього проєкту, коефіцієнти вейвлетів застосовуються для формування просторових розподілів локальної енергії спектру.

Ці розподіли демонструють ступінь вираженості морфологічних елементів, пов'язаних зі зміщенням, у кожній координаті цифрової моделі висот.

Таким чином, з'являється спроможність автоматично ідентифікувати ділянки, де ризик формування значних підповерхневих зсувів є вищим, що є вдалим доповненням до висновків, здобутих через застосування двовимірного перетворення Фур'є.

Отже, злука двовимірного дискретного перетворення Фур'є (2D DFT) та двовимірного безперервного вейвлет-перетворення (2D CWT) дає змогу паралельно досліджувати вагомій просторовій розмірності рельєфу разом із точними місцями їхнього розташування, що має вирішальне значення для неупередженого створення карт зсувних явищ.

У цьому дослідженні застосовується послідовний принцип визначення довжини хвилі, або ж відповідного їй просторового еквівалента масштабу, що трактується як величина, обернено пропорційна до відповідної смугової просторової частоти, як візуально демонструє рисунок 4.

Завдяки такій методології стає можливим встановити чіткий взаємозв'язок між частотними ознаками спектра та типовими габаритами елементів рельєфу.

Оскільки форма хвильового пакета, який ми розглядаємо, нагадує морфологічну картину зсувних структур, у цій роботі для спектрального аналізу цифрових карт висот (ЦМР) був обраний двовимірний вейвлет.

Його математичний вигляд представлено у такому рівнянні, а візуалізація просторового й частотного зображень цього вейвлета показана на рисунку 4.

Якщо ми визначимо $r^2 = x^2 + y^2$, то вигляд основного (материнського) 2D-вейвлета формулюється так:

$$\psi(x, y) = \left(2 - \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$$

де σ являє собою параметр, котрий визначає характер характерного просторового масштабу (ширину) хвильового пакета.

Якщо ж масштаб задається через параметр s (як це буває у випадку двовимірного неперервного вейвлет-перетворення), то вигідно використовувати наступний запис для масштабованого вейвлета:

$$\psi_s(x, y) = \frac{1}{s^2} \left(2 - \frac{x^2 + y^2}{s^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2s^2}\right)$$

Коефіцієнт масштабування (який може бути $1/s^2$ або якоюсь іншою константою) може варіюватися залежно від того, як саме відбувається нормалізація енергії чи амплітуди.

Проте, сам вигляд ядра (тобто вираз у дужках разом із гаусовим показником) лишається незмінним.

Щодо двовимірного неперервного вейвлет-перетворення, його спектр потужності цілком правомірно можна означити як середнє арифметичне квадратичних значень модулів вейвлет-коефіцієнтів, обчислених для кожного рівня масштабування s :

$$P_{CWT}(s) = \frac{1}{N_a N_b} \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{N_b} |W(s, a, b)|^2$$

де

- $P_{CWT}(s)$ — спектр потужності вейвлета на масштабі s ;

- $W(s,a,b)$ — вейвлет-коефіцієнти 2D CWT;
- N_a, N_b — кількість вузлів сітки у напрямках a та b ;
- $|\cdot|$ — модуль комплексного числа.

Енергетичність топографічних особливостей, розкладена по різних просторових розмірах, ілюструється цим спектром потужності.

Пікові значення функції $P_{CWT}(s)$ вказують на ті розмірності, де геоморфологічні елементи (такі як зони зсувів чи дрібна хвилястість поверхні) виступають найбільш виразно.

З іншого боку, як ілюструє двовимірний вейвлет на рисунку 4, вейвлет будь-якого заданого розміру зазвичай охоплює низку просторових частот, що знаходяться по обидва боки від його основної (смугової) частоти.

Отже, коли ми використовуємо неперервне вейвлет-перетворення для аналізу на одному масштабі, чутливість спрямована не на конкретну частоту, а радше на певний діапазон частот.

У протиположному цьому, дискретне перетворення Фур'є працює з кожною окремою просторовою частотою.

Ця різниця має наслідком те, що піки у спектрі потужності, видобутому за допомогою вейвлет-аналізу, демонструють дещо пом'якшений вигляд порівняно зі спектром потужності, отриманим через Фур'є.

2.3. Спектри Фур'є та вейвлет-спектри

З метою з'ясування характерних довжин хвиль, які асоціюються з глибинними зсувами у межах кожного району дослідження, на першому етапі було відібрано типові ділянки.

Ці ділянки охоплюють як ті, де фіксується активність глибоко закладених зсувів, так і ті, що залишаються стабільними, без ознак зсувної динаміки.

Завдяки такому методу можна здійснити зіставлення спектральних показників як деформованого, так і незмінного рельєфу.

У межах Передкарпатського регіону (зокрема, поблизу Яремче, у руслі річки Прут) за еталонну зсувну ділянку було обрано частину значного, глибоко залягаючого зсувного тіла, розташованого на схилах долини Прута.

Ця ділянка вирізняється наявністю чітких зсувних уступів, рельєфу з хвилястою мікроструктурою та зміщеними масивами порід.

Для зіставлення ж була підібрана прилегла, стабільна територія, поверхня якої є доволі рівною, складена флішовими породами і не має виражених проявів зсувної активності.

На Закарпатті, а саме в межах гірського масиву Мармароси, що охоплює Рахівщину, типовим зразком території, схильної до зсувів, виступає уламок складного зсувного комплексу.

Він знаходиться на північних схилах цього масиву.

Тут очевидно видно переміщені масиви порід, сходинки зміщення та вигнуті лінії гребенів.

За еталон, незайману поверхню, узято найближчу ділянку, ландшафт якої зберіг свій початковий природний профіль, не зазнавши суттєвих зрушень, що сформувався у значно стабільніших геологічних умовах.

Провівши зіставлення спектральних характеристик цих територій, стане можливим виявити типові просторові ознаки, які розрізняють глибинні зсувні структури та стабільні ділянки ландшафту.

Ці відмінності, своєю чергою, можна буде використати для подальшої автоматизованої розробки картографічних матеріалів, що відображають поширення зсувних процесів.

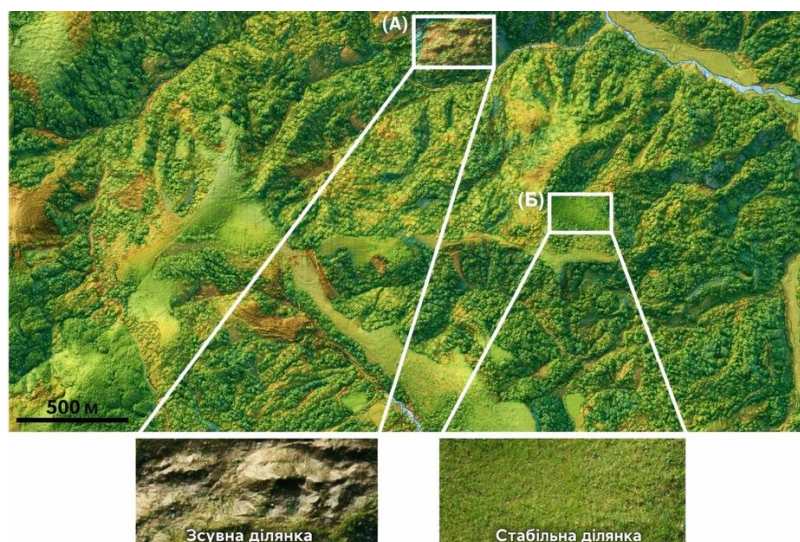


Рисунок 5. Карта пагорбів, отримана за допомогою LiDAR, досліджуваної області Передкарпаття

Білі прямокутники, позначені літерами (А) та (Б), вказують на ділянку зсуву та сталу (неушкоджену) площину відповідно; ці зони слугують для визначення спектрів потужності, нормованих у межах територій, що піддаються дослідженню.

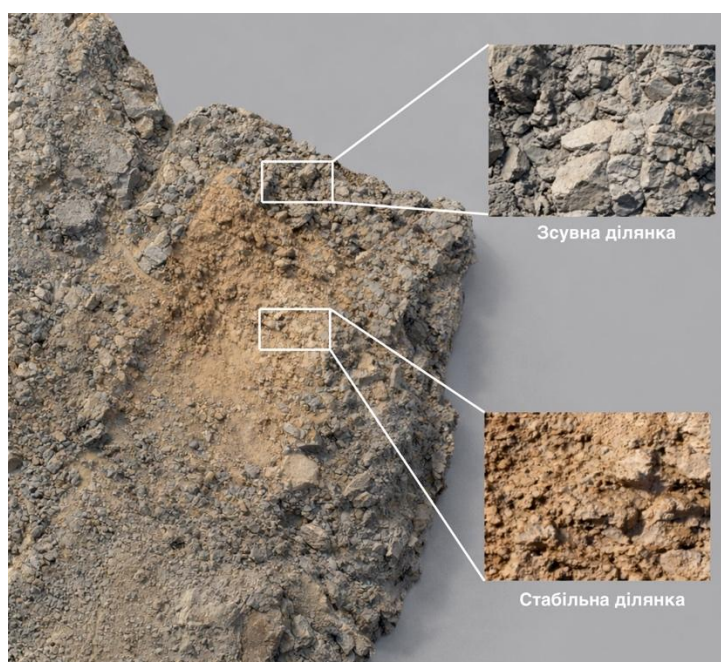


Рисунок 6. Карта пагорбів, отримана за допомогою LiDAR, досліджуваної області Закарпаття

Далі, кожна виділена ділянка терену зазнала процесу приведення до одиничного розкиду, слідом за чим для неї були сформовані Фур'є-спектри потужності та вейвлет-спектри, дотримуючись раніше наведених формул (рис. 7).

Аби спростити процес осмислення отриманих даних, двовимірний спектр, вибудований за формулою, трансформували у одновимірний спектр потужності, репрезентуючи його як залежність значень відрадіальної просторової частоти, що обчислюється як $(f_x^2 + f_y^2)^{1/2}$.

Виміряні спектри завжди демонструють загальну закономірність – зниження потужності спектра при наростанні просторової частоти.

Проте, на окремих частотних ділянках виявляються доволі відчутні розбіжності залежно від характеру рельєфу.

Коли аналіз проводиться через застосування дискретного перетворення Фур'є, неушкоджені (стабільні) площини зазвичай вирізняються більшою потужністю спектра у високочастотній області.

Натомість, для великих тектонічних зсувів характерна вища інтенсивність спектра в середньому частотному діапазоні.

Щодо спектрів, здобутих завдяки неперервному вейвлет-перетворенню, ми спостерігаємо, що для обох видів рельєфу показники спектральної потужності виявляються подібними як на низьких, так і на високих частотах.

Проте, у ситуації зі зсувами, які залягають значно глибше, стає очевидним наростання спектральної потужності саме в діапазоні середніх частот.

Це явище вказує на переміщення енергії спектра від областей низьких та високих частот до середніх масштабів.

Окреслені закономірності, імовірно, зумовлені специфікою морфології зсувних процесів, зокрема руйнуванням порід, що зберігали

певну цілісність у вигляді блоків, які були розділені зсувними ярусами (уступами) у верхніх зонах схилів, а також появою зон стиснення та зминання (складчастості) у нижній частині мас, що зсуваються.

Аби точніше ідентифікувати частотні діапазони, де зсуви, розташовані на значній глибині, концентрують свою енергію (спектральну потужність), було здійснено приведення спектрів, розрахованих для областей зсувів, до спільного масштабу шляхом їхньої нормалізації стосовно спектрів, зареєстрованих на стабільних (незсунутих) ділянках (див. рис. 7).

Усі ці нормалізовані спектральні криві демонструють чітко виражені максимуми, які співвідносяться з типовими просторовими періодами (характерними довжинами хвиль) зсувних структур, притаманними кожній окремо дослідженій територіальній одиниці.

Розташування піків у спектрах вказує на довжини хвиль приблизно 22 м для двох вивчених зон та близько 32 м для третьої; невеликі розбіжності між даними Фур'є та вейвлет-аналізу пояснюються специфікою спектральної прив'язки, притаманною кожному із зазначених методів.

Зважаючи на те, що зсувні деформації рельєфу охоплюють певний спектр просторових розмірностей, для визначення числових меж цього діапазону було застосовано метод вимірювання повної ширини піка на рівні половини його найвищого значення.

Отримані таким чином величини були обрані як типові просторові періодичні складові, і їх використано у наступних етапах процедур автоматизованого створення карт зсувів.

З-поміж усіх обстежених ділянок було виявлено, що спектри, обчислені за допомогою вейвлет-перетворення, демонструють протяжніші діапазони, аніж ті, що отримані через перетворення Фур'є.

Цей феномен пояснюється тим, що для кожного рівня масштабування вейвлет охоплює певний відрізок частотного континууму.

Найбільш виразно це стає помітно на низьких масштабах, коли вейвлетна функція подовжується у частотному просторі, спричиняючи суттєві розбіжності між спектрами Фур'є та вейвлет-спектрами, які проілюстровано на рисунку 7.

2.4. Картування спектральної потужності

Для автоматизованого окреслення ділянок місцевості, чії морфологічні властивості вказують на наявність раніше потужної, глибоко розташованої зсувної рухливості, у цьому дослідженні здійснюється просторовий розподіл (картографування) енергії спектра у визначених діапазонах частот, котрі були встановлені шляхом спектрального аналізу (рис. 7).

Ця методологія виходить із засади, що суттєві зсувні процеси залишають по собі унікальні спектральні ознаки, які виражаються через зростання рівня спектральної енергії у середньому діапазоні просторових хвиль, на відміну від ділянок із стабільним рельєфом.

Щодо кожної позначки цифрового рельєфу, спектральна інтенсивність визначається шляхом підсумовування або знаходження середнього значень спектру у межах заздалегідь окреслених меж просторових частот.

Якщо задіюється перетворення Фур'є, мапування буде реалізовано через послідовний спектральний аналіз із застосуванням ковзного вікна, що уможливорює встановлення просторового розподілу енергії у заданому діапазоні частот.

Щодо неперервного вейвлет-перетворення, то його картографування здійснюється на підставі розгляду вейвлет-коефіцієнтів, що відповідають певним масштабам, котрі корелюють з означеними характеристичними довжинами хвиль.

Здобуті карти, що демонструють спектральну густину потужності, розкривають просторовий характер перерозподілу енергії георельєфу.

Завдяки цьому стає можливим ідентифікувати зони, де ймовірність виявлення глибоко розташованих структур розломного типу є вищою.

Аби зробити результати картування більш достовірними, показники спектральної потужності проходять процедуру приведення у відповідність до середніх параметрів територій, що вважаються стабільними.

Такий підхід мінімізує вплив як загальних геоморфологічних ухилів, так і випадкових похибок (шумів) на локальному рівні.

Отож, відображення енергії спектра на площині виступає вирішальним кроком у цій методиці, зводячи до купи дані спектрального аналізу та їхнє просторове розміщення, а також формуючи підґрунтя для неупередженого, повторюваного й механізованого знаходження глибинних змін у межах тих ділянок, що підлягають дослідженню.

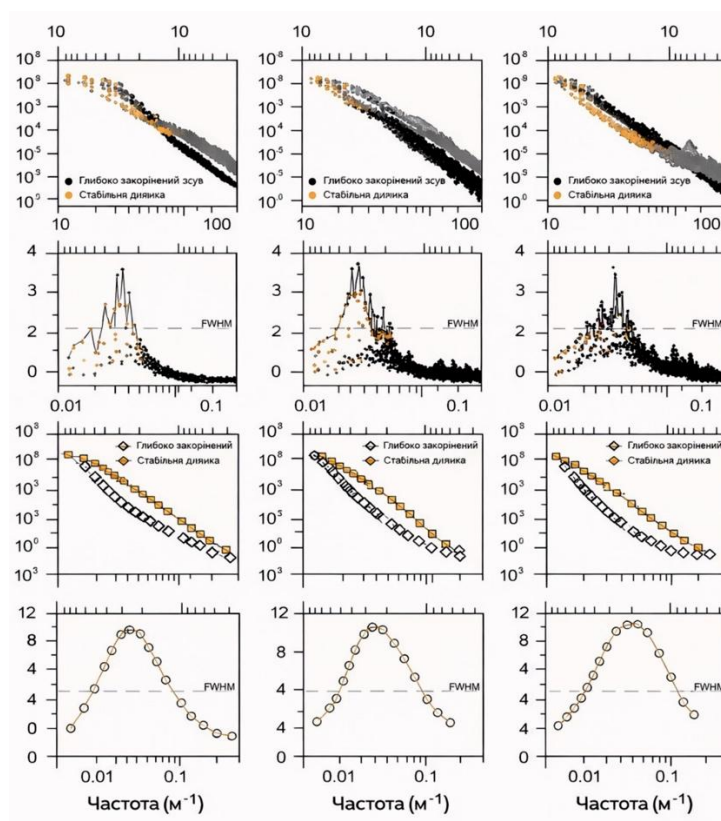


Рисунок 7. Спектри потужності

Розгляд графіків спектральної потужності, здобутих за допомогою апарату Фур'є-перетворення, демонструє тенденцію до поступової втрати енергії спектра в міру зростання просторових частот.

Це явище є спільним як для ділянок із загальним стабільним рельєфом, так і для зон, де активні глибокофокусовані зсувні явища.

Піки, виявлені в нормалізованих спектрах Фур'є, чудово ілюструють розбіжності у концентрації потужності між зсувами та неураженими ландшафтними формами.

Вони вказують на конкретні частотні діапазони, де саме ці глибокі зсуви накопичують значну частину спектральної енергії.

На візуалізації суцільні лінії представляють верхню огинаючу нормалізованих спектрів, тоді як пунктиром відмічаються показники повної ширини піку (FWHM), розраховані на рівні половини його найвищого значення для кожного окремого спектрального розподілу.

Дані, отримані за допомогою вейвлет-перетворення, узгоджуються з результатами, показаними у фур'є-спектрах, і демонструють таку ж закономірність — зменшення потужності спектра при зростанні його частоти.

До того ж, на графіках нормованих вейвлет-спектрів чітко простежуються певні частотні діапазони, де спостерігається підвищене накопичення спектральної енергії, пов'язане з об'єктами зміщення.

З метою забезпечення достовірності зіставлення отриманих спектральних характеристик, усі фрагменти поверхні, що підлягали подальшому спектральному дослідженню, попередньо зазнали нормування, приводячи їхню дисперсію до значення, що дорівнює одиниці.

2.4.1. Виконне двовимірне перетворення Фур'є (2D DFT)

Щоб просторово картографувати спектральну потужність рельєфу й автоматично знаходити зони, де залягають глибокі зсуви, у цьому дослідженні ми залучили віконний метод для двовимірних дискретних перетворень Фур'є (2D ДПФ).

Цей спосіб базується на використанні цифрових моделей рельєфу з високою деталізацією, які були здобуті для районів Передкарпаття та Закарпаття.

Основна ідея цієї методики полягає у проведенні просторового дослідження поверхні за допомогою спектрального аналізу, здійснюваного послідовним зсувом квадратної аналітичної рамки по всій досліджуваній зоні.

Біля кожної точки цифрової моделі висот виконується розрахунок 2D дискретного Фур'є-перетворення періодограми у вікні, розташованому так, щоб дана точка була його центром.

У подальшому, значення потужності спектра, видобуті для кожного такого вікна, акумулюються в межах визначеного діапазону просторових частот, який відповідає розмірностям морфологічних елементів, що свідчать про значні зміщення, які були ідентифіковані на попередньому етапі частотного аналізу.

Розрахована величина спектральної потужності фіксується у центральній точці вікна та подається у формі картографічної величини.

Високі показники цієї величини слугують ознаками прояву зсувних форм рельєфу, зокрема горбистості, уступів зсувів, деформованих ділянок та областей стиснення, що типові для глибоко розташованих зсувних процесів у гірських та підгірських зонах Українських Карпат.

Щодо дослідження регіонів Передкарпаття (зокрема, долини річки Прут) та Закарпаття (гірські схили, що охоплюють Рахівський та прилеглі

райони), було застосовано вікно квадратної форми, що складається з 63×63 точок.

З огляду на поточну просторову деталізацію вихідних цифрових масивів висот, такий обсяг охоплює територіальні одиниці площею близько 60–120 квадратних метрів у проєкції на площину, що порівнянно з типовими габаритами морфологічних структур значно виражених зсувних зон у межах Карпат.

Використовуючи цю визначену розмірність операційного вікна, двовимірне Фур'є-перетворення дає можливість цілеспрямовано дослідити 64 рівномірно розташовані просторові періодичності.

При цьому, частотні компоненти, котрі відповідають типовим довжинам хвиль рельєфних утворень, спричинених зсувами, групуються біля центральної зони спектра, що суттєво полегшує їх ідентифікацію та подальшу інтеграцію.

Визначений розмір вікна, що використовується для аналізу, є результатом балансування між потребою у високій спектральній дискретизації, яка потрібна для точного зображення структури рельєфу, та необхідністю підтримувати прийнятну швидкість роботи алгоритму.

Ця стратегія дає змогу впроваджувати віконний 2D DFT для цілеспрямованого виявлення та нанесення на карту глибоких зсувних процесів у нерівних географічних умовах, притаманних Карпатському краю України.

2.4.2. Двовимірне безперервне вейвлет-перетворення (2D CWT)

На противагу до методу Фур'є, вейвлет-аналіз дає змогу одночасно визначати місце розташування спектральних складових як у просторовому вимірі, так і за чинником масштабу.

Це зумовлює його значну корисність для дослідження заплутаних і нерівномірних структур, характерних для гірських і пригірських теренів. З огляду на це, для нанесення на карту просторових закономірностей спектральної енергії, котрі відображають глибокі зсувні явища, у поточному дослідженні безпосередньо залучається двовимірне неперервне вейвлет-перетворення, яке реалізовано згідно з формулою (3).

Стосовно кожного окремого району досліджень, а саме Передкарпаття та Закарпаття, було встановлено межі вейвлет-масштабів.

Ці межі відповідали найменшим і найбільшим просторовим частотам, які є типовими для певної смуги.

Визначення цієї смуги базувалося на аналізі нормалізованих спектрів потужності (посилання на рисунок 7).

Наступні етапи опрацювання проводилися виключно для вейвлет-масштабів, виражених цілими числами, у межах окресленого інтервалу.

Такий підхід забезпечив охоплення значущих просторових частот, водночас оптимізуючи обчислювальні ресурси.

Процедура виконання двовимірного неперервного вейвлет-перетворення полягає у покроковому обчисленні вейвлет-складових у кожній точці сітки цифрової моделі висот для усього спектру вибраних масштабів.

Далі, обчислені коефіцієнти підносяться до квадрату й агрегуються у суму по усіх масштабах для кожної точки, формуючи, таким чином, зведену характеристику локальної енергії спектра.

Візуалізація цього результату відбувається у формі картографічного зображення, де більші чисельні значення вказують на фрагменти поверхні, що мають морфологічні прояви, асоційовані з глибинними зсувними процесами.

Значні величини накопиченої вейвлет-потужності слугують показниками зміненої (деформованої) рельєфної конфігурації.

Це охоплює, серед іншого, явище хвилястості мікрорельєфу, наявність системи уступів, сильно порізаних вершин хребтів та областей, що переживають стиснення, — ознаки, зазвичай притаманні масам зсувів у межах Українських Карпат.

З огляду на те, що метод 2D CWT, на противагу 2D DFT, що використовує фіксоване просторове вікно, вимагав подальшого пом'якшення отриманих вейвлет-аналізом результатів.

Це було досягнуто через просторове усереднення в межах квадратної рамки розміром 63 на 63 точки.

Таке впорядкування дало змогу сформувати зображення, зіставні з тими, що виходять після застосування віконного аналізу Фур'є, концентруючи увагу на великомасштабних тенденціях минулих нестабільностей схилів, а не на дрібномасштабних шумах.

Коли 2D CWT комбінується з просторовим усередненням, це дає змогу надійно та послідовно відображати на картах глибинні зсувні процеси у складних географічних ландшафтах Передкарпаття та Закарпаття, слугуючи гарним доповненням до даних, здобутих за допомогою віконного перетворення Фур'є.

2.5. Оптимізація вихідних результатів алгоритму

Найпростіше перетворити масиви значень, здобуті з алгоритмів, викладених у підрозділах 2.4.1 та 2.4.2, на карту поширення глибинних зсувів, застосувавши порогову класифікацію до вузлів цифрової моделі рельєфу.

За цією методикою, кожную точку моделі відносять до зони зсуву, якщо акумульована спектральна потужність у ній є вищою за встановлену межу, або ж вважають її стабільною (недеформованою) поверхнею в усіх інших випадках.

Цей підхід не має на меті чітко окреслити межі окремих зсувів, особливо там, де зсувні утворення прилягають одне до одного або накладаються.

Натомість, кінцевим продуктом є просторовий розподіл точок, які демонструють топографічні ознаки, характерні для глибоко розташованих зсувних явищ у межах досліджуваної ділянки.

Карти, сформовані із застосуванням визначеного порогового рівня, потім слугують основою для зіставлення з незалежними даними про зсуви, зібраними шляхом геоморфологічного аналізу та обробки детальних цифрових моделей висот.

Подібне зіставлення дає змогу чисельно визначити, наскільки автоматично отримані дані узгоджуються з реальними просторовими контурами зсувних структур.

Найкращі показники для кожної зони дослідження відбираються шляхом зведення до мінімуму сумарного показника неточності.

Цей показник бере до уваги як випадки, коли зсуви залишаються непоміченими, так і ситуації, коли стабільні ділянки хибно приймаються за активні зсувні процеси.

Встановлені порогові рівні гарантують оптимальне балансування між здатністю виявляти приховані зсувні явища та точністю визначення статусу ландшафту.

Сукупний індекс похибки, позначений як \$EE\$, складається з частки елементів, класифікованих невірно, відносно загальної кількості елементів на дослідженій території, і його розрахунок здійснюється за такою формулою:

$$E = \frac{FP + FN}{TP + TN + FP + FN}$$

де

- TP (*true positives*) — кількість вузлів, правильно класифікованих як зсувні;
- TN (*true negatives*) — кількість вузлів, правильно класифікованих як стабільні;
- FP (*false positives*) — кількість вузлів, помилково віднесених до зсувних, хоча вони належать до стабільної поверхні;
- FN (*false negatives*) — кількість вузлів, помилково класифікованих як стабільні, хоча вони належать до зсувних ділянок.

Для врахування сумарної площі зсувних тіл, що залягають на значній глибині, які були виявлені або через інвентаризаційне картування, або за допомогою спеціалізованих алгоритмів, застосовується операція геометричного об'єднання.

Натомість, геометричний перетин відображає територію тих ділянок, які існуючи картографічні дані, що фіксують глибокі зсуви, та результати автоматизованих обчислень класифікують одночасно.

Для кожної вхідної множини даних у межах окремої досліджуваної зони розраховується показник загальної похибки E у широкому спектрі граничних умов.

Виходячи з найнижчого отриманого значення індексу E , підбирається найкраща карта розповсюдження зсувів, згенерована алгоритмічним шляхом, що відповідає відповідному пороговому рівню спектральної енергії.

В оптимізаційні процеси не включаються ті точки цифрової моделі висот, для яких немає первинних даних, а також точки, розташовані на акваторіях, з метою запобігання викривленню оцінок достовірності.

3. Результати дослідження

3.1. Карти зсувів

Набори даних, які постали після втілення у життя розроблених підходів на кшталт 2D DFT та 2D CWT, застосованих до певних географічних регіонів, виразно ілюструють, як змінюється у просторі потужність спектра, що корелює із загальною довжиною хвиль, властивою для глибинних структур зсувів.

Здобуті висновки чітко розмежовують різні форми рельєфу на значних площах, даючи змогу ідентифікувати ділянки, що несуть сліди давньої зсувної динаміки (подивитись на рисунки 8А, Б та 9А, Б).

Спектральні карти потужності, отримані обома випробуваними методами, демонструють спільність у головних просторових тенденціях, при цьому фіксуючи відмінності, які впливають із природи частотних характеристик, виокремлених кожним із підходів.

Області, де потужність спектра сягає вищих значень, корелюють із місцевостями, що характеризуються випукло-увігнутим рельєфом, наявністю ступінчастих утворень та деформаційних структур, що є типовою ознакою для потужних зсувних порушень, залягаючих на значних глибинах у межах територій Прикарпаття та Закарпаття.

Карти, виконані у теплих тонах, візуалізують райони, де топографічні показники є більш вираженими, що властиво зміщенням рельєфу, які мають значну глибину залягання.

Водночас, червоною штриховкою виділено ті сектори, які віднесені до зсувних, ґрунтуючись на застосуванні оптимальних критичних рівнів частотної потужності, перелічених у Таблиці 1.

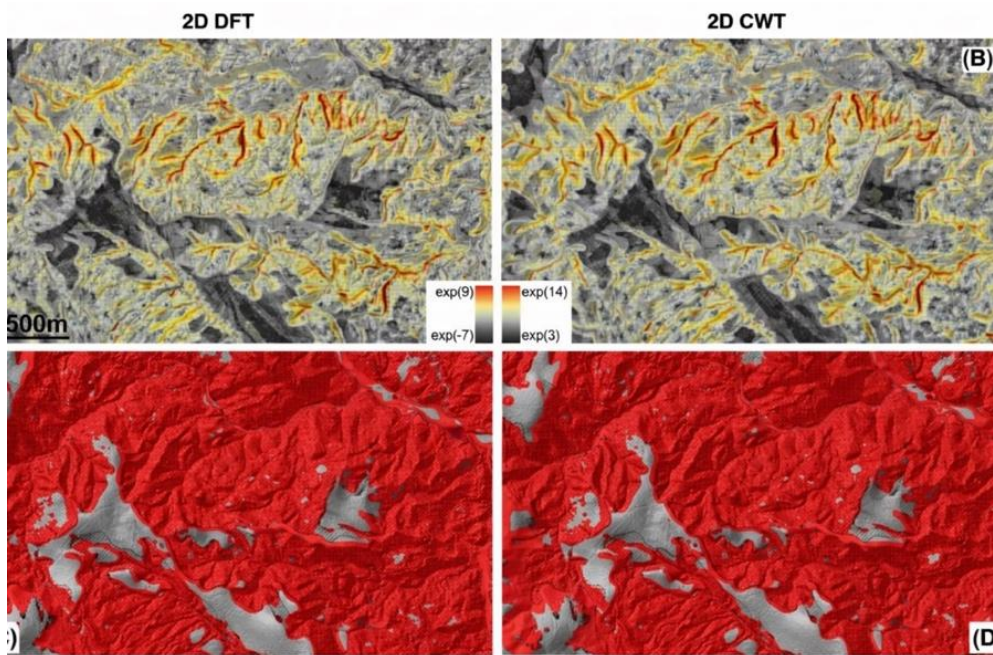


Рисунок 8. Суми спектральної потужності для Передкарпаття

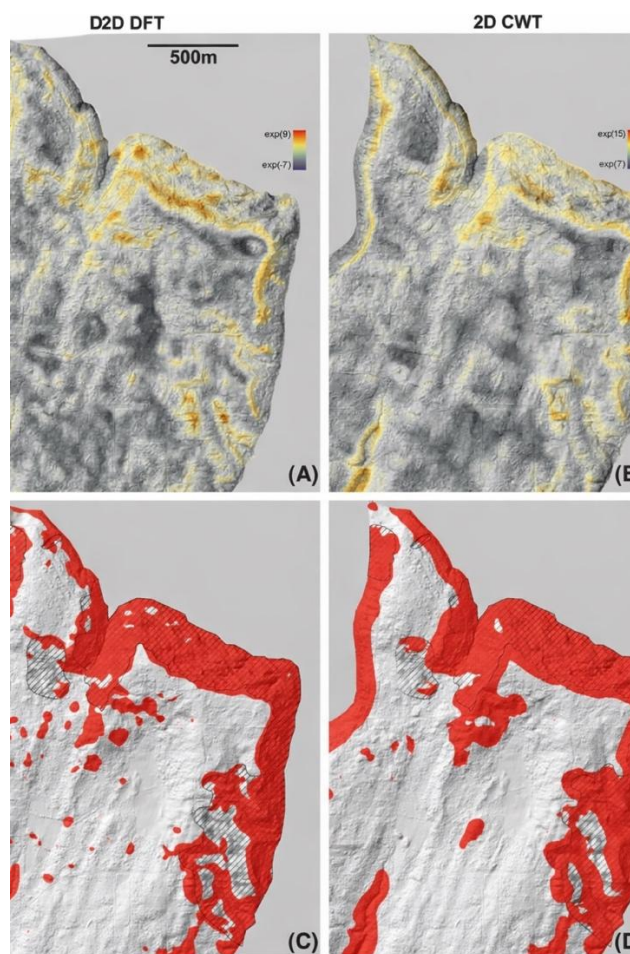


Рисунок 9 Суми спектральної потужності для Закарпаття

Таблиця 1 Порівняння карт зсувів, згенерованих алгоритмом та незалежно складених у кожній досліджуваній області.

Показник	Досліджувальна територія		
Граничне значення	2D DFT	2.86	1.88
	2D CWT	2.6×10^5	1.7×10^5
Індекс похибки	2D DFT	0.84	0.57
	2D CWT	0.86	0.55
Частка правильних класифікацій, %	2D DFT	88.8	87.1
	2D CWT	86.1	87.8
Правильно класифікована площа зсувів, км ²	2D DFT	3.9	21.8
	2D CWT	4.2	22.6
Правильно класифікована стабільна площа, км ²	2D DFT	152.8	163.2
	2D CWT	147.7	163.2
Помилково класифікована площа зсувів, км ²	2D DFT	2.9	9.9
	2D CWT	2.5	8.7
Помилково класифікована стабільна площа, км ²	2D DFT	16.9	17.6
	2D CWT	22.0	17.1
Загальна проаналізована площа, км ²	2D DFT	176.4	212.5
	2D CWT	176.4	211.1

Кarti, що були створені окремо, які відображають глибокі зсувні структури, позначені чорною штрихувальною лінією на фінальних даних.

Такий підхід дає змогу візуально визначити, наскільки просторово збігаються ці незалежні дані з тими результатами, що були обчислені автоматично.

Щодо значень сумарної спектральної потужності в межах кожного окремо взятого регіону дослідження, вони варіюються у межах кількох порядків величини.

Це, своєю чергою, вказує на помітну варіативність у морфологічному вигляді рельєфу.

У межах дослідженого діапазону просторових частот (напр. рис. 7), поверхні, що мають помірно рівну структуру, характеризуються невисокими показниками спектральної потужності.

На противагу цьому, області зі значною неоднорідністю мікрорельєфу в тому ж частотному діапазоні свідчать про високі величини спектральної потужності.

Як правило, саме ці зони корелюють із нанесеними на карту глибокими структурами зсувів, що, своєю чергою, засвідчує доцільність застосування сумарної спектральної потужності як показника для ідентифікації таких об'єктів.

Для п'яти територій, що були об'єктом дослідження, оптимальні граничні показники сумарної спектральної потужності встановлювалися шляхом зведення до мінімуму сукупного показника помилки.

Застосування цього методу дає змогу класифікувати автоматично приблизно 82 % площі території як правильну відповідність по відношенню до незалежно складених картам зсувів (див. Таблицю 1).

Як зображено на Рис. 10, залежність кривих, що відображають динаміку індексу помилки, спільно з найкращими пороговими значеннями, зафіксованими у Таблиці 1, підкреслює вплив просторових параметрів та деталізації вхідних даних на кінцеві результати.

Це, своєю чергою, безпосередньо відбивається на рівнях граничної спектральної потужності, які є типовими для ландшафтів, схильних до зсувів.

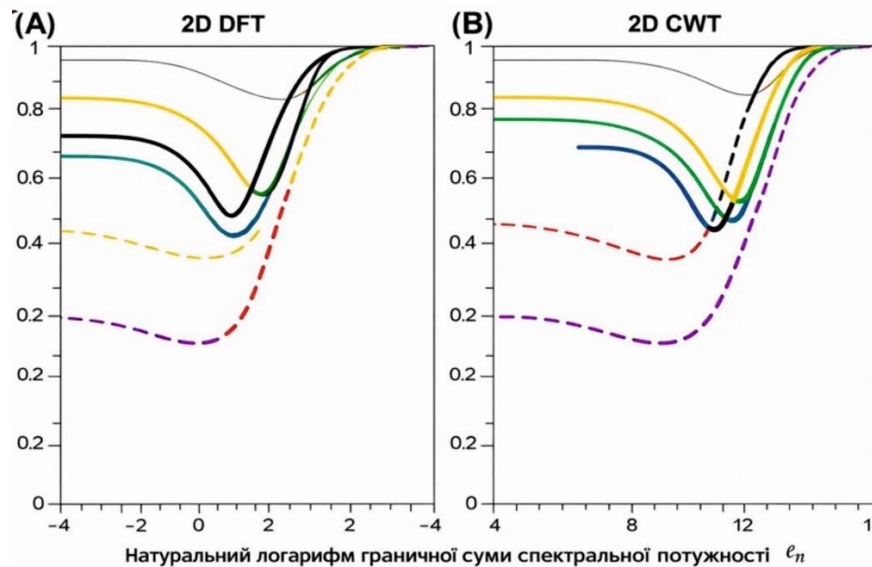


Рисунок 10. Криві індексу помилок

Оптимальні критерії потужності спектру, які слід застосовувати для кожної зони Передкарпаття та Закарпаття, чітко окреслені точками найменшого значення на графіках сукупного індексу помилки, представлених на малюнку 10.

Саме при цих значеннях досягається найкращий баланс між точністю виявлення глибоких зсувів та зменшенням кількості хибних класифікацій.

Якщо ми рухаємося по кривій індексу помилки вліво від цієї мінімальної точки, ми бачимо різке збільшення числа стабільних елементів рельєфу, які помилково приймаються за схили, що рухаються.

Як наслідок, загальний показник помилки E утримується на високому рівні.

Справа від точки мінімуму спостерігається зміна у динаміці: піднесення порогового рівня спричиняє таке, що великий відсоток зсувних структур починають відносити до сталого рельєфу, що знову ж таки веде до підвищення показника E .

Якщо розглядати ділянки поблизу значень порогу, що дають найкращий результат, то для Карпатського гірського масиву криві індексу

помилки демонструють значно нижчі значення, аніж для територій передгір'я та рівнинних зон Передкарпаття.

Причиною цього є той факт, що у гірських регіонах площа, охоплена глибоко розташованими зсувними процесами, є відчутно більшою, тоді як у передгірських місцевостях деформації зсувного характеру охоплюють лише певну, обмежену частину загальної поверхні.

Шляхом визначення такого граничного значення потужності спектру, котреведе до мінімуму поправочний коефіцієнт, досягається можливість відтворення чітких та змістовних схем розповсюдження зсувних явищ (дивись малюнки 8–10).

Крім того, це забезпечує правильне віднесення більшості ділянок земної поверхні у межах вивчених територій до відповідних категорій, що, у свою чергу, підтверджується числовими даними, представленими у таблиці 1.

Знайдені найкращі граничні показники демонструють подібність у регіонах із близькими геоморфологічними ознаками, але зазвичай їхні кількісні величини є вищими для зон, де охоплення аналізу є ширшим.

Причиною цього є той факт, що на обширних просторах домінує усталений ландшафт, який, тим не менш, здатний включати поодинокі форми рельєфу, чиї просторові періоди близькі до тих, що властиві зсувним процесам.

Збільшення верхньої межі потужності спектра дозволяє скоротити число нерухомих точок, які хибно відносяться до зсувних, проте це не здатне повністю ліквідувати всі закономірні помилки.

Конкретно кажучи, алгоритми мають тенденцію помилково вважати значні перепади рельєфу чи сильно викривлені ділянки ознаками суттєвих, глибоких зсувних процесів.

У межах Передкарпаття й Закарпаття до категорії таких об'єктів потрапляють тісні долинні улоговини, що розділяють зсувні блоки, глибоко

прорізані балки (ярні системи), межі стрімких схилів, де не спостерігається активного масового зміщення, а також певні лінійні елементи, створені людиною, як-от шляхи сполучення та терасовані поверхні.

Подібні різкі морфологічні риси спричиняють зростання потужності спектра у результатах Фур'є-аналізу, адже для адекватного зображення стрімких варіацій висот вимагається залучення гармонік із значною амплітудою.

Подібно до цього, вейвлет-перетворення, застосовуючи функцію вейвлета, також концентрує увагу на ділянках зі значною зміною нахилу рельєфу, що в окремих випадках може спричинити хибне спрацювання системи.

Ще однією суттєвою складністю є варіативність у часі формування та інтенсивності зсувних процесів.

Значна частина старих зсувів на територіях, що підлягають дослідженню, була помітно згладжена з плином часу через повільне переміщення ґрунтових мас (дифузійні процеси) та процеси руйнування схилів (денудація).

Як наслідок, амплітуда топографічних нерівностей зменшується, а енергія сигналу зміщується до низьких частот (довші хвилі), що робить автоматичне розпізнавання цих об'єктів значно складнішим.

Окрім того, перетворення ландшафтів, спричинене людською діяльністю — забудова, будівництво шляхів, осушувальні та видобувні роботи — спричинило часткове або абсолютне стирання видових характеристик зсувів, особливо у підгірських регіонах.

За таких обставин розрахункові методи можуть давати заниження чи зовсім не фіксувати зони зсувів, навіть якщо вони значаться у наявних реєстраційних даних.

Беручи до уваги згадані застереження, висновки дослідження досить вагомо підтверджують, що методи автоматизованого складання карт зсувів,

які базуються на спектральному аналізі, являють собою дієвий засіб для оцінки зсувних ризиків на рівні регіонів Передкарпаття й Закарпаття.

На рисунку 7 представлено нормовані спектральні криві, які виразно демонструють типові хвильові довжини, притаманні зсувним утворенням у межах аналогічних геологічних та геоморфологічних основ.

Загальна потужність спектральна у вказаних діапазонах дає змогу чисельно визначити особливості рельєфу глибоко розташованих зсувних утворень у кожній точці цифрової моделі висот і формує міцну базу для нанесення на карту ділянок, де раніше спостерігалася нестійкість схилів.

3.2. Карта домінантних довжин хвиль

Окрім вивчення загальних просторових закономірностей, запропонована методика дає можливість здійснити детальне дослідження топографічної будови рельєфу на рівні окремих точок через створення карти з домінуючими довжинами хвиль.

Ця карта дає змогу чисельно визначити ті морфологічні риси на місцевому рівні, які зумовлені процесами зсувів, що залягають на значній глибині.

Щоб побудувати карту домінантних довжин хвиль для кожної з областей дослідження — Передкарпаття та Закарпаття — вейвлет-коефіцієнти розраховуються для всього діапазону вейвлет-масштабів, які охоплюють характерний діапазон просторових частот, притаманних зсувному рельєфу, згідно з формулою (3).

Наступним кроком, для кожного рівня масштабу, обчислюється середнє арифметичне вейвлет-коефіцієнтів у межах усього простору дослідження, яке слугує орієнтиром для приведення до спільного знаменника.

Після цього зважені вейвлет-коефіцієнти приводять до єдиного стандарту, ділячи на це обчислене середнє значення, що відповідає певному масштабу.

Далі, для кожної точки цифрового рельєфу встановлюється такий масштаб, у якому відповідний нормований вейвлет-коефіцієнт набуває найбільшого значення.

Саме цей масштаб і вважається ключовим, що визначає головну хвильову довжину, яка описує місцеві особливості рельєфу у цій конкретній позиції.

Складені карти, що відображають домінантні довжини хвиль, дають змогу візуально розмежувати території з відмінними особливостями деформації земної поверхні.

Вони є надзвичайно цінними для детального вивчення внутрішньої структури зсувних масивів, зокрема для чіткого розрізнення зон, де відбуваються процеси розтягування, суттєвого зсуву чи ж компресії.

На рисунку 11 продемонстровано зразок просторового розміщення домінантних довжин хвиль для зсувів, нанесених на карту в межах однієї з профільних територій у Карпатах.

Це чудово ілюструє потужний потенціал цього методу для глибокого дослідження морфологічних деталей зсувного ландшафту.

Значні коливання у довжинах хвиль, що домінують у межах глибоко залягаючих тіл зсувів, красномовно свідчать про розбіжності як у механізмах, що керують самим зсувним зміщенням, так і у геологічних формах, що його супроводжують.

Для переважної більшості зсувних утворень, що наразі є активними у Передкарпатті й Закарпатті, типовим є домінування довжин хвиль у межах, приблизно від 11 до 50 метрів; це узгоджується з частотним діапазоном, який було виокремлено за допомогою аналізу нормалізованих вейвлет-спектрів як характерний.

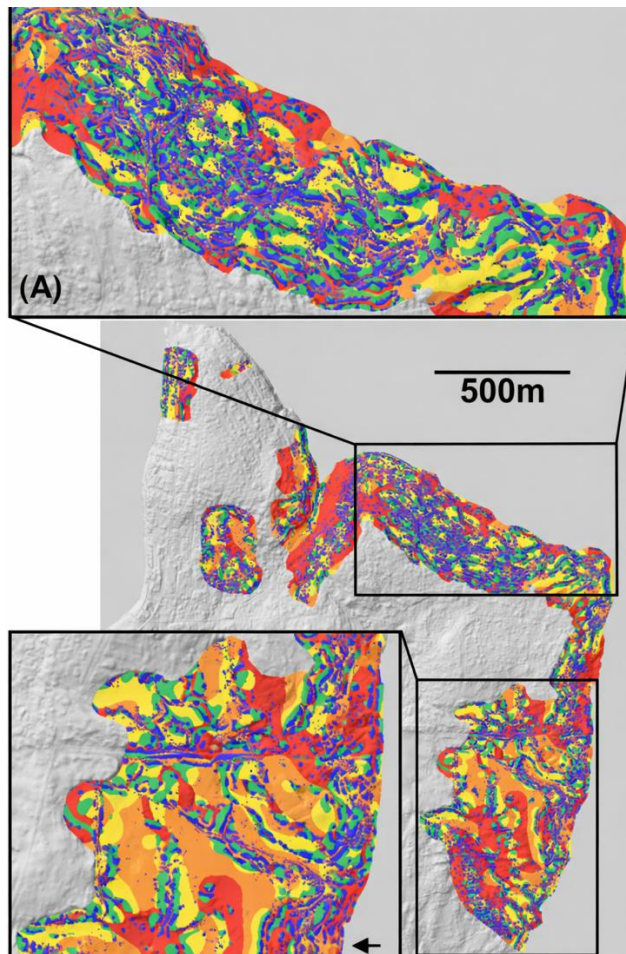


Рисунок 11. Карта домінантних довжин хвиль для зсувів у досліджуваній зоні.

Тільки невелике число точок у межах зсувних ділянок виявляє переважання або надзвичайно коротких, або ж, навпаки, занадто довгих хвиль.

Ця закономірність підтверджує загальну спрямованість глибоко залягаючих зсувів на зміщення енергії спектра у бік середніх довжин хвиль, що звичайне для зсувного ландшафту цього рівня.

Схожий спектральний профіль може вказувати на те, що глибоко посаджені зсуви активізувалися досить нещодавно, тому їхні зовнішні форми ще не встигли значно пом'якшитися, або ж це результат повторних рухів, які стабільно зберігають специфічні топографічні ознаки зсуву тривалий час.

На ділянках, що походять від старих, реліктових зсувів, розподіл головних довжин хвиль є набагато більш рівномірним.

Це свідчить про плавне зміщення від активного зсувного режиму до домінування процесів, пов'язаних з геоморфологічними вторинними змінами.

Конкретно, ґрунт, що переноситься шляхом дифузії, спричиняє згладжування невеликих, короткохвильових виразів рельєфу, залишаючи лише значні, довгохвильові контури, які фіксують загальну форму давніх зсувних масивів.

Проте, окремі зони, де відбулося часткове відновлення активності, є винятками, оскільки у їхньому спектральному відбитку знову стають помітними зсувні елементи.

Окрім того, на Карпатських високогір'ях значної ваги набувають процеси, пов'язані з діяльністю річок, котрі розсікають зсувні накопичення по руслах ерозії, створюючи простір, орієнтований у вигляді видовжених смуг.

Нерідко ці смуги демонструють спрямованість, котра істотно відрізняється від сучасного нахилу схилів чи найнижчих точок водотоку, що може свідчити або про головний напрямок річкового розчленування, або про внутрішню блоковість зсувного масиву, зумовлену діяльністю нерівномірних ерозійних впливів.

Отож, цей графік домінантних довжин хвиль дає змогу не просто виявити усталені зсувні явища, але й зрозуміти етапи їхнього формування, рівень руйнування та те, як вони взаємодіють із тими зовнішніми силами, що діють зараз.

Це має неабияке значення, коли йдеться про заплутані гірські терени в межах Передкарпаття та Закарпаття.

Висновки

Мапи зсувних явищ слугують цінним багажем даних для наукової розробки, територіального облаштування та контролю за стихійними лихами, проте їхнє формування традиційно вимагає значного обсягу часу та сильно спирається на суб'єктивну оцінку фахівців.

Останні досягнення у сфері аеролазерного сканування, а також посилення доступності детальних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) надають свіжі перспективи для більш неупередженого й автоматизованого вивчення схилової нестійкості, особливо у важкодоступних гірських регіонах України, зокрема на Передкарпатті й Закарпатті.

Проте, використання DEM LiDAR-даних із метровою точністю для оцінки зсувних процесів у межах територій регіонального охоплення залишається питанням, що потребує ґрунтовнішого вивчення.

У межах цього дослідження ми використали два підходи до аналізу сигналів: двовимірне дискретне перетворення Фур'є (2D DFT) та двовимірне неперервне вейвлет-перетворення (2D CWT).

Ці методи дають змогу здобути кількісну характеристику морфологічних ознак глибинних зсувів, спираючись на детальні топографічні дані, а також проаналізувати варіації цих ознак у просторі.

Вивчення отриманих спектрів потужності дозволило нам ідентифікувати типові діапазони хвиль, які є типовими для зсувного рельєфу в межах Карпатського регіону.

Оцінка потужності спектра в межах визначених діапазонів дає змогу визначити силу топографічного сліду глибоких зсувів у кожній точці Цифрової Моделі Висоти (ЦМВ).

Проводячи просторовий аналіз сумарної спектральної потужності, було можливо виявити виразні схеми попередньої нестійкості схилів на

ділянках, що охоплюють площу від кількох десятків до сотень квадратних кілометрів.

З метою валідації запропонованого підходу, результати, отримані автоматизованим картуванням, порівнювалися з іншими, окремо підготовленими реєстрами зсувних явищ.

Найкращі межі для значень спектральної потужності були встановлені через зменшення показника помилки класифікації.

За наявності вичерпних даних інвентаризації, методи 2D DFT та 2D SWT продемонстрували здатність вірно ідентифікувати приблизно 82% площі обстежуваних зон у середньому, що вказує на їхню значну корисність для аналізу ризиків зсувів у регіональному масштабі.

Отримані дані засвідчують, що хоча автоматизовані методи аналізу спектрів не можуть повністю замінити традиційне геоморфологічне картування, вони спроможні помітно підвищити неупередженість дослідження та прискорити процес формування кадастрів зсувів, особливо коли йдеться про обширні та важкодоступні регіони.

Окрім того, у цьому дослідженні було створено карту провідних довжин хвиль, яка дає можливість проаналізувати кореляцію між формою зсувів та геоморфологічними процесами, що їх зумовлюють.

Просторові відмінності в основних довжинах хвиль у межах глибинних зсувів свідчать про те, що такі структури зазвичай акумулюють енергію спектра у середньому діапазоні масштабів.

Це, у свою чергу, вказує на блокову організацію зсувних мас та типові геометричні параметри елементів рельєфу, що зазнали деформації.

Тим часом, ґрунтові дифузійні процеси транспортування спричиняють зсув енергії спектра у напрямку до довших хвиль, а річкова (флювіальна) ерозія, своєю чергою, продовжує розчленовувати поверхні зсувних тіл, які вже неактивні або є давніми, у ширших територіальних межах.

Сукупність цих чинників формує вибагливу спектральну картину зсувних утворень у гірських регіонах України.

У підсумку, діаграми, що відображають домінуючі довжини хвиль, постають як багатообіцяюче знаряддя для аналізу морфологічних ознак різних геодинамічних явищ у різноманітному просторовому охопленні, а також мають перспективи бути застосованими у сфері інженерної геодезії, нагляду за станом схилів та визначення ризиків зсувів.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

4. Суханов С. М., Третьак К. Р., Перій С. С. Використання цифрових моделей рельєфу для аналізу небезпечних геодинамічних процесів у Карпатському регіоні // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2020. – № 2(40). – С. 112–119.

5. Третьак К. Р., Смірнов В. М., Перій С. С. Застосування LiDAR-технологій для моніторингу зсувних процесів у гірських районах України // *Геодинаміка*. – 2021. – Т. 30. – С. 56–65.

6. Тароллі П. Топографія високої роздільної здатності для розуміння процесів на поверхні Землі: можливості та виклики // *Геоморфологія*. – 2014. – Том 216. – С. 295–312.

7. Джабойєдофф М., Оппікофер Т., Абеллан А., Деррон М.-Х., Лойє А., Мецгер Р., Педрацціні А. Використання лідару в дослідженнях зсувів: огляд // *Стихійні лиха*. – 2012. – Том 61(1). – С. 5–28.

8. Гленн Н. Ф., Стрейткер Д. Р., Чедвік Д. Дж., Текрей Г. Д., Дорш С. Дж. Аналіз топографічної інформації, отриманої за допомогою лідару, для

характеристики та диференціації морфології та активності зсувів // Геоморфологія. – 2006. – Том 73(1–2). – С. 131–148.

9. Razak K. A., Straatsma M. W., van Westen C. J., Malet J.-P., de Jong S. M. Аеролазерне сканування характеристики лісових зсувів: якість та візуалізація моделі місцевості // Геоморфологія. – 2011. – Том 126(1–2). – С. 186–200.

10. Schulz W. H. Схильність до зсувів, виявлена за допомогою зображень LIDAR та історичних записів, Сіетл, Вашингтон // Інженерна геологія. – 2007. – Том 89(1–2). – С. 67–87.

11. Booth A. M., Roering J. J., Perron J. T. Автоматизоване картографування зсувів з використанням спектрального аналізу та топографічних даних високої роздільної здатності // Геоморфологія. – 2009. – Том 109(3–4). – С. 132–147.

12. Ардіццоне Ф., Кардиналі М., Галлі М., Гуццетті Ф., Райхенбах П. Ідентифікація та картографування нещодавніх зсувів, спричинених опадами, з використанням даних про висоту, зібраних за допомогою аеродинамічного лідара // Природні небезпеки та науки про земні системи. – 2007. – Том 7. – С. 637–650.

13. Хенгль Т., Ройтер Х. І. Геоморфометрія: концепції, програмне забезпечення, застосування. – Амстердам: Elsevier, 2009. – 772 с.

14. Еванс І. С. Загальна геоморфометрія, похідні висоти та описова статистика // Просторовий аналіз у геоморфології. – Лондон: Methuen, 1972. – С. 17–90.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Застосування спектрального аналізу для дослідження зсувних процесів у гірських районах України на основі LiDAR та цифрового аналізу рельєфу »

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)