

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

Трищ Мар'ян Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Застосування цифрового аналізу рельєфу та дистанційного зондування для
підвищення ефективності інвентаризації земельних ресурсів України

(назва роботи)

Землеустрій та кадастр

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

д.г.н., проф. Приходько Микола Миколайович

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

м. Івано – Франківськ

2025р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітній рівень магістр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

« ____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Трищ Мар'ян Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Застосування цифрового аналізу рельєфу та дистанційного зондування для підвищення ефективності інвентаризації земельних ресурсів України

Керівник роботи д.г.н., проф. Приходько Микола Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від " __ " _____ 2025 року №__

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики, матеріали польових досліджень

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Національна структура екологічних одиниць у системі кадастрового картографування України

Цифрове картографування ґрунтів

Цифровий аналіз рельєфу в контексті прогностичного картографування

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3	Приходько М.М.		

7.Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Національна структура екологічних одиниць у системі кадастрового картографування України		
2	Цифрове картографування ґрунтів		
3	Цифровий аналіз рельєфу в контексті прогностного картографування		

Студент _____
(підпис)

Трищ М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

Приходько М.М.

Анотація

У цій магістерській дисертації детально досліджені новітні методики обліку земельних активів, які передбачають застосування цифрового моделювання поверхні та засобів дистанційного спостереження за Землею.

Значимість обраної проблематики полягає в нагальній потребі підвищення прецизійності, швидкості реакції та рентабельності процедур реєстрації й вартісної оцінки земельних ділянок у контексті загальної системи землевпорядкування.

Основне завдання представленого дослідження полягає у вдосконаленні механізму проведення земельної інвентаризації через об'єднання інформації з цифрових моделей висот (ЦМВ) і зображень, отриманих із супутників, у єдину геоінформаційну систему для автоматизованої оцінки просторових характеристик місцевості.

В межах цієї роботи проведено ґрунтовний розгляд потенціалу, який надає цифровий аналіз рельєфу для чіткого визначення морфологічних складових ландшафту, що безпосередньо впливають на форму та поточний стан ґрунтового покриву.

Проаналізовано методи застосування даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з метою окреслення кордонів екологічних об'єктів, розрахунку масштабів деградації земельного покриву та актуалізації картографічних даних.

Представлено концепцію інтегрування геоінформаційних систем (ГІС), геоморфометричних параметрів і результатів дистанційного спостереження для розробки сучасної, повної бази даних про земельні фонди.

Практична цінність виконаної роботи полягає у формулюванні науково підтвердженого алгоритму, який може бути впроваджений

установами, що займаються управлінням земельними ресурсами та картографуванням, задля збільшення продуктивності заходів з планування землекористування, оновлення кадастрових реєстрів та виконання екологічного нагляду.

Ключові слова: інвентаризація земельних ресурсів, цифровий аналіз рельєфу, дистанційне зондування, ГІС, цифрова модель рельєфу, екологічні одиниці, прогнозне картографування.

Abstract

This master's thesis examines in detail the latest methods of accounting for land assets, which involve the use of digital surface modeling and remote sensing of the Earth.

The significance of the chosen issue lies in the urgent need to increase the precision, speed of response and profitability of procedures for registering and valuing land plots in the context of the general land management system.

The main objective of the presented study is to improve the mechanism for conducting land inventory by combining information from digital elevation models (DEMs) and images obtained from satellites into a single geographic information system for automated assessment of spatial characteristics of the area.

Within the framework of this work, a thorough consideration of the potential provided by digital terrain analysis for a clear definition of morphological components of the landscape that directly affect the shape and current state of the soil cover has been carried out.

Methods of using remote sensing data (RS) for the purpose of delineating the boundaries of ecological objects, calculating the scale of land cover degradation and updating cartographic data are analyzed.

The concept of integrating geographic information systems (GIS), geomorphometric parameters and remote sensing results for the development of a modern, complete database on land funds is presented.

The practical value of the work performed lies in the formulation of a scientifically proven algorithm that can be implemented by institutions involved in land management and mapping to increase the productivity of land use planning activities, updating cadastral registers and carrying out environmental supervision.

Keywords: land resource inventory, digital terrain analysis, remote sensing, GIS, digital terrain model, ecological units, predictive mapping.

ЗМІСТ

Вступ

1 Національна структура екологічних одиниць у системі кадастрового картографування України

2. Цифрове картографування ґрунтів

2.1. Сутність і значення цифрового картографування ґрунтів

2.2 Статистичні підходи до цифрового картографування ґрунтів (DSM) в умовах України

2.2. Експертні підходи до цифрового картографування ґрунтів (DSM)

2.2.1. Загальна характеристика

2.3 Прогнозне картографування екосистем (PEM)

2.3.1 Статистичні підходи у прогнозному картографуванні екосистем (PEM)

2.4 Експертно-знальні підходи у прогнозному картографуванні екосистем (PEM)

3. Цифровий аналіз рельєфу в контексті прогнозного картографування

3.1 Помилки цифрових моделей рельєфу (DEM)

3.2 Візуальний огляд

3.3 Фільтрація

3.4 Стохастичне моделювання та кількісна оцінка невизначеності DEM

3.5 Вплив розміру вікна пошуку на точність топографічних атрибутів

3.6 Вибір алгоритмів для обчислення топографічних атрибутів

3.7 Масштабність топографічних атрибутів у прогнозному картографуванні екосистем

3.8 Вплив роздільної здатності DEM на точність топографічного аналізу

3.9 Вплив розміру вікна аналізу на точність обчислення топографічних атрибутів

3.10 Алгоритмічні підходи до обчислення топографічних атрибутів

3.11 Програмне забезпечення для обчислення топографічних атрибутів

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Проведення кадастрової інвентаризації об'єктів в Україні має надважливе значення як один із головних механізмів раціонального розпорядження земельними фондами та здійснення екологічного нагляду.

Головне завдання цього процесу полягає у впорядкуванні, типізації та графічному відображенні різновидів екологічних земельних угідь, дотримуючись уніфікованих норм у рамках національної кадастрової системи.

Завдяки такому методу формується надійна інформаційна платформа, необхідна для оцінювання, стратегічного планування, адміністрування та контролю за землекористуванням, першочергово на ділянках, відведених під лісові масиви, природоохоронні зони та агрокультурні ландшафти.

Географічне представлення кадастрових об'єктів слугує базисом для поділу місцевості на регулярно повторювані екологічні елементи.

Кожен з таких елементів вирізняється своїми унікальними природними особливостями, економічним потенціалом і рівнем впливу людської діяльності.

Класичні підходи до визначення й нанесення на мапи природних комплексів ґрунтуються на ретельних натурних дослідженнях, зборі зразків ґрунту, оцінці рослинного покриву та аналізі рельєфних даних, отриманих за допомогою аерофотознімків.

Проте, такі способи потребують багато часу, значних фінансових вкладень, характеризуються певною мірою суб'єктивності та обмежені в можливостях охоплення великих територій.

Ось чому в Україні, подібно до розвинених країн, спостерігається збільшення об'єктивної необхідності впровадження економічно вигідних і

повторюваних технологій для автоматизації процесів обліку, використовуючи при цьому сучасні комп'ютерні засоби, методи статистики та географічні інформаційні системи (ГІС).

Прогнозне картографування екосистем (ПКЕ), по-особливному, має ключове значення; воно інтегрує напрацювання класичних природничих дисциплін (як-от екологія, ґрунтознавство, геологія та геоморфологія) з передовими методами геоморфометрії, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та інформаційних технологій.

Значний акцент робиться на створенні власних геоінформаційних інструментів (ГІС) для проведення аналізу, спрямованого на ідентифікацію та систематизацію кадастрових одиниць.

Зокрема, цей процес передбачає залучення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та супутникових знімків із високою деталізацією.

У гірських областях України, як-от Карпати та Кримські гори, топографія відіграє ключову роль у встановленні границь екологічних зон.

Натомість, для рівнинних ландшафтів і лісостепів (Полісся, Поділля, Лівобережна Україна) більш виправданим є застосування напівавтоматичних комп'ютерних методів, пристосованих до територій, де перепади висот є мінімальними.

З огляду на актуальні напрямки розвитку землевпорядкування, в Україні виникає необхідність у розробці оновлених версій автоматизованих процедур для розмежування кадастрових одиниць, які б враховували рельєфні та структурні особливості місцевих ландшафтів.

Використання подібних методик сприятиме верифікації (підтвердженню) даних екологічних карт, раціоналізації обліку (інвентаризації) земельних ресурсів, а також забезпеченню більш ґрунтовної бази для прийняття рішень щодо управління землею.

У нашій роботі досліджуються теоретичні та методологічні основи прогностичної картографії екологічних об'єктів, цифрового аналізу форм земної поверхні й дистанційного зондування.

Значний акцент зроблено на застосуванні цифрових моделей висот на практиці для формування кадастрових інформаційних фондів та забезпечення більш ефективного обліку земельних фондів на теренах України.

1 Національна структура екологічних одиниць у системі кадастрового картографування України

Загальнонаціональна багаторівнева класифікація природних одиниць в Україні забезпечує науковий і методологічний каркас для відображення кадастрових об'єктів та природних територіальних ансамблів на картах у діапазоні від місцевого до обласного та державного рівнів (Таблиця 1).

Таблиця 1 – Ієрархічна структура екологічних одиниць у системі кадастрового картографування України

Рівень	Тип екологічної одиниці	Орієнтовний масштаб картографування	Основні характеристики та приклади використання
Національний	Природно-ландшафтна зона, біокліматичний регіон	1:1 000 000 – 1:2 000 000	Відображає великі природні комплекси (лісова, лісостепова, степова зони, Карпатський та Кримський гірські регіони); використовується для стратегічного планування землекористування, екологічного районування та державного кадастрового моніторингу.
Регіональний	Ландшафтний округ, підзона або геоморфологічна область	1:200 000 – 1:500 000	Визначає природно-географічну структуру області або регіону (наприклад, Передкарпатський ландшафтний округ, Поліський район). Використовується при розробленні схем землеустрою, регіональних екологічних програм.
Субрегіональний	Ландшафтний район або природно-господарський район	1:50 000 – 1:100 000	Відображає поєднання типів рельєфу, ґрунтів і рослинності; застосовується для кадастрового оцінювання земель, агролісомеліорації, екологічної експертизи.
Локальний	Тип земель (LT)	1:10 000 – 1:25 000	Описує морфологічно однорідні ділянки з подібними ґрунтовими, геологічними та гідрологічними умовами; використовується для класифікації земельних ділянок, кадастрового обліку, проектування сівозмін.
Детальний (підлокальний)	Фаза типу земель (LTP)	1:2 000 – 1:5 000	Відображає мікрорізноманітність території: локальні варіації мікрорельєфу, вологості, складу порід, типів рослинності; використовується для детальної інвентаризації земель, моніторингу деградації ґрунтів, планування природоохоронних заходів.

У межах українських кордонів цю багаторівневу систему можна вбудувати до Національної геоінформаційної інфраструктури (НГІІ), поєднавши її з інформацією з Державного земельного кадастру (ДЗК), Кадастру лісів, а також із Системою відстеження стану навколишнього середовища.

Застосування методу Прогнозованого картографування екосистем (ПКЕ) у комбінації з комп'ютерним моделюванням топографії та аерокосмічною зйомкою гарантує, що як природні формування, так і зареєстровані кадастрові об'єкти будуть відображені узгоджено на будь-якому рівні деталізації.

Запропонований ієрархічний поділ на екологічні блоки може стати частиною поточної системи землеупорядкування та національного кадастру України через зведення інформаційних шарів із різною глибиною деталізації.

Цей метод гарантує гармонійне просторове відображення як природних, так і економічних елементів, що сприяє посиленню аналітичних можливостей кадастрової інформації та підвищенню результативності управлінських кроків.

На державному й територіальному рівнях створюються фундаментальні рівні ландшафтної класифікації й екологічного розмежування, що синхронізуються з природно-кліматичною сегментацією території України.

Ця інформація об'єднується в Національній геоінформаційній інфраструктурі (НГІІ), надаючи уніфіковану систему прив'язки та описових даних для всіх рівнів деталізації.

На рівні місцевості в межах системи Державного земельного кадастру (ДЗК) є можливість розробки допоміжних ГІС-шарів, що

відображають категорії земельних угідь (LT) та стадії розвитку категорій земельних угідь (LTP).

Формування цих елементів базується на висновках, отриманих внаслідок цифрового аналізу особливостей рельєфу (таких морфометричних даних, як висота, кут нахилу, орієнтація, ступінь викривлення), а також за рахунок інформації, здобутої дистанційним зондуванням (зокрема, індекси NDVI, NDWI, SAVI та подібні).

Зазначені параметри відіграють роль допоміжних змінних (коваріат) під час створення прогностичних моделей для визначення границь екологічних зон, що сприяє автоматизації процедури розподілу територій за класами.

Сформовані інформаційні рівні LT та LTP можуть бути інтегровані з межами земельних ділянок, занесених до кадастру, функціонуючи як додаткові характеристики, що описують природний стан, вид ґрунту, ймовірний рівень врожайності або ступінь чутливості ділянки до екологічних загроз.

Подібне об'єднання дасть змогу втілити просторово-часовий метод ведення кадастрового обліку, при якому дані про природні умови напряду визначатимуть процеси планування використання земель, їхню вартісну оцінку та заходи із забезпечення екологічної стійкості.

Також, структуру LT/LTP можна застосовувати для:

- створення загальнодержавної інформаційної системи екологічних класифікацій земельних ділянок,
- спостереження за процесами погіршення стану ґрунтів (вітрова та водна ерозія, виснаження, накопичення солей),
- досягнення найкращого екологічного балансу в сільськогосподарських угіддях,
- прогнозування впливу кліматичних змін на земельні активи.

Отже, впровадження багаторівневої системи екологічних одиниць у кадастрову діяльність України сприятиме зростанню точності, універсальності та поліпшенню аналітичної взаємодії геопросторових даних, що є ключовою передумовою для прогресу в сфері електронного землеустрою та національної системи контролю за станом довкілля.

Така методика дає можливість уніфікувати підходи до характеристики природних особливостей та методів використання земель, що є принципово важливим елементом сучасних систем землевпорядкування та екологічного нагляду.

На рівні окремих територій, що відповідає розмірам земельних ділянок (кадастрові одиниці, ландшафтні елементи), ключова увага зосереджується на двох ієрархічних щаблях екологічних класифікаційних одиниць — земельних типах (LT) та фазах земельних типів (LTP).

Основні критерії їхньої диференціації базуються на комбінації локальних геоморфологічних, геологічних, едафічних та біологічних чинників, серед яких тип материнської породи, конфігурація рельєфу, якісні показники ґрунтового покриву та наявна (або потенційна) природна флора.

Першочергове значення в контексті просторового аналізу мають ґрунтовий покрив та рослинний світ, оскільки саме ці компоненти зумовлюють господарську цінність та екологічну рівновагу земель.

В українських реаліях ідентифікація різних видів землекористування та їхніх стадій у межах конкретних кадастрових одиниць є проблематичною.

Це пояснюється тим, що жоден із наявних масштабних інформаційних ресурсів — чи то аерозйомка, чи супутникові дані, чи цифрові моделі висот (ЦМВ) — сам по собі не здатен охопити повноту необхідних просторових ознак.

Крім того, зовнішні прояви рослинного покриву, зафіксовані на зображеннях, не завжди є адекватним відображенням імовірного природного стану (ІПС) флори.

Це пов'язано з тим, що спостережувані рослинні угруповання (фітоценози) постійно підпадають під вплив сільськогосподарської активності, зазнають наслідків зміни клімату або проходять стадії деградації.

Ба більше, якість зображень – навіть новітніх аерофотоматеріалів – нерідко виявляється заниженою для ідентифікації дрібних біологічних об'єктів чи різних рівнів рослинності, що є типовими для мозаїчних територій України.

Це стосується, приміром, Карпат, Поліської низовини або ж Подільських Товтр.

З огляду на це, актуальна кадастрово-екологічна методологія встановлення ліній розділу між різними категоріями земельних угідь (LT) та їхніх підтипів (LTP) спирається на інтеграцію різномірної інформації.

Сюди включено: результати натурних досліджень, дані ґрунтових аналізів, цифрові моделі висот, а також низку допоміжних чинників довкілля (перепад висот, орієнтація схилів, ступінь природного осушення, геологічна структура, індекси NDVI та інше).

Виникнення ґрунтів, селекція та закріплення рослинного покриву базуються на сукупності природних складових — кліматичних умов, біологічному різноманітті, особливостях рельєфу, походження материнської породи та часовій тривалості геоморфологічних процесів.

Ці засади слугують фундаментом для більшості національних та глобальних систем екологічної класифікації земельних угідь.

Поміж усіх чинників, саме ландшафтна архітектура та кількісні параметри рельєфу (морфометрія) є вирішальними для відокремлення

екологічних зон на місцевому рівні, оскільки вони регулюють гідрологічний, енергетичний та речовинний обмін у межах території.

Топографія визначає шляхи відведення води, обсяги накопичення вологи, розподіл сонячного опромінення, а також спричиняє температурні та мікрокліматичні варіації, що мають прямий вплив на структуру ґрунтового шару і динаміку формування рослинних асоціацій.

Багато наукових робіт українських та іноземних фахівців підтверджують ці кореляції, демонструючи, що геометрія форм земної поверхні (такі параметри як її висота, кут нахилу, орієнтація, ступінь викривлення, показник затінення) слугують надійними показниками для побудови моделей, що визначають границі екологічних блоків.

Отже, методологія прогностичного екосистемного картографування (РЕМ) у поєднанні з цифровою обробкою даних про рельєф надає Україні нові шляхи для вдосконалення точності земельно-кадастрових карт.

Застосування прогресивних інструментів ГІС, аеро- та супутникового знімання, а також методів геоморфометричного аналізу дозволяє не лише скоротити фінансові витрати та час, потрібний для виконання робіт, але й гарантує можливість повторного відтворення, незалежність від суб'єктивних факторів та внутрішню логічну злагоженість підсумків інвентаризації.

Водночас, ця методологія узагальнює дані з різних сфер — екологічної науки, геологічної розвідки, досліджень ґрунту, геоморфологічних процесів, ботанічних студій, інформаційних технологій та статистичного аналізу.

Це створює всеохопну платформу для розробки національної цифрової системи екологічного обліку.

Згодом, таке об'єднання може сформувати осердя для впровадження української Концепції національної геоінформаційної інфраструктури, що, своєю чергою, гарантуватиме узгодженість та єдині

стандарти даних у сфері землевпорядкування, охорони довкілля та використання природних багатств.

2. Цифрове картографування ґрунтів

2.1. Сутність і значення цифрового картографування ґрунтів

Методологічні засади Прогнозного Екосистемного Картографування (ПЕК) мають глибокий зв'язок зі сферою Цифрового Ґрунтового Картографування (Digital Soil Mapping — ЦҐК), що інколи іменується Прогнозним Ґрунтовим Моделюванням.

ЦҐК являє собою пріоритетний напрямок сучасної геоінформатики, оскільки надає можливість чисельно оцінювати просторові відмінності характеристик ґрунту, використовуючи цифрові бази даних та математичні методи моделювання.

За загально визнаним формулюванням, ЦҐК — це процес створення числової або статистичної моделі, яка описує кореляцію між параметрами навколишнього середовища та специфікою ґрунту, а потім застосування цієї моделі до геопросторової основи даних для отримання прогнозної картографічної продукції.

Іншими словами, цифрове ґрунтове картографування надає можливість прогнозувати просторове розміщення різновидів або характеристик ґрунтів, застосовуючи аналітичні підходи та залучаючи вхідні інформаційні шари, що описують ландшафт, флору, погодні умови, геологічну структуру й інші фактори.

Цей підхід (ЦҐК) послуговується геопросторовими обчисленнями, географічними інформаційними системами (ГІС), даними дистанційного

моніторингу Землі (ДЗЗ) та статистичним моделюванням, що уможливило генерацію просторово цілісних цифрових карт ґрунтового покриву.

Сфера виникла внаслідок багаторічних напрацювань у ділянках ґрунтознавства, просторової статистики та екологічного моделювання, проте найактивніший розвиток відбувається останнім часом завдяки вдосконаленню комп'ютерних систем, доступності високодеталізованих супутникових знімків та прогресу в методах машинного навчання.

Протягом останніх десяти років цифрова методологія картографування ґрунтового покриву пережила значну еволюцію.

Цей стрибок уперед стався завдяки низці взаємопов'язаних чинників:

- Значно ширший доступ до цифрових моделей висот (ЦМВ) із високою деталізацією, що отримуються за допомогою технологій LiDAR, аерофотозйомки безпілотними авіаційними комплексами (БАК) або супутникових систем (як-от Sentinel, WorldView, Pleiades);
- Активне впровадження індексів, що відображають стан рослинного покриву та зволоженість (NDVI, NDWI, SAVI), які надають можливість опосередковано оцінювати характеристики ґрунтових масивів;
- Удосконалення геопросторових статистичних підходів (зокрема, кригінгу, методів регресійного моделювання, алгоритмів Random Forest та Gradient Boosting, а також нейронних мереж), що гарантують високу точність передбачення просторових кореляцій;
- Формування публічно доступних інформаційних систем та інфраструктур геопросторових даних про ґрунти (наприклад, SoilGrids, ISRIC, GlobalSoilMap, Служба моніторингу земельного покриву Copernicus);

- Загальна доступність провідних програмних рішень (QGIS, SAGA GIS, ArcGIS Pro, R, Python), які спрощують процедури обробки, аналізу та графічного представлення зібраних ґрунтових даних.

За рахунок сукупності цих чинників, ЦМГ (Цифрове моделювання ґрунтів) поступово еволюціонує з науково-дослідної площини до повноцінної виробничої фази використання, перетворюючись на ключовий інструмент для реалізації державного нагляду за земельними ресурсами, проведення агрохімічних випробувань, ведення лісового кадастру та оцінювання екологічного стану цілих регіонів.

Вже тепер в межах України такі інноваційні методики знаходять своє застосування у тестових (пілотних) ініціативах, що спрямовані на створення карт деградованих земельних ділянок, ідентифікацію потенційної загрози ерозії та поділ ґрунтів на зони відповідно до рівня їхньої родючості.

З огляду на специфіку первинних даних, що застосовуються, та обраних методик їхнього опрацювання, цифрова картографія ґрунтового покриття класифікується за двома головними напрямками:

1. Методики ЦМГ, що базуються на статистичному аналізі
2. Методики ЦМГ, що ґрунтуються на експертних оцінках фахівців

Важливо відзначити, що обидва вказані підходи є взаємозв'язаними й ефективно доповнюють один одного.

2.2 Статистичні підходи до цифрового картографування ґрунтів (DSM) в умовах України

Методології статистики, які використовуються в цифровому ґрунтовому картографуванні (ЦГК), сконцентровані на просторовому

прогнозуванні розташування ґрунтових різновидів чи їхніх атрибутів, шляхом створення числових та статистичних алгоритмів.

Ці алгоритми інтегрують зібрані під час польових робіт вимірювання з цифровими просторовими наборами даних.

Подібні моделі дають можливість точно виміряти зв'язки між властивостями ґрунту (як-от: розміри частинок, вміст вологи, органічна речовина, рівень рН тощо) та екологічними чинниками, які впливають на їхній розвиток, а саме: особливості ландшафту (рельєфу), кліматичні умови, геологічна структура, флора та способи використання землі.

В рамках ЦГК ці статистичні конструкції прикладаються до цифрових масивів даних, які є просторово безперервними, що забезпечує можливість передбачення розподілу ґрунтів по всій площі, що є об'єктом дослідження.

На теренах України це набуває особливої значущості у контексті актуалізації ґрунтових картосхем у масштабах від 1:10 000 до 1:100 000, адже класичні підходи до польового картування тут вимагають надмірних часових і фінансових витрат.

Ключовими шарами-передвісниками для статистичних моделей цифрового ґрунтового картографування слугують властивості рельєфу, виведені з цифрових моделей висот (ЦМВ): кут нахилу, азимут схилу, ступінь викривлення, показник насиченості вологою, рівень сонячної радіації, а також інформація, отримана шляхом дистанційного зондування Землі — індекси вегетації (NDVI, EVI), індекси вологості (NDWI), температурні дані поверхні (LST), геологічні картографічні дані, кліматичні показники та результати хімічного аналізу сільськогосподарських угідь.

У сучасному веденні земельного кадастру та землевпорядних робіт в Україні застосовуються статистичні підходи цифрового ґрунтового

картографування (ЦГК), що базуються на таких ключових алгоритмах і моделях: геостатистика (включно з методами просторової інтерполяції, такими як кригінг, а також вдосконаленими варіаціями типу регресійного кригінгу та коваріаційного аналізу); різноманітні форми регресійного моделювання (багатоваріантний аналіз, логістичні моделі, а також локальна поліноміальна регресія LOESS); методологія класифікації та регресійних дерев (зокрема, алгоритм CART); ансамблеві методи машинного навчання, такі як випадкові ліси (Random Forest) та алгоритми градієнтного бустингу (як-от XGBoost, LightGBM); архітектури нейронних мереж і технології глибокого навчання; а також генетичні алгоритми та інші інструменти для розв'язання оптимізаційних задач.

Ключова перевага статистично-орієнтованих методів ЦГК полягає в їхній незалежності від необхідності мати вичерпні попередні знання щодо природи функціональної залежності між показниками ґрунту та атрибутами навколишнього середовища.

За умови наявності великого обсягу високоякісних референтних матеріалів (як-от, результатів аналізів ґрунту з конкретних ділянок або агрохімічних вимірювань), статистичні алгоритми можуть автоматично ідентифікувати, які із шарів-предикторів є найбільш значущими для точного передбачення певних властивостей ґрунту.

Це набуває особливої важливості для України, оскільки тут у багатьох областях (включно з Карпатським регіоном, Поліською низовиною та Лівобережним Лісостепом) ґрунтові дослідження є або неповними, або просто неактуальними через давність.

Використання сучасних цифрових статистичних інструментів уможливорює ліквідацію цих інформаційних “білих плям” та генерацію сучасних, деталізованих карт ґрунтового покриття на високій просторовій роздільній здатності.

Тим часом, результативність статистичного моделювання прямо пропорційна доступності якісних, репрезентативних польових даних.

Якщо бракує достатньої кількості точкових вимірювань, навіть найбільш довершені алгоритми машинного навчання можуть генерувати висновки з дуже високим ступенем непевності.

Через це, в контексті українських реалій, оптимальним є комбінування статистичних методик ЦМГ (Цифрового Моделювання Ґрунтів) із залученням експертних суджень, даних польових досліджень та поглибленого геоecологічного аналізу.

У цілому, імплементація статистичних методологій ЦМГ в Україні відкриває такі ключові можливості: модернізація національної інформаційної бази даних про ґрунти та її синхронізація з даними Державного земельного кадастру; передбачення процесів деградації та всебічна оцінка потенціалу родючості земельних ресурсів; суттєве підвищення точності розрахунків кадастрової вартості аграрних площ; розробка складних цифрових екологічних моделей використання землі, які інтегрують інформацію про ґрунтові характеристики, кліматичні показники та біотичні елементи.

Отже, цифрове моделювання ґрунтів на основі статистичних методів — це не просто академічна дисципліна; це фундаментальна практична складова загальної системи цифрового управління земельними ресурсами в Україні, що прямо впливає на оптимізацію використання природних багатств, гарантування екологічної стійкості та забезпечення довготривалого розвитку регіонів.

Таблиця 2 – Характеристика основних статистичних методів цифрового картографування ґрунтів (DSM)

Метод	Суть методу	Переваги	Обмеження	Приклади застосування в Україні
Лінійна та	Побудова	Простота,	Не враховує	Аналіз родючості

множинна регресія	залежності між властивостями ґрунтів і факторами середовища.	інтерпретованість.	нелінійні зв'язки.	чорноземів Лісостепу.
Регресійний кригінг	Поєднання регресійної моделі з геостатистичним інтерполюванням залишків.	Висока точність, урахування просторової автокореляції.	Високі обчислювальні витрати.	Картографування кислотності ґрунтів Полісся.
CART	Побудова дерев рішень для класифікації типів ґрунтів.	Інтерпретованість, нечутливість до шуму.	Може переобучатися.	Прогнозування типів ґрунтів Поділля.
Random Forest	Ансамблевий метод на основі випадкових дерев рішень.	Висока точність, автоматичний відбір предикторів.	Потребує великого обсягу даних.	Моделювання родючості ґрунтів Західної України.
Нейронні мережі	Моделювання нелінійних зв'язків між факторами середовища.	Потужність при складних закономірностях.	Великі вимоги до обчислень.	Моделювання органічного вуглецю в ґрунтах Карпат.
Генетичні алгоритми	Оптимізація параметрів моделей DSM.	Глобальний пошук рішень.	Висока складність і потреба в калібруванні.	Оптимізація предикторів для ерозійних моделей.
Методи глибокого навчання	Використання багатoshарових нейронних мереж (CNN, LSTM).	Висока точність, виявлення прихованих закономірностей.	Високі вимоги до ресурсів.	Автоматичне розпізнавання типів ґрунтів Sentinel-2.

У царині землевпорядкування та кадастрової діяльності в Україні, найбільш затребуваними техніками для цифрового моделювання місцевості (DMS) є метод Random Forest, регресійний кригінг та CART.

Це зумовлено тим, що вони найкраще поєднують високу точність, прозорість результатів (інтерпретованість) та гнучкість адаптації до широкого спектру природно-ландшафтних умов.

Коли мова йде про гірські масиви Карпат і Криму, де рельєф відрізняється значною складністю, перевагу слід віддавати нейронним мережам та підходам на основі глибокого навчання, оскільки вони демонструють високу продуктивність при обробці таких складних топографічних даних.

Натомість, для рівнинних регіонів більш підходящими є геостатистичні моделі, як-от регресійний кригінг, які гарантують надійність результатів навіть при обмеженому обсязі вхідної інформації.

2.2. Експертні підходи до цифрового картографування ґрунтів (DSM)

2.2.1. Загальна характеристика

Методи цифрового ґрунтового картографування (ЦГК), що використовують експертні знання, спираються на польову мудрість та накопичений досвід фахівців-ґрунтознавців, трансформуючи їх у набір евристичних алгоритмів або прогностичних моделей.

Ці моделі здатні передбачати різновиди ґрунтів або їхні характеристики, використовуючи при цьому допоміжні просторові інформаційні ресурси.

Подібні системи відтворюють хід мислення фахівця, який, працюючи безпосередньо в полі, розрізняє ґрунтові різновиди, опираючись на морфологічні особливості, геоморфологічну обстановку та екологічні індикатори.

На противагу чисто статистичним підходам, експертні системи інтегрують якісні уявлення про ґрунтоутворювальні процеси, надаючи можливість структуровано оформити професійний досвід спеціалістів у форматі чітких логічних інструкцій.

Головний "плюс" цих комплексів — їх автономність від значних масивів інформації, зібраної "в полі" чи у пробірках лабораторії. Це стає критичним фактором для територій України, де моніторинг або відбувався асинхронно, або ж останні заміри датуються далеким минулим (як-от гірські райони Карпат, болотисте Полісся чи посушливі південні степові зони).

Функціональна архітектура експертних комплексів імітує усталену методику традиційного ґрунтового картографування на місцевості.

Однак, замість ручного оперування, ці системи використовують багат шарові цифрові дані: цифрові моделі висот (DTM), структурні

геологічні схеми, космічні фотознімки, а також похідні індекси, що відображають густоту рослинного покриву та показники зволоженості.

Ключове завдання, яке вони виконують, — це трансформація когнітивних процесів, які відбуваються у свідомості висококваліфікованого ґрунтознавця, в послідовний алгоритмічний код.

Це дає змогу з високою точністю передбачати конкретні класи ґрунтів чи їхні характеристики практично для будь-якої географічної локації в межах аналізованої ділянки.

Використання нечіткої логіки – це один із ключових векторів еволюції експертних систем, особливо корисний для моделювання динамічного характеру ґрунтового покриву.

Такий підхід дозволяє ідентифікувати будь-яку ділянку території як таку, що належить не до одного, а одночасно до кількох категорій ґрунтів, приписуючи кожній категорії певний ступінь ймовірності.

Яскравим прикладом була система SoLIM (Модель логічного висновку про ґрунти та землі), що стала піонером серед експертних рішень, які базуються на нечіткій логіці.

Вона продемонструвала відмінну точність у передбаченні класифікації ґрунтів і має значні перспективи для інтеграції у повсякденні робочі процеси.

Експертні системи для цифрового картографування ґрунтів (DSM) традиційно поділяються на дві основні категорії: системи, які використовують логіку, засновану на правилах (Rule-Based Reasoning, або RBR), та системи, що застосовують міркування на основі прецедентів (Case-Based Reasoning, або CBR).

1. Експертні системи, що спираються на набір правил (РСП), застосовують підхід «якщо – то» для встановлення кореляцій між параметрами довкілля та різновидами ґрунтового покриву.

Зокрема: У випадку, коли крутизна схилу коливається в межах 5–15%, а геологічною основою є лес, ймовірним є формування опідзоленого чорнозему.

РСП виходять з припущення, що доступні прогностичні дані (абсолютна висота, кут нахилу, орієнтація схилу, геологічна структура, індекс NDVI та інше) достатньо повно відображають весь спектр факторів, які фахівець-грунтознавець бере до уваги при безпосередньому описі ґрунтів у природних умовах.

Успішність цієї методології напряду залежить від точності формулювання логічних конструкцій та глибини фахових знань експерта.

2. Системи, що функціонують на базі прецедентів (СБП), оперують ідентифікацією референтних площ, для яких точно встановлено різновиди ґрунту.

Дана система здійснює порівняльний аналіз подібності між цими еталонними зонами та іншими ділянками, формуючи у результаті прогностичне картографічне зображення.

Цей метод інтегрує компоненти як експертного методу, так і статистичного моделювання.

Незважаючи на можливість незалежного застосування RBR та СБП, максимальна ефективність досягається за допомогою гібридних систем, що об'єднують переваги обох методологій.

В якості ілюстрації варто згадати програмний комплекс Soil Inference Engine (SIE) — це цілісна система, де об'єднано експертні знання та алгоритми машинного навчання задля формування максимально точних карт ґрунтового покриву.

В контексті реалій України, подібні рішення здатні ефективно адаптуватися для цілей прогнозування різновидів ґрунтів у гірських масивах Карпат і на території Криму, забезпечувати виявлення ділянок із високим ризиком ерозії у регіонах лісостепу, точно встановлювати зони,

уражені процесами засолення та деградації ґрунтового шару на південних територіях степу, а також проводити деталізацію границь між групами земель, призначених для агровиробництва, використовуючи дані цифрових моделей рельєфу та космічної зйомки.

В Україні, застосування експертних систем у сфері цифрового ґрунтознавства надає можливість високопродуктивно використовувати ті знання, що були акумульовані українськими науковими школами з дослідження ґрунтів.

Це відкриває шлях до передбачення характеристик ґрунтового покриву навіть у тих регіонах, де наявна обмежена кількість фактичних даних.

Такі системи сприяють створенню "розумних" ГІС-додатків, які можуть бути легко інтегровані з існуючими кадастровими реєстрами, а також забезпечують суттєве поліпшення контролю за станом довкілля.

Синтез експертних систем із технологіями статистичного моделювання та алгоритмами машинного навчання започатковує нову спеціалізацію — інтелектуальне електронне картографування ґрунтів.

Ця інноваційна методологія ідеально узгоджується з актуальними векторами розвитку цифрового управління земельними ресурсами на теренах України.

Таблиця 3 – Порівняльна характеристика основних експертних систем DSM

Тип системи	Основний принцип	Переваги	Недоліки	Приклади застосування в Україні
RBR (Rule-Based Reasoning)	Використання набору логічних правил «якщо–тоді».	Не потребує великої кількості польових даних, відображає логіку експерта.	Вимагає глибоких знань ґрунтів, складно формалізувати правила.	Картографування типів ґрунтів у межах лісостепу.
CBR (Case-Based)	Порівняння нових	Адаптивність до	Потребує якісного	Прогнозування

Reasoning)	ділянок із відомими еталонними випадками.	нових умов, поєднання з машинним навчанням.	набору еталонних зразків.	грунтових типів у Карпатах.
SIE (Soil Inference Engine)	Інтеграція правил експертів і статистичного моделювання.	Висока точність, універсальність, можливість автоматизації.	Потребує комплексних даних і значних обчислювальних ресурсів.	Геоінформаційне моделювання деградованих земель у степу.

2.3 Прогнозне картографування екосистем (PEM)

Прогнозне картографування екосистем (ПКЕ) — це комп'ютеризований, геоінформаційний та базований на знаннях підхід, що слугує для поділу ландшафтів на картографічні одиниці, орієнтовані на екологічні критерії.

Фактично, воно полягає у нашаруванні геопросторових тематичних даних (топографія, геологія, ґрунти, рослинний покрив та ін.) та подальшому опрацюванні їхніх характеристик за допомогою автоматизованих програмних систем логічного виведення.

Ці системи використовують формалізовану базу знань про взаємозв'язки екологічних елементів у межах конкретного ландшафту.

Інакше кажучи, підхід PEM полягає в об'єднанні обчислювальних, статистичних та експертних методів оцінювання з метою моделювання екологічних елементів, базуючись на природних правилах взаємодії між рельєфом, кліматичними умовами, ґрунтовим покривом та рослинним світом.

Ця методологія дає змогу створювати картографічні зображення поширення екосистем, враховуючи просторову неоднорідність місцевості та природні динамічні процеси.

У сучасному контексті, PEM можна трактувати ширше як спільне використання комп'ютерних систем і геопросторових технологій для

побудови та застосування статистичних або експертних моделей знань до геопросторової інформації, що стосується ґрунтів, їхнього формування (генезису), будови (морфології) та потенційної природної рослинності (ППР).

На меті стоїть розробка цифрових картографічних матеріалів та класифікаційних систем, які б відображали організацію екологічних елементів у різних ландшафтних умовах — від гірських масивів до рівнин.

Використання методології ПЕМ розширюється на багато сфер — починаючи від вимірювання біологічного розмаїття та продуктивності лісових і сільськогосподарських угідь, і закінчуючи формуванням планів землекористування та екологічним наглядом за територіями.

По своїй природі, методологія ПЕМ має багато спільного з цифровим картографуванням ґрунтів (DSM), особливо в контексті організації інформації, підходів до просторової статистичної обробки та ключових засад моделювання.

Проте, ПЕМ – це комплексніший екологічний підхід, що охоплює не лише ґрунтові характеристики, а й біологічні та кліматичні чинники.

Методологія ПЕМ оперує багатьма геопросторовими наборами даних, що характеризують природні елементи, які впливають на структуру ґрунтів, рослинний покрив та екологічні системи.

Серед найбільш значущих аспектів виділяють:

- характеристики місцевості, виведені з цифрових моделей поверхні та рельєфу (ЦМР, ЦМП): абсолютна висота, крутизна схилів, орієнтація схилів (експозиція), морфологічні особливості та елементи рельєфу, показник зволоженості ґрунту, відносне розташування у межах ландшафту;
- матеріали дистанційного зондування — супутникові зображення, отримані з апаратів Sentinel-2, Landsat, PlanetScope, а також розрахункові індекси (наприклад, NDVI,

NDWI, SAVI), що слугують для оцінки стану рослинного покриву та вмісту вологи;

- геологічна та ґрунтова інформація — карти, які містять відомості про типи материнських порід, гранулометричний склад ґрунту та потужність профілю;
- метеорологічні показники — середньорічні температури, кількість атмосферних опадів, коефіцієнти зволоження, інтенсивність сонячного опромінення;
- картографічні матеріали щодо потенційної природної рослинності (ППР) та реєстри лісового фонду;
- результати безпосередніх польових досліджень — детальний опис екосистемних типів, рослинних асоціацій, а також біотичних індикаторів.

Унаслідок різноманітності просторових характеристик природного середовища, оптимальні прогностичні шари, що добре працюють в одній екосистемі (наприклад, у гірському масиві Карпат), можуть виявитися малопридатними для використання в іншій (наприклад, у рівнинних ландшафтах Полісся).

З огляду на це, моделювання РЕМ завжди вимагає обов'язкового процесу налаштування й адаптації моделі під конкретну територію.

Аналогічно до DSM, моделі РЕМ зазвичай поділяють на дві головні категорії:

1. Статистичні методи, які залучають математичне моделювання, машинне навчання, а також геостатистичні інструменти з метою ідентифікації взаємозв'язків між окремими екологічними параметрами.

2. Експертно-орієнтовані підходи, фундаментом яких є логічні умовиводи, судження фахівців та системи, що оперують нечіткою логікою.

На противагу DSM, у контексті РЕМ експертно-логічні моделі знаходять ширше застосування.

Це зумовлено їхньою здатністю ефективніше відобразити багатогранну сутність екосистем та увібрати значну кількість факторів, що впливають на екологічні взаємодії.

2.3.1 Статистичні підходи у прогностному картографуванні екосистем (РЕМ)

Наукова література містить порівняно небагато робіт, присвячених використанню статистичних підходів у прогностичному екосистемному картографуванні (ПЕК), якщо порівнювати з обсягом досліджень у сфері цифрового ґрунтового моделювання (ЦГМ).

Причиною цього є те, що для формування статистично обґрунтованих моделей потрібен значний масив польової інформації та допоміжних довідкових матеріалів, які часто виявляються фрагментованими чи нерівномірними, а їх акумулювання вимагає суттєвих фінансових та часових витрат.

Тим не менше, певний спектр наукових публікацій підтверджує потенційну цінність статистичних методів у процесі створення екологічних картографічних продуктів.

Зокрема, в деяких наукових проєктах застосовувався багатовимірний дисперсійний аналіз (МАНОВА), що спирався на інформацію з понад 2600 польових точок, для прогнозування потенційної природної рослинності (ППР).

Для моделювання були використані кліматичні дані, топографічні характеристики та зображення Landsat із супутників як вхідні (предикторні) шари, що дало змогу виявити взаємозв'язки між особливостями рельєфу, кліматичними умовами та різноманіттям рослинних угруповань.

Паралельно, в іншій науковій роботі, застосовувався алгоритм нечіткої кластеризації за принципом k-середніх (fuzzy k-means) з метою створення карт топокліматичних регіонів.

Фінальні висновки цієї роботи продемонстрували сильну кореляцію між визначеними кластерами та фактичними типами земного покриття.

Це слугує вагомим підтвердженням того, що топографічні показники є визначальними (ключовими) факторами для прогнозування екологічної ситуації.

До переліку таких характеристик входили:

- абсолютна висота над рівнем моря;
- нахил та азимут схилів;
- кривизна як у поперечному (профільному), так і в горизонтальному (плановому) розрізі;
- відстань до вододільних ліній (тобто хребтів);
- загальна щорічна інсоляція (сонячна радіація);
- індекс топографічної зволоженості (TWI);

Чимало наукових розвідок у сфері геоінформаційних технологій послуговуються методами багатofакторної регресії, деревами ухвалення рішень для класифікації, алгоритмом "Випадковий ліс" (Random Forest) та аналізом головних компонент (PCA).

Мета цього — ідентифікувати екологічні категорії чи формувати системи класифікації, ґрунтуючись на цифрових просторових даних, навіть якщо кінцева мета не полягає у безпосередньому створенні цілісних карт екосистем.

На території України ймовірнісні методи моделювання екосистем (PEM) виглядають надзвичайно багатообіцяючими, особливо у зонах із складним ландшафтом та неоднорідним покритвом землі.

Серед таких територій виокремлюють Українські Карпати, Поділля (Подільську височину), рівнинне Полісся (Поліську низовину), а також Донецьку височину (Донецький кряж).

Багатофакторний статистичний аналіз та його моделі відкривають можливості для:

- Передбачення просторового розміщення імовірних екосистемних угруповань в контексті глобальних кліматичних змін;
- Комплексного об'єднання даних, які стосуються рельєфу, ґрунтового покриву, кліматичних умов та супутникових зображень для визначення природної ємності окремих ділянок;
- Оптимізації підходу до екологічного районування ландшафтних утворень з метою їх використання у сфері землевпорядкування, лісівництва та збереження біорізноманіття;
- Створення інформаційного сховища щодо типів місцезростань (ЛТ, ЛТР), що є необхідною передумовою для їх подальшого обміну та співпраці з Державним земельним кадастром (ДЗК) та існуючими геоінформаційними системами (ГІС) національного рівня.

Найкращими підходами для вітчизняних реалій визнані змішані, тобто статистично-аналітичні методи з долученням фахової оцінки, які включають алгоритми машинного навчання (такі як "Випадковий ліс", SVM чи нейромережі) та знання експертів про конкретні ґрунти й рослинні угруповання на місцях.

Ця комбінація гарантує як високий ступінь достовірності передбачень, так і можливість екологічного тлумачення отриманих даних.

2.4 Експертно-знальні підходи у прогностичному картографуванні екосистем (РЕМ)

Підходи, засновані на знаннях експертів, у прогностичному картографуванні екосистем (ПКЕ) ґрунтуються на систематизації та застосуванні накопиченого досвіду екологів, фахівців з ґрунтів, геоморфологів та ботаніків.

Ці знання трансформуються у формалізовані структури, такі як логічні, евристичні або ймовірнісні правила, що використовуються для класифікації та ідентифікації різноманітних екосистемних типів.

На противагу статистичному моделюванню, яке здебільшого оперує кількісними співвідношеннями між поданими даними, експертні системи моделюють процес прийняття рішень кваліфікованим фахівцем, враховуючи просторові взаємозв'язки, морфологічні особливості та екологічні принципи організації ландшафту.

Подібні методології стають особливо цінними, коли зібрано мінімальну кількість натурних даних, однак є вичерпне якісне тлумачення природної структури, в тому числі пов'язаних з нею особливостей рельєфу, ґрунтового покриву та біологічних взаємин.

На теренах України, де тривалі польові дослідження здебільшого зафіксовані у формі текстових описів (скажімо, геоботанічні схеми, типологія лісових масивів чи земельне ранжування), експертні моделі відкривають шлях до оцифрування накопичених знань для їх подальшого використання у середовищі географічних інформаційних систем.

Стрижнем експертного моделювання РЕМ виступає формалізована логіка розуміння екосистем, яка оформлена як система інструкцій, критеріїв або апарат нечітких функцій членства.

Визначені норми окреслюють, яким чином конкретні топографічні, ґрунтові, кліматичні та вегетаційні характеристики формують різновид екосистеми.

Звичайний припис виглядає таким чином:

За умови, що абсолютна висота становить 200–400 м, схил має нахил 5–10°, орієнтація схилу південно-західна, а нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) перевищує 0,6, то передбачається наявність екосистеми дубово-грабового лісу, що росте на середньо-суглинкових ґрунтах.

Експертні системи, засновані на знаннях, працюють на засадах логіки “умова – наслідок” (ЯКЦО–ТОДІ), застосовуючи комплекс вхідних інформаційних шарів — цифрові моделі місцевості, картографічні матеріали ґрунтів, інформацію, отриману під час дистанційного зондування Землі, геологічні карти, а ще вторинні додаткові індикатори (такі як індекси насиченості вологою, освітленості сонячним промінням, викривлення поверхні тощо).

У контексті РЕМ, активно використовуються системи, що базуються на теорії нечіткої логіки (fuzzy logic).

Це дає можливість кожній окремій просторовій точці бути асоційованою з декількома екологічними категоріями водночас, при цьому ступінь такої приналежності визначається різними рівнями ймовірності.

Такий підхід є критично важливим, особливо коли йдеться про ландшафти, що мають перехідний або мозаїчний характер, оскільки чітке розмежування між екосистемами в таких умовах відсутнє.

Застосування експертних систем у методології РЕМ передбачає їхній поділ на дві основні групи:

1. Висновок на Основі Правил (ВОП) — це програмні комплекси, що функціонують, спираючись на визначені послідовності логічних приписів.

Вони оперують точно визначеними критеріями, які формуються шляхом поєднання вхідних параметрів (особливості рельєфу, орієнтація схилу, вихідні гірські породи, тип рослинного покриву) з метою прогнозування характеру екосистеми.

Подібні підходи є дієвими у місцевостях, де доступні достовірні місцеві дані стосовно кореляцій між ґрунтами та ландшафтними умовами.

2. Метод Міркування на Основі Прецедентів (Case-Based Reasoning, CBR) — це системи, які працюють з чітко визначеними "прецедентами" (еталонними прикладами/ділянками).

Спираючись на наявні зразки екосистем, система аналізує ступінь подібності з іншими ділянками та формує прогноз щодо їхнього екосистемного типу. CBR інтегрує знання експертів та методи машинного навчання, що забезпечує гнучкість підходу й можливість його автоматичного самовдосконалення.

У царині Прогнозної Експертної Моделі (ПЕМ) ми спостерігаємо зростаюче використання гібридних підходів. Ці моделі майстерно поєднують Правила на Базі Знань (ПБЗ), Випадки на Базі Репрезентацій (ВБР) та методики машинного навчання, такі як Випадковий Ліс (*Random Forest*), Дерево Рішень (*Decision Tree*) та Градієнтний Бустинг (*Gradient Boosting*).

Чудовим прикладом такої інтеграції є Система Визначення Властивостей Ґрунту (СВВҐ, або *Soil Inference Engine* – SIE): вона успішно забезпечує функціональний зв'язок між заздалегідь визначеними логічними правилами та повноцінним статистичним аналізом, що виконується автоматизовано.

Серед визначальних плюсів фахових підходів варто виділити такі моменти:

- доступність застосування якісних, нечислових відомостей щодо екологічних кореляцій;

- скорочення потреби в об'ємних масивах інформації, зібраної "в полі";
- значна ступінь зрозумілості результатів — є змога експертно верифікувати, корегувати чи модифікувати модельні побудови;
- адаптивність — здатність пристосовуватися до унікальних природних обставин чи певних географічних зон;
- перспектива формування загальнонаціональних фахових сховищ знань для цілей екологічного картографіювання.

На теренах України подібні системи можуть бути використані з метою:

- розпізнавання екосистемних утворень у Карпатах та Криму на основі їхніх морфометричних характеристик;
- встановлення категорій потенційної природної вегетації (ППВ) в межах лісових масивів і степових просторів;
- проведення екологічних оцінок агроландшафтів у ході земельпорядних робіт;
- забезпечення підтримки рішень менеджменту у площині використання природних ресурсів та захисту ґрунтів.

У не такому вже й віддаленому часі еволюція методів просторово-екологічного моделювання (ПЕМ) на теренах України нерозривно асоціюватиметься з низкою ключових ініціатив:

- Започаткуванням загальнодержавних інформаційних масивів, що містять дані про екологічні кореляції за схемою «земля–топографія–флора»;
- Поєднанням фахових нормативів із напрацюваннями, отриманими через супутникове спостереження (зокрема, з використанням сервісів Sentinel та PlanetScope);

- Застосуванням методології нечіткої логіки та технологій на основі штучного інтелекту для розробки гнучких, самонастроюваних моделей;
- Створення уніфікованої ГІС-платформи ПЕМ, призначеної для інтеграції у функціонал Державного реєстру земельних ділянок та системи природоохоронного моніторингу.

Упровадження експертних систем, що ґрунтуються на знаннях, надасть змогу сполучити академічні надбання з надбаннями цифрової сфери.

Це відкриває простір для розробки потужної інтелектуальної системи, основна мета якої — прогностичне картографування екосистемних комплексів України.

Така система матиме необхідний потенціал для ефективного підтримання процесу ухвалення управлінських рішень на всіх рівнях: загальнодержавному, обласному та місцевому.

3. Цифровий аналіз рельєфу в контексті прогнозного картографування

Комплексний цифровий аналіз земної поверхні, відомий як Digital Terrain Analysis (DTA), являє собою метод кількісного опису характеристик ландшафту. Цей процес ґрунтується на використанні цифрових моделей рельєфу (таких як DEM, DTM, DSM) для обчислення топографічних показників.

До таких атрибутів належать: абсолютна висота, крутизна схилів (ухил), азимут схилу (експозиція), ступінь викривлення поверхні (кривизна), індекс насиченості вологою, а також ідентифікація конкретних географічних об'єктів — елементів рельєфу, ліній вододілів, мережі дренажу та компонентів схилових систем.

По суті, DTA функціонує як практична складова геоморфометрії.

Геоморфометрія, своєю чергою, визначається як наукова дисципліна, спрямована на «кількісне вимірювання топографічних особливостей» та розробку цифрових моделей поверхні планети.

Морфологія рельєфу та його топографічні особливості є критично важливими детермінантами при моделюванні ґрунтового покриву, формуванні екологічних систем та диференціації ареалів рослинних асоціацій, особливо в межах невеликих територій (локальний масштаб).

Топографічні параметри віддзеркалюють просторову структуру ландшафту, визначають режими гідрологічного стоку, рівень поверхневої

енергії, мікрокліматичні характеристики та траєкторії переміщення матеріалів.

Всі ці фактори мають безпосередній вплив на процеси ґрунтоутворення та підтримання біологічного розмаїття.

Топографічні або, іншими словами, морфометричні параметри – це числові показники, які описують форму поверхні землі, розраховані шляхом математичних операцій на базі цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

Їхнє використання не обмежується прямим передбаченням типів ґрунтів та екологічних зон; ці атрибути також використовуються для категоризації різноманітних об'єктів рельєфу та морфологічних складових ландшафту (як-от вододільні лінії, западини, схиліві ділянки, найвищі точки, дна долин та ін.).

Оскільки рельєф виконує роль інтегруючого фактора, який накопичує наслідки впливу інших процесів – кліматичних, водних, геологічних та живих організмів (біотичних), цифрове дослідження рельєфу є фундаментом для створення предиктивних моделей ґрунтів (ПМГ).

Аналітичні роботи демонструють наявність від 30 до 50 ключових топографічних характеристик, однак у розширених системах моделювання їхнє число може перевищувати сотню.

Властивості рельєфу класифікуються на дві категорії:

- Основні характеристики — які виводяться безпосередньо з цифрової моделі рельєфу (ЦМР), включно з висотою, крутизною нахилу, орієнтацією схилу, викривленням поверхні та її азимутом.
- Допоміжні характеристики — що розраховуються на базі комбінації кількох основних параметрів і слугують для опису комплексних фізико-географічних явищ (таких як, наприклад, топографічний індекс зволоженості — TWI, індекс потенційної

ерозійної небезпеки, індекс сонячного освітлення, індекс транспортування осадових порід — STI та ін.).

Їхнє використання знаходить застосування у моделюванні таких аспектів:

- особливостей будови та зовнішнього вигляду ландшафтів;
- динаміки процесів, пов'язаних із поверхневим збігом і збиранням вологи;
- характеристик енергетичного балансу (сонячного опромінення);
- локальних кліматичних умов;
- чинників, що впливають на формування ґрунтів та рослинного світу.

Для цілей прогностичного картування екосистем найсуттєвішими топографічними чинниками зазвичай вважають такі:

- Абсолютна висота (Elevation) — є вирішальним фактором для формування кліматичних умов, температурних режимів і, відповідно, географічного поширення флори.
- Крутизна схилу (Slope) — є ключовою характеристикою, що контролює інтенсивність змиву ґрунту (ерозії), здатність ґрунту поглинати воду (інфільтрацію) та її подальше накопичення.
- Орієнтація схилу (Aspect) — встановлює обсяг отриманої сонячної радіації (інсоляції) та визначає локальні мікрокліматичні особливості.
- Поперечна й поздовжня кривизна поверхні — описує морфологію рельєфу (опуклість, увігнутість, площинність).
- Топографічний індекс зволоженості (TWI) — відображає ймовірність накопичення води та слугує індикатором формування екосистем із високим рівнем вологості.

- Індекс інсоляції (INSOL) — показує кількість енергії сонячного випромінювання, що припадає на одиницю площі схилу.
- Показник відносного розташування в межах ландшафту (Relative Position Index) — індикатор, що використовується для оцінки диференціації екосистем залежно від їхньої позиції по висоті.

Конкретний набір ключових ознак для ПЕМ (прогнозно-емоційного моделювання) безпосередньо зумовлений природно-географічними умовами території, типом місцевості та поставленим дослідницьким завданням.

Наприклад, у гірських місцевостях України (як-от Карпати чи Кримські гори) вирішальними факторами є експозиція схилу, його крутизна і кривизна поверхні, тоді як у низинних районах, скажімо, на Поліссі, більшу значущість мають висота над рівнем моря, індекс зволоженості та особливості мікрорельєфу.

У контексті української практики, цифрове моделювання рельєфу є наріжним каменем сучасних підходів до прогнозного картографування екосистем.

Це слугує за кількісний фундамент для таких цілей:

- зонування територій з екологічної точки зору;
- ідентифікація процесів, пов'язаних зі схилами, та ділянок, де відбувається деградація ґрунту;
- розробка моделей, що описують поширення екосистем, спираючись на морфометричні параметри;
- об'єднання отриманих результатів із відомостями, що надходять від дистанційного зондування, а також із інформацією із кадастрових ГІС-систем.

Подальша розбудова комплексу ДТА в контексті проекту РЕМ дасть змогу сформувати спільну морфометричну платформу для всієї України.

Ця база, своєю чергою, стане ключовим елементом у побудові національної системи цифрового контролю за станом довкілля та просторовим плануванням використання природних ресурсів.

Хоча цифровий аналіз земної поверхні має значний потенціал, реалізація на практиці стикається з низкою труднощів, що позначаються на точності кінцевих даних:

1. Керування хібами цифрової моделі висот (ЦМВ).

Хиби, що постають через якість першоосновних даних (як-от SRTM, LiDAR, фотограмметричні ЦМПВ), здатні істотно вплинути на показники вторинних ознак.

Щоби мінімізувати ці неточності, застосовують просіювання (фільтрування), перекалібрування (перепроєктування) та вирівнювання (згладжування) даних.

2. Обрання розміру аналітичного огляду.

Масштаб задає ступінь деталізації та реактивність моделі на показники мікрорельєфу. На локальному рівні (1:10 000) задіюються значно менші інтервали сітки (1–5 м), в той час як для регіональних досліджень (1:100 000) використовуються спрощені ЦМР з відстанню між точками 30–90 м.

3. Визначення методів розрахунку параметрів.

Програмні продукти, такі як SAGA GIS, GRASS GIS, ArcGIS Pro та QGIS, використовують різноманітні підходи для обчислення нахилів, кривизни та показників зволоженості, що здатне змінити кінцевий результат. Через це критично важливо гарантувати узгодженість методик при проведенні досліджень у різних географічних зонах.

4. Засоби кодування та обчислювальна потужність.

Проведення операцій з цифровими моделями рельєфу (ЦМР) значних за розміром регіонів (наприклад, понад 1000 км²) вимагає наявності високопродуктивних комп'ютерних систем. З цією метою зазвичай застосовуються засоби для автоматизації процесів (такі як Python, R, GDAL, програмний інтерфейс SAGA) або ж хмарні сервіси (зокрема Google Earth Engine, ArcGIS Online).

3.1 Помилки цифрових моделей рельєфу (DEM)

Будь-які цифрові моделі висот (ЦМВ) являють собою схематичне зображення земної поверхні, котре неминує містити певну ступінь неточності.

Причини виникнення цих невідповідностей можуть бути зумовлені як методикою збору первинних відомостей (лідарне сканування, фотограмметричні методи, супутникова інтерферометрія), так і наступними стадіями маніпуляцій, включаючи інтерполювання чи зміну проєкцій.

Наприклад, використання інтерполяції за методом найближчого сусіда призводить до похибок, що стають помітними при аналізі таких характеристик, як затінення рельєфу (Див. малюнок 1).

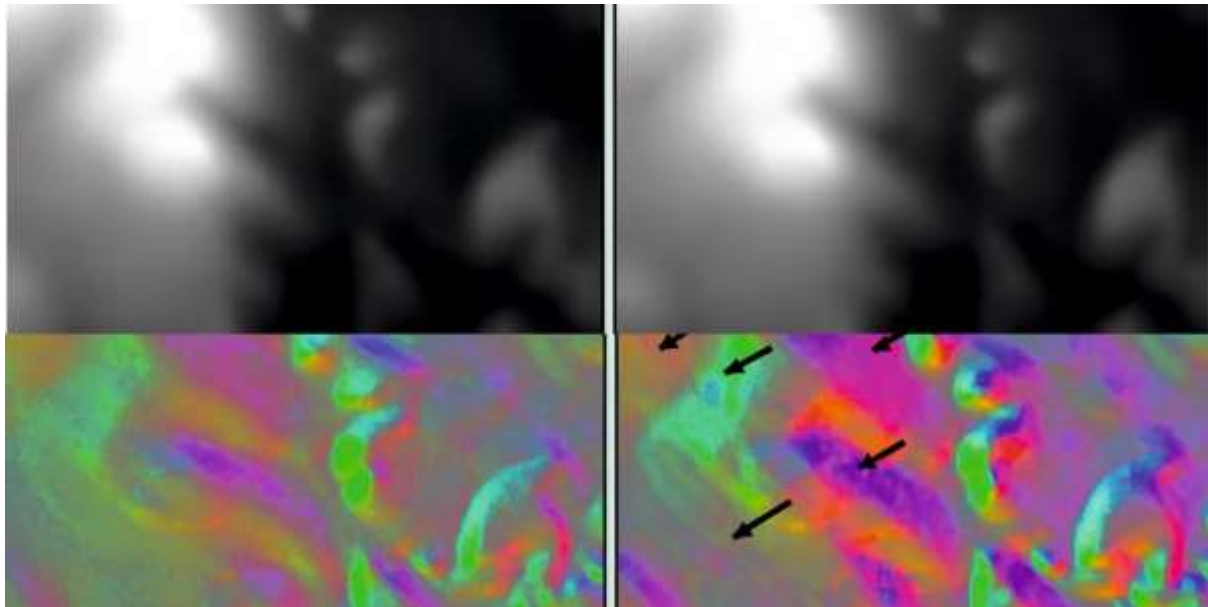


Рисунок 1. Перепроєктування цифрової моделі рельєфу (DEM)

Помилки можуть бути ледь помітними на самій цифровій моделі висот (ЦМВ), але вони зазвичай стають очевидними, якщо подивитися на зображення затіненого рельєфу (hillshade).

У цьому прикладі ЦМВ була змінена з географічної системи координат на Всесвітню поперечну систему координат Меркатора (UTM) за допомогою двох різних методів інтерполяції — кубічної згортки та методу найближчого сусіда (це видно у верхній частині ілюстрації).

Відповідні моделі hillshade, створені на основі цих ЦМВ, показані на нижніх схемах.

Вади стають очевидними на знімку, котрий було одержано на підставі ЦМР, інтерпольованої методикою найближчого сусіда, водночас як модель, утворена через кубічну згорткову інтерполяцію, не виказує подібних дефектів.

Присутність похибок у ЦМР здатна істотно позначитися на похідних висновках — схилі, орієнтації, показнику вологості, кривині, а також на коректності екологічних та ґрунтових моделей ПЕМ й ЦМЗ.

Існують три ключові категорії похибок, притаманних цифровим моделям рельєфу (ЦМР):

1. Помилки первинної інформації (вихідних даних) — з'являються під час збору початкових відомостей внаслідок неточностей вимірювання, некоректного просторового прив'язування (геореференціювання) або через недостатню роздільну здатність приймачів (сенсорів).

Зокрема, похибки у моделях SRTM можуть сягати 10–20 метрів на територіях, які характеризуються значною густотою рослинного покриву чи складними формами рельєфу.

2. Помилки апроксимації (інтерполяційні) — виникають у процесі конвертації точкових даних висот, що мають нерегулярний розподіл, у впорядковану сіткову структуру ЦМР.

Вибір алгоритму інтерполяції (наприклад, IDW, Крігінг, Метод природного сусіда, Сплайн) безпосередньо впливає на ступінь згладженості або деталізації змодельованої поверхні.

3. Помилки зміни проєкції (перепроєктування) — з'являються в момент переходу до використання іншої картографічної системи координат.

Вибір неправильної техніки інтерполяції (для прикладу – "Найближчого сусіда") здатний продукувати небажані спотворення, що помітні у візуалізаціях рельєфу (hillshade) та при обчисленні вторинних (похідних) характеристик.

Щоби звести до мінімуму похибки під час зміни проєкції цифрових моделей рельєфу (ЦМР), доцільно застосовувати методи інтерполяції, такі як бікубічна чи білінійна, оскільки вони гарантують м'які (плавні) переходи значень між окремими елементами (пікселями) і підтримують єдність (безперервність) зображуваної поверхні.

Окрім цього, здійснюючи роботи на значних за площею ділянках, критично важливо правильно обрати картографічну проєкцію — для

території України найкраще пасують координатна система УСК-2000 або ж UTM-зони нумерування 35–36N.

У сфері прогностичного картографування екосистем (РЕМ) коректність ЦМР слугує вирішальною основою для якості всіх сформованих топографічних похідних характеристик.

Якщо цифрову модель рельєфу (ЦМР) обробити некоректно, це може спричинити хибне визначення геоморфологічних об'єктів — таких як западини, схили чи вододіли, — що, своєю чергою, призведе до викривлення екологічних кордонів та меж екосистемних зон.

Отже, перш ніж приступати до обчислення морфометричних характеристик, украй важливо виконати такі кроки:

- здійснити перевірку достовірності ЦМР (це включає зіставлення даних з реперними точками та розрахунок середньоквадратичної похибки (RMSE));

- застосувати методи згладжування моделі для ліквідації несуттєвих локальних спотворень;

- переконатися у відповідності (узгодженості) використовуваних систем координат;

- визначити оптимальний просторовий дозвіл (масштаб) та відповідний метод інтерполяції, виходячи з конкретних вимог поставленої задачі природоохоронного землекористування (ПЗЗ).

Таблиця 5 – Основні типи помилок DEM та їх вплив на аналіз рельєфу

Тип помилки DEM	Причини виникнення	Вплив на результати аналізу
Помилки вихідних даних	Неточність вимірювань, роздільна здатність, геореференціювання	Викривлення реальної форми поверхні, локальні спотворення
Помилки інтерполяції	Неправильний вибір методу побудови сітки DEM	Штучні “сходинки”, западини, спотворення схилів
Помилки перепроєктування	Перехід до іншої проєкції з використанням непридатних інтерполяційних методів	Поява артефактів, порушення неперервності поверхні

Оскільки будь-який спосіб інтерполяції неминуче додає визначену долю неточностей, найбільш раціонально, якщо технологічно це можливо, розраховувати топографічні характеристики прямо з ЦМР у її вихідній системі координат.

Це набуває особливого значення для території України, де застосовуються різноманітні СК – УСК-2000, СК-42, СК-63, УТМ (ділянки 35–36N), – і де репроекування моделей поверхні може спровокувати викривлення геометрії та зміщення вторинних показників.

Топографічні характеристики зазвичай не просто відтворюють, а й передають та посилюють похибки, що вже містяться в ЦМР.

Величина впливу похибок залежить від природи характеристики, методу її розрахунку, а також від просторової конфігурації неточностей: артефактів, систематичних або випадкових похибок чи шуму.

Поширені типи DEM-помилки:

1. Артефактні та технічні недоліки.

Ці чітко видимі огріхи з'являються через недбале виконання робіт або ж технічні ліміти під час формування цифрової моделі рельєфу (DEM).

До їх переліку належать нерівні "сходи", "западини" чи "ями", відсутність даних між окремими пікселями, а також різноманітні "перешкоди" або "шуми" у масиві даних.

Подібні дефекти, як правило, усуваються ще на стадії підготовки DEM до використання чи безпосередньо перед стартом аналітичної роботи.

2. Систематичні неточності.

Їхня поява обумовлена внутрішніми лімітами, властивими конкретному методу фіксації даних, що використовується для створення чи отримання ЦМР.

Скажімо, ЦМР, отримані на основі фотограмметричних стереопар, нерідко демонструють деформації, які концентруються біля периметра знімків чи в областях, закритих тінню.

Для моделей, створених за допомогою технології LiDAR, джерелом неточностей можуть бути показники густини сканування або помилки у процесі категоризації (класифікації) окремих точок.

Коли джерела систематичних недоліків встановлені, існує можливість їхнього послаблення через застосування відповідних процедур калібрування чи внесення коректив.

3. Непередбачувані похибки.

Йдеться про безладні зсуви, що виникають через невизначеність під час вимірювального процесу або через зашумленість сигналу від давача.

Повністю від них позбутися не вийде, проте їхнє зменшення реалізується за допомогою статистичних прийомів фільтрування або усереднення даних.

При обчисленні вторинних показників (таких як експозиція, нахил, TWI, кривизна, STI та ін.) похибки цифрової моделі рельєфу (ЦМР) мають тенденцію до акумуляції та посилення, особливо явно це помітно у менш значущих характеристиках.

Наприклад, зазвичай значно більші відхилення спостерігаються у процесі визначення кривизни (що є другою похідною), ніж при розрахунках нахилу (який є першою похідною).

Гідрологічні характеристики, які залежать від сумарного обсягу та напрямку стоку, є найбільш схильними до впливу неточностей.

Навіть мінімальні зміни у висотах (в межах 1–2 м) здатні спричинити зміщення вододільних ліній чи напрямків русла, що, у свою чергу, генерує похибки у гідрологічних розрахунках і впливає на коректність прогнозних моделей для PEM та DSM.

Висновки деяких науковців, які досліджували різні методи обрахунку потоку та водонакопичення на цифрових моделях рельєфу з різною деталізацією, вказують на те, що отримані результати часто завищують показники стоку внаслідок “ефекту масштабу” і допущень, закладених в алгоритми.

Цей факт акцентує увагу на важливості виваженого застосування ЦМР у сфері просторового аналізу.

Проявляючись у ЦМР, похибки деформують очікувані співвідношення між топографічними показниками та екологічними характеристиками, які ці показники призначені відображати.

Виявлення свідчить, що навіть мінімальні неточності в цифрових моделях рельєфу (ЦМР) здатні кардинально змінити висновки екологічного моделювання. Це стосується, зокрема, створення прогностичних карт екосистем (ПрЕмК), цифрового картографування ґрунтів (ЦКГ), а також гідрологічних, кліматичних та біогеографічних розрахунків.

Подібні неточності спричиняють розмитість фінальних даних і знижують ступінь довіри до сформованих прогнозів.

Для території України ця проблема набуває особливої гостроти у низинних областях, зокрема на Поліссі, а також на заплавах ділянках річок Дніпро, Дністер та Прип'ять. Враховуючи, що на цих територіях навіть зміна висот в межах 0,5–1 метр може змінити результати моделювання екосистем та контури ґрунтових покривів.

Тому, проведення перевірки якості ЦМР є необхідним етапом перед застосуванням їх у геоінформаційному моделюванні.

Ключові стратегії для ідентифікації, зменшення та усунення неточностей охоплюють:

1. Окомірний огляд — перевірка зображень із тінювим рельєфом (hillshade), знаходження небажаних примар, чи то "провалів" (западин), чи "виступів" (піднесень).
2. Процедура очищення даних — використання усереднюючих або медіанних фільтрів задля згладжування хаотичних спотворень (шуму).
3. Геостатистичне конструювання — залучення методологій Кригінгу чи IDW (обернено-зваженої відстані) для більш точного визначення показників висоти.
4. Регулювання просторового виміру (діапазону аналізу) — модифікація формату пікселів цифрової моделі рельєфу (ЦМР) таким чином, щоб він відповідав виміру дослідної роботи.
5. Водно-технічне виправлення ЦМР — здійснення операції "заповнення низин" (fill sinks) для забезпечення безперервного просування водного масиву.
6. Створення імітації відхилень — оцінювання ступеня непевності кінцевих результатів через штучне відтворення безладних (випадкових) шумових ефектів.

3.2 Візуальний огляд

Хиби у цифрових моделях рельєфу (ЦМР) нерідко не проглядаються на первинній поверхні даних висот, проте виявляються під час дослідження похідних морфометричних характеристик, як-от затінення, крутизна схилу, його орієнтація, викривлення чи індекс зволоженості.

Обчислення та візуальне вивчення цих вторинних шарів є одним із найдоступніших та найоперативніших методів ідентифікації можливих недоліків у ЦМР, які не завжди помітні при початковому огляді.

Наприклад, похибки, що виникають внаслідок повторного проєктування ЦМР (цифрової моделі рельєфу) в іншу систему координат за допомогою методу інтерполяції "найближчого сусіда", нерідко набувають форми невеликих хвилеподібних чи "рифлених" утворень, які помітні на зображеннях рельєфу з візуалізацією тіней (Див. малюнок 1).

Водночас, інші види неточностей можуть бути представлені як нетипово великі чи малі показники на картографічних матеріалах, що ілюструють крутизну схилів, ступінь викривлення чи індекс освітленості.

У контексті геоінформаційних розвідок, що проводяться в Україні (зокрема, при вивченні особливостей рельєфу в Карпатах, на Поділлі чи Поліській низовині), подібні візуальні аберації можуть слугувати ознакою:

- похибки у процесі зведення фотозображень під час фотограмметричного моделювання з БПЛА;
- спотворення цифрових моделей рельєфу (ЦМР), одержаних із SRTM або Copernicus внаслідок обмеженої просторової роздільної здатності;
- невірне виконання перетворень координат при переході від світової системи (WGS84) до державних систем (УСК-2000, СК-63, UTM).

Візуальне оцінювання, хоч і є дієвим засобом початкового контролю якості цифрових моделей рельєфу (ЦМР), має певні недоліки: не всі види дефектів можливо помітити лише за допомогою зору, і, що найважливіше, воно не надає можливості числового визначення розміру відхилень.

Отже, доречно інтегрувати візуальний огляд із методами чисельної верифікації, які включають зіставлення з еталонними точками, застосування методів статистики для аналізу помилок (таких як RMSE, σ ,

MAD), а також використання розроблених для цього алгоритмів для визначення точності ЦМР.

3.3 Фільтрація

Обробка цифрових моделей рельєфу (ЦМР) шляхом фільтрації, що передує обчисленню топографічних характеристик, є одним із найдієвіших методів мінімізації випадкових неточностей і забезпечення вищої достовірності похідних морфометричних даних.

Такий метод є надзвичайно цінним для нейтралізації високочастотних перешкод (шуму), які здебільшого є наслідком похибок у процесі зйомки, неточностей у методах інтерполяції, або ж артефактів, що виникають через особливості покриву земної поверхні (наприклад, ліси, міські споруди, малі форми мікрорельєфу).

Найбільш вживаними в цій сфері є фільтри низьких частот — зокрема, середні арифметичні (згладжуючі) або медіанні, котрі ефективно нівелюють різкі локальні перепади висот і дають змогу виділити більш стійкі, генералізовані контури у вихідному масиві даних.

Отримані дані свідчать, що у випадках цифрових моделей місцевості з кроком 25 метрів, розумним кроком є проведення усереднюючого згладжування перед розрахунком топографічних характеристик.

Це суттєво поліпшує якість прогнозного відображення екосистем (РЕМ).

На теренах України постає особлива потреба у фільтруванні при обробці таких типів цифрових моделей рельєфу (ЦМР):

- SRTM та Copernicus DEM, у яких присутні високочастотні шуми, спричинені щільною рослинністю чи міською забудовою;

- Фотограмметричні ЦМР, отримані з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), де небажані артефакти можуть виникати через неточність сполучення окремих точок або ж через нестабільність умов освітлення при зйомці;
- Лідарні ЦМР, де навіть незначні помилки у процесі класифікації поверхні землі можуть створювати "надмірно деталізовані" або "зашумлені" дані.

Окрім традиційних методик фільтрації, новітня цифрова геоморфометрія висуває низку прогресивних стратегій для ефективної протидії небажаним спотворенням (шумам).

До них належать:

- сплайни з регульованою жорсткістю (tension splines) — ці математичні моделі гарантують ідеально гладке моделювання поверхні, не нівелюючи при цьому важливих локальних деталей;
- дослідження спектральної густини потужності (Power Spectrum Analysis) — цей підхід є ключовим для точного визначення частот, асоційованих із шумом, та їх подальшого видалення;
- форсоване перетворення Фур'є (FFT) — використовується як інструмент для швидкого та точного ізолювання домінантних, великомасштабних тенденцій у структурі рельєфу;
- вейвлет-техніки (Wavelet Analysis) — демонструють високу результативність у локалізованому виявленні шумових артефактів, незалежно від їхнього масштабування;
- фільтрація за Калманом (Kalman Filter) — являє собою динамічний, самоналагоджувальний алгоритм, чия головна задача полягає у мінімізації непередбачуваних флуктуацій при збереженні природної, неспотвореної конфігурації земної поверхні.

Підбір оптимального способу фільтрування зумовлюється декількома вагомими чинниками:

- роздільною здатністю цифрової моделі рельєфу (ЦМР);
- типом зашумлення (чи є воно випадковим, регулярним, чи має вигляд мікроструктурних артефактів);
- цільовим призначенням наступного аналізу (наприклад, моделювання водних потоків, створення ґрунтових карт, або ж визначення екологічних зон).

У контексті геоінформаційного аналізу (для таких завдань, як РЕМ, DSM тощо), початкова (превентивна) фільтрація ЦМР є беззаперечною вимогою, оскільки вона мінімізує імовірні помилки у похідних показниках, тим самим значно підвищуючи надійність створених екосистемних моделей.

3.4 Стохастичне моделювання та кількісна оцінка невизначеності DEM

Найнадійніший спосіб кількісного визначення похибок та непевності, властивих топографічним показникам, полягає у симуляції низки рівновірогідних втілень цифрової моделі рельєфу (ЦМР), застосовуючи геостатистичні або інші методи стохастичного моделювання.

Завдяки цим підходам, стає можливим не лише встановити рівень впливу як випадкових, так і систематичних відхилень на кінцеві результати аналізу, але й сформулювати статистично підтвержені судження щодо надійності похідних інформаційних масивів.

Ключова ідея цього методу полягає у створенні на основі вихідної ЦМР цілого ряду її імовірних версій (реалізацій), до яких рандомізовано вводяться похибки, що відповідають прогнозованій формі розподілу помилок (наприклад, за нормальним або гаусовим законом).

Для кожної з відповідних реалізацій розраховуються основні топографічні характеристики – кут нахилу, орієнтація схилу (експозиція),

ступінь викривлення (кривизна), показник вологості, відносне розташування та інші параметри.

Після цього отримані дані узагальнюються шляхом усереднення, а розбіжності між ними стають основою для визначення ступеня невизначеності.

Атрибути, отримані через усереднення, як правило, мають меншу похибку, ніж ті, що були обчислені на базі однієї моделі, оскільки випадкові похибки в процесі усереднення схильні взаємно нівелюватися.

Додатково, використання стохастичного методу надає можливість:

- Оцінити рівень надійності отриманих результатів моделювання в числовому виразі;
- Локалізувати області, де рівень невизначеності на досліджуваній території є найвищим;
- Встановити інтервали довіри для всіх обчислюваних похідних величин, що має критичне значення у контексті застосувань у галузях ПЕМ (PEM), ДСМ (DSM) та при проведенні гідрологічних розрахунків.

У галузі українських наукових розвідок, зокрема коли йдеться про створення моделей рельєфу (топографічних даних) Карпат, Придніпровської низовини чи Поліської рівнини, використання ймовірнісних (стохастичних) підходів дозволяє досягти наступних цілей:

- підвищити рівень достовірності прогностичних моделей, що описують процеси переміщення водних мас та ґрунтової ерозії;
- встановити граничні похибки цифрових моделей рельєфу (ЦМР), які сформовані на основі даних, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) чи технології дистанційного лазерного сканування (LiDAR);

- створити картографічні матеріали, що відображають імовірнісні (вірогіднісні) межі розповсюдження екосистем чи контурів ґрунтових типів.

Головним мінусом цього методу є його значна вимогливість до обчислювальних потужностей.

Створення сотень чи навіть тисяч ітерацій цифрових моделей рельєфу (ЦМР) потребує величезних обсягів як оперативної пам'яті, так і часу на обробку.

Додатковою перешкодою є те, що спеціалізовані програмні засоби, призначені для моделювання невизначеностей ЦМР, наразі або малодоступні, або мають непростий у використанні інтерфейс.

У сфері академічних досліджень для часткової автоматизації процедур моделювання помилок та проведення статистичного аналізу найчастіше використовують програмні бібліотеки на Python (зокрема, такі як NumPy, GDAL, PyMC3) або ж модулі мови R (як-от GeoR, raster, gstat).

Незважаючи на наявні лімітування, стохастична методологія демонструє багатообіцяючі перспективи вдосконалення цифрової геоморфометрії.

Вона гарантує перевірений ступінь надійності, передбачувану точність і чисельне визначення похибки кінцевих даних.

Ці характеристики є критично важливими для аналітичної роботи з геоінформаційними системами (ГІС), особливо актуальними при кадастровому плануванні, відстеженні екологічного стану та створенні форкаст-карт екосистемних районів України.

3.5 Вплив розміру вікна пошуку на точність топографічних атрибутів

Одним із ключових аспектів, що визначають коректність обчислення топографічних характеристик на базі цифрових моделей

рельєфу (ЦМР), є величина просторового фільтра (розмір рухомого вікна), що застосовується під час аналізу даних.

Ряд науковців вказують на те, що збільшення габаритів вікна, призначеного для розрахунку морфометричних індексів (таких як крутизна схилу, орієнтація, викривлення поверхні та ін.), сприяє мінімізації впливу як випадкових, так і локалізованих похибок, притаманних ЦМР.

Експериментальні дані підтверджують, що застосування фільтрів з розмірами більшими, ніж 3×3 елементи (наприклад, 5×5 або 7×7), призводить до значного зниження рівня небажаних шумів та ефективного згладжування аномальних показників у похідних топографічних похідних (див. ілюстрацію 2).

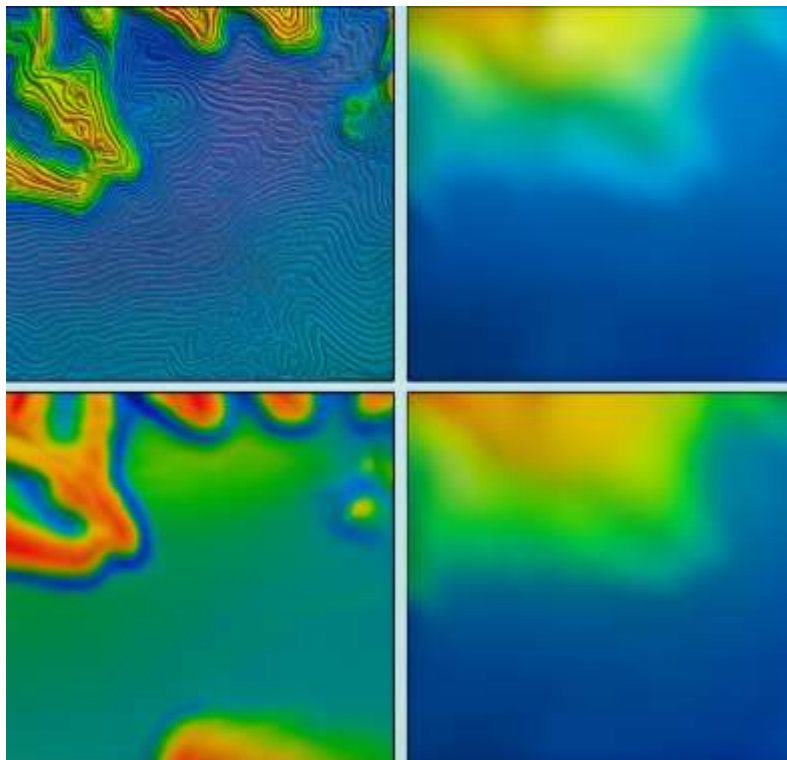


Рисунок 2 Згладження аномалій у похідних топографічних атрибутах

Це явище викликане тим, що розширені віконні рамки усереднюють локальні відхилення у значеннях висот та знижують вплив поодиноких дефектних точок (пікселів), що робить алгоритм менш вразливим до ізольованих спотворень.

Водночас, невиправдане розширення розміру вікна може спричинити втрату чіткості топографічних деталей та ефект “затушовування” важливих морфологічних ознак, як-от дрібні западини, вододільні лінії чи русла.

Отже, знаходження ідеального розміру вікна є балансом між рівнем точності та просторовою деталізацією, і його визначають такі фактори:

- рівень просторової роздільної здатності цифрової моделі рельєфу (ЦМР);
- масштаб роботи та її основна мета (чи то локальне, чи регіональне дослідження);
- конкретний топографічний показник, який потрібно розрахувати.

Для території України варто керуватися такими попередніми настановами:

- у разі детальних моделей, що мають роздільну здатність 1–5 метрів (отриманих за допомогою LiDAR або БПЛА), рекомендуються вікна розміром 3×3 або 5×5;
- у випадку середньої роздільної здатності – від 10 до 30 метрів (наприклад, дані SRTM чи Copernicus DEM) – доречніше використовувати вікна 5×5 або 7×7;
- для регіональних моделей із роздільною здатністю 50–90 метрів, слід обирати вікна 9×9 або навіть більші, зважаючи на складність форм рельєфу.

Як свідчать результати практичних студій, розширення величини вікна усереднення не тільки знижує рівень похибки в обчислюваних топографічних характеристиках, але й посилює стійкість моделей прогнозування екосистем (Predictive Ecosystem Mapping, PEM) та цифрового ґрунтознавства (Digital Soil Mapping, DSM).

Отже, вибір оптимальних параметрів вікна для аналізу є критичним кроком для вдосконалення морфометричного моделювання в умовах геоінформаційних систем (ГІС).

3.6 Вибір алгоритмів для обчислення топографічних атрибутів

У сфері сучасної цифрової геоморфометрії існує значна кількість алгоритмів, розроблених задля визначення топографічних характеристик на основі цифрових моделей висот (ЦМВ).

При цьому, результати, що отримуються за допомогою різних методологій, можуть мати значні розбіжності, навіть якщо вони застосовуються до ідентичної поверхні.

Подібна розбіжність обумовлена різницею у математичній основі самих алгоритмів, особливостях методів апроксимації значень висот, а також у підходах до обчислень похідних величин.

Характерно, що деякі з алгоритмічних рішень демонструють високу чутливість до наявності шумів та помилок у ЦМВ, тоді як інші виявляють більшу стійкість до артефактів, забезпечуючи точніше представлення фактичних морфологічних особливостей ландшафту.

Правильний добір методології є критичним для забезпечення точності розрахунку похідних характеристик, таких як нахил, орієнтація, викривлення по горизонталі та вертикалі, показник вологості, або показник радіаційної опроміненості.

Зокрема, техніка квадратичної апроксимації, розроблена Евансом (Evans u 1980), що використовує поліноміальне моделювання поверхні всередині обмеженого локального простору, демонструє вищу стійкість до непередбачуваних похибок в моделях рельєфу (DEM) у порівнянні з елементарними розрахунками на основі градієнтів.

Завдяки цьому підходу кінцеві результати є більш згладженими та стійкими, особливо в умовах складного гірського рельєфу, а тому він є оптимальним інструментом для оцінки ландшафтів, як-от Карпати, Кримські гори або Подільська височина.

Разом із тим, використання альтернативних методик — таких, як метод найменших квадратів (Horn, 1981), підхід із застосуванням матриці припасування поверхні (Zevenbergen & Thorne, 1987) або локальні аналітичні моделі, що базуються на TIN-структурі, — здатне виявитися більш доцільним для територій із незначним перепадом висот або ландшафтів, пошкоджених ерозією, що природно для Поліського регіону, лісостепу або заплавних ділянок річки Дніпро.

Прискіпливий підхід до визначення методу обчислення алгоритму є особливо актуальним у таких ситуаціях:

- коли стоїть завдання забезпечити найнижчий рівень помилок у вихідних (похідних) характеристиках;
- у процесі автоматизованого поділу екосистемних областей (зонування) в рамках методологій PEM або DSM;
- у ході проведення гідрологічних розрахунків, де висока точність визначення градієнтів схилів та векторів поверхневого стоку є ключовою вимогою.

Отже, належний вибір методу розрахунку топографічних показників мусить спиратися на такі чинники:

- особливості початкової ЦМР (Digital Elevation Model — цифрова модель рельєфу) (звідки вона отримана, яка її деталізація чи роздільна здатність, яким шляхом її було сформовано);
- видимі ознаки місцевості, що досліджується (гориста, пласка, з карстовими явищами чи інша);

- кінцева ціль дослідження (моделювання екологічних змін, визначення класів ґрунтів, розрахунок об'ємів поверхневого стоку тощо).

3.7 Масштабність топографічних атрибутів у прогностному картографуванні екосистем

Процеси в екосистемах, як-от енергетичний потік, водний цикл, а також обмін живильними елементами, розгортаються у різноманітних просторових і часових рамках.

Екологічні категорії "Тип земель" (ТЗ) і "Фаза типу земель" (ФТЗ) представляють певний організаційний рівень природного оточення, що визначається типовими поєднаннями ґрунтових покривів, геоморфологічних особливостей і потенційних рослинних співтовариств.

Ефективність Прогностного Екосистемного Картографування (ПЕК) безпосередньо залежить від коректного вибору рівня деталізації, який має відповідати тим топографічним чинникам, що є визначальними для процесів ґрунтоутворення та формування рослинного покриву на досліджуваній площі.

Візьмемо для прикладу польові дослідження: експерти визначають нахил (градієнт схилу) не на інтервалі в 1 см, і не на площі розміром 1000 км, а на проміжному масштабі. Саме цей масштаб найбільш адекватно описує задану ландшафтну одиницю — скажімо, окрему частину схилу чи невелику западину.

Хоча вимірювання нахилу на дуже малих або ж надвеликих масштабах технічно правильне, воно не може відобразити ті процеси, які є рушійними силами формування екосистемних структур на рівнях ТЗ чи ФТЗ.

Отже, масштаб вимірювань має ігнорувати короточасні або несуттєві дрібномасштабні варіації поверхні, але водночас не повинен надто узагальнювати морфологічні форми.

Схожа доктрина діє і стосовно топографічних характеристик, які отримують з цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

Наприклад, під час розрахунку таких показників, як кривина, індекс зволоженості чи експозиція, критично важливо забезпечити, аби просторовий масштаб аналізу точно відповідав масштабам тих екологічних процесів, які визначають особливості ґрунтоутворення, рослинного покриву та гідрологічного балансу в межах конкретної екологічної системи.

Розбіжність у масштабах може спричинити зникнення взаємозв'язків між морфометричними даними та екологічними показниками, а це, відповідно, спотворює кінцеві результати предиктивного екологічного моделювання (ПЕМ).

Певна частина науковців дотримується думки, що мультирівневий підхід має більшу результативність, оскільки він уможлиблює одночасний облік як місцевих, так і ширших регіональних тенденцій у становленні екосистем.

Так, просторові характеристики досліджуються на різних рівнях деталізації — починаючи з мікроморфологічного (1–5 м) і закінчуючи ландшафтним (>100 м), що гарантує цілісну картину процесів.

Є дві ключові методики для регулювання масштабу, коли розраховуються топографічні характеристики:

1. Зміна чіткості моделі DEM, тобто коригування розміру клітинки (або пікселя) сітки (через переінтерполяцію, або повторну вибірку);
2. Модифікація габаритів аналітичного вікна (яке ще називають "ядром" або "сусідством"), що встановлює обсяг інформації, яка буде задіяна для локальних розрахунків морфометричних індикаторів.

В умовах України, правильний вибір масштабу набуває критичної ваги при здійсненні картографічних робіт, зокрема у таких ключових регіонах та об'єктах:

- При відображенні гірських екосистем у Карпатах, оскільки саме дрібномасштабні особливості рельєфу (морфологія) є визначальними для формування локального мікроклімату та різних типів ґрунтового покриву;
- На територіях заплавних комплексів річок Дніпро та Прип'ять, де навіть мінімальні відмінності у куті нахилу поверхні землі мають прямий вплив на динаміку та характер гідрологічних явищ;
- На сільськогосподарських угіддях лісостепової зони, де просторова поширеність та розміри ерозійних ландшафтних форм безпосередньо корелюють зі ступенем неоднорідності (мінливості) такого показника, як родючість ґрунтів.

Отже, масштабність виступає фундаментальною характеристикою просторово-екологічного моделювання (ПЕМ), від якої залежить як адекватність проведеного просторового аналізу, так і точність та надійність подальшого прогностичного моделювання стану екосистем.

3.8 Вплив роздільної здатності DEM на точність топографічного аналізу

Просторова деталізація цифрової моделі висот (ЦМВ) – або ж DEM – визначає розміри елементів сітки (комірок), які слугують для відображення усередненого показника висоти земної поверхні на певній ділянці.

В Україні, як правило, застосовуються ЦМВ з просторовим кроком 10 метрів (такі як Copernicus DEM, ASTER GDEM) або ж 30 метрів (SRTM).

Така деталізація вважається цілком прийнятною для виконання завдань на регіональному рівні та для потреб кадастру.

Тим часом, завдяки прогресу в технологіях лазерного сканування (LiDAR), радіолокації (SAR) та фотограмметрії (зокрема, БПЛА-ЦМВ) з'явилася можливість оперувати моделями, роздільна здатність яких коливається в межах від 0,1 до 2 метрів.

Це забезпечує виключно точне і докладне відтворення найменших форм рельєфу.

Пряма залежність: зміна просторового кроку ЦМВ суттєво змінює обсяг та характер топографічної інформації, що міститься в моделі, а це, відповідно, впливає на достовірність розрахунків будь-яких похідних топографічних характеристик.

Наукові роботи засвідчують: щойно роздільна здатність стає нижчою (тобто піксель збільшується в розмірі), спостерігаються такі наслідки:

- показники ухилів стають меншими,
- помітно вужчає діапазон значень кривизни,
- погіршується чіткість у зображенні ліній стоку та річкових мереж,
- інформаційна цінність для гідрологічних обчислень стає нижчою,
- точність розрахункових величин у певних місцях знижується.

Разом з тим, навіть дуже висока роздільна здатність не обов'язково призводить до покращення достовірності прогностичних чи екологічних моделей.

Мікродані, зафіксовані цифровими моделями рельєфу (ЦМР) з розміром пікселя 0,5-1 м, можуть демонструвати випадкові чи рукотворні нерівності (як-от рослинний покрив, шляхи, оранка), які не пов'язані з

природними процесами створення ґрунтового покриву чи функціонування екосистем.

Як наслідок, у великій кількості ситуацій надто висока роздільна здатність може негативно вплинути на точність прогнозів у предиктивному моделюванні ґрунтів (ПМГ) чи цифровому картографуванні ґрунтів (ЦКГ), адже вона вносить надмірну змінність, що ускладнює процес моделювання.

Для теренів України, найкращий вибір просторової деталізації цифрової моделі рельєфу (ЦМР) визначається специфікою місцевості та цілями наукового чи практичного вивчення:

- * 5–10 м — ідеально пасує для гідрологічних розрахунків, класифікації екологічних зон, а також ідентифікації значних морфологічних складових;

- * 1–2 м (дані LiDAR чи ЦМР на основі безпілотних апаратів) — застосовується для вирішення вузькоспеціалізованих кадастрових чи геодезичних проблем на локальному рівні;

- * 30 м (наприклад, SRTM, ASTER) — використовується для широкомасштабного чи загального картографічного аналізу (зокрема, при дослідженні Українських Карпат або Дністровського каньйону).

Якщо зменшити деталізацію (тобто збільшити розмір пікселя), це, як правило, призводить до нівелювання дрібних, високочастотних особливостей поверхні, водночас виділяючи та підкреслюючи крупні морфоструктури, такі як річкові басейни, пагорби, ескарпи та схиліві елементи.

Оцей підхід може стати в пригоді під час дослідження того, як формуються закономірності ландшафту стосовно типів земель (ТЗ) та фаз типів земель (ФТЗ).

Деякі фахівці пропонують застосовувати низькочастотні фільтри (як-от: фільтр усереднення чи медіанний фільтр) замість того, щоб змінювати просторову роздільність.

Ці методики дозволяють усунути високочастотні шуми та дрібні деталі, проте зберігають початкову морфологію ЦМР, що виявляється особливо дієвим при створенні великомасштабних карт екосистем.

Отже, найкраща роздільна здатність встановлюється завдяки балансу між заплутаністю рельєфу та масштабом екологічних явищ, які мають бути відображені.

Для просторих, рівних областей (як-от Поліська низовина чи Лісостепова зона) краще підійдуть менш деталізовані моделі (з роздільною здатністю 10–30 метрів).

Натомість, у випадку складних гірських масивів або сильно порізаного (ерозійного) ландшафту (наприклад, Карпати чи Подільська височина), варто застосовувати моделі з високою чіткістю — від 1 до 5 метрів.

3.9 Вплив розміру вікна аналізу на точність обчислення топографічних атрибутів

У той час як значна кількість науковців коригують роздільну здатність ЦМР (цифрової моделі рельєфу), або застосовують методи згладжування для зміни масштабу топографічного дослідження, інші експерти переконані, що більш результативним інструментом для пристосування аналізу до конкретного масштабу об'єктів ландшафту є налаштування розміру околу (*neighborhood size*, або рухомого вікна), що застосовується під час обчислення топографічних властивостей.

У цій ситуації, розмір вікна трактується як вимір (ширина) досліджуваної зони в метричних одиницях (не в пікселях), у межах якої

обчислювальний алгоритм оцінює локальні перепади висот з метою розрахунку показників — таких як нахил (ухил), орієнтація (експозиція), кривина, індекс вологості та інші.

Застосування оптимально визначеного розміру вікна, який відповідає просторовим рамкам конкретних елементів рельєфу (таких, як схили, тераси, долини або гряди), надає можливість більш точно описати ті особливості топографії, що реально корелюють з екологічними механізмами, які впливають на формування ґрунтів та рослинного покриву.

Розрахунок характеристик у вікні надто малого обсягу може захоплювати зайву, нерелевантну для процесів ґрунтоутворення, деталізацію поверхні, тоді як надмірно велике вікно призводить до нівелювання важливої морфологічної інформації.

Таким чином, необхідно обирати розмір вікна, що узгоджується з просторовим масштабом тих природних процесів, які є визначальними для формування екосистемних одиниць.

Вивчення проблеми продемонструвало, що розширення габаритів вікна під час розрахунків топографічних індексів додатково сприяє мінімізації впливу похибок цифрових моделей рельєфу (ЦМР), зокрема високочастотного флуктуаційного шуму (див. Мал. 2).

Проте, неконтрольоване збільшення периметру вікна зумовлює втрату дрібних елементів рельєфу, а це може стати вирішальною проблемою для заплутаних гірських або ерозійно-денудаційних ландшафтних утворень.

З метою встановлення найбільш підходящого розміру вікна, низка науковців здійснила зіставлення показників крутизни схилів, отриманих на базі ЦМР із різними конфігураціями вікна, з фактичними даними польових вимірів, які були проведені спеціалістами-ґрунтознавцями.

Зокрема, дані, отримані в ході експериментальних досліджень із застосуванням методології SoLIM (Модель виведення даних про ґрунти та

ландшафти), засвідчили, що оптимальний розмір вікна, який забезпечує максимальну кореляцію між фактичними та розрахунковими значеннями ухилів, а також найбільш точне відображення ґрунтового покриття в картах, становить приблизно 30 метрів.

Відхилення від цього оптимального значення (в сторону збільшення чи зменшення) призводило до зниження рівня збіжності отриманих результатів.

Варто зазначити, що точність прогнозування виявилася менш чутливою до зміни роздільної здатності цифрової моделі рельєфу (ЦМР), ніж до обраного масштабу для розрахунку морфометричних характеристик, за умови, що роздільна здатність ЦМР була достатньо детальною для адекватного відображення основних процесів формування рельєфу.

Отже, якість моделювання залежить не стільки від деталізації пікселя, скільки від коректно обраного масштабу для аналізу.

Для числового встановлення найкращого розміру вікна застосовуються статистичні підходи, що беруть до уваги втрату деталізації простору та рівень згладжування місцевості.

Проте, переважна більшість стандартних ГІС-програмних комплексів (як-от ArcGIS, QGIS, SAGA) застосовують незмінне вікно розміром 3×3 пікселі для базових обчислень крутизни схилів та їхньої орієнтації, що становить проблему при роботі з ЦМР високої чіткості, де така зона охоплює надто незначну ділянку поверхні.

Програмне забезпечення, яке підтримує варіативну величину вікна, охоплює:

- LandSerf — надає можливість встановлювати величину вікна у метричних одиницях та використовує її для обчислення нахилу, кривизни, а також індексу зволоженості;

- ArcSIE (Arc Soil Inference Engine) — вбудовує змінну величину ядра під час розрахунку топографічних показників для моделювання ґрунтів на базі правил, що походять з експертних систем;
- GRASS GIS — гарантує багатомасштабний розрахунок морфометричних індикаторів з автоматичним коригуванням величини вікна, враховуючи ступінь складності рельєфної поверхні.

В Україні, найкращий розмір вікна для аналізу місцевості визначається особливостями її рельєфу:

* 20–30 метрів – рекомендується для плоских або незначно хвилястих ділянок, таких як Полісся та зони Лісостепу;

* 10–20 метрів – застосовується для горбистих регіонів Поділля та Прикарпаття;

* 5–10 метрів – потрібен для гірських районів Карпат, де спостерігається висока ступінь розсіченості рельєфу.

Отже, гнучке регулювання розміру аналітичного вікна є ключовим механізмом для підвищення достовірності прогностичного картографування екосистем (ПКЕ).

Цей підхід забезпечує відповідність масштабу топографічних досліджень реальним природним явищам, які лежать в основі формування ландшафтної структури.

3.10 Алгоритмічні підходи до обчислення топографічних атрибутів

З першого погляду, процедура розрахунку топографічних характеристик із застосуванням цифрової моделі висот (ЦМВ) може виглядати напрочуд прямолінійною.

Однак, насправді, навіть для найбільш базових параметрів, як-от кут нахилу, експозиція або ж показник кривини, існує цілий спектр обчислювальних методик, які здатні продукувати відчутно відмінні показники, навіть якщо вони базуються на ідентичній моделі рельєфу.

Ця розбіжність спричинена варіаціями у застосовуваних математичних концепціях, інтенсивністю використання наближень, ступенем сприйнятливості до шумових ефектів, а також особливостями ландшафту, що підлягає аналізу.

Деякі алгоритмічні рішення краще протистоять неточностям, які можуть бути притаманні ЦМВ, тоді як інші гарантують високу ступінь точності лише для окремо визначених видів земної поверхні.

У контексті прогнозного екосистемного картування (ПЕК) це питання набуває особливої значущості, адже хибний вибір обчислювального методу здатен спотворити взаємозалежності, що існують між рельєфом, властивостями ґрунту та територіальним розміщенням рослинного покриву.

Коли подібні характеристики інтегруються у ПЕК, критично важливо підібрати такий алгоритм і налаштувати його параметри, щоб він міг безпомилково відтворити динаміку водного стоку, притаманну конкретному типу місцевості (див. Рис. 3).

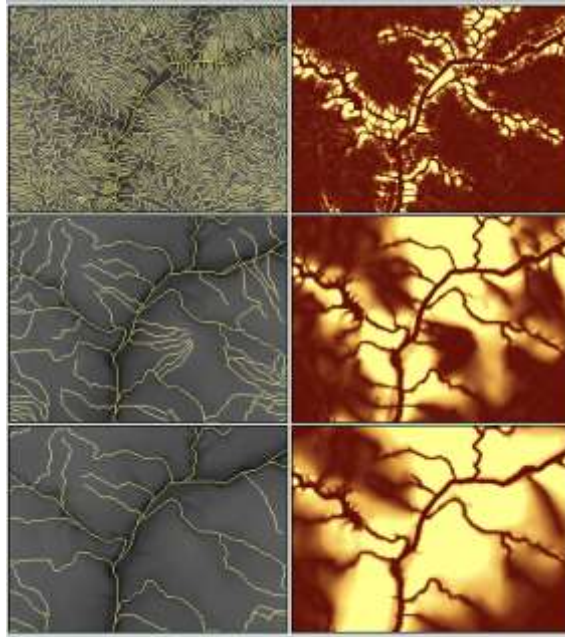


Рисунок 3. Ілюстрація значного впливу різних параметрів на похідні мережі каналів

Чимало топографічних характеристик виводяться з похідних першої чи другої черги від цифрової моделі рельєфу (ЦМР), зокрема:

- Ухил/схил (градієнт висот — це похідна першого порядку);
- Викривлення площинне та профільне (похідна другого порядку);
- Накопичення стіку чи площа водозбірного басейну (похідні, що залежать від маршрутизації потоків).

Наукова сфера рясніє описами десятків методик обчислення цих індикаторів.

Наприклад, окремі дослідники зіставляли до десяти способів визначення ухилу, які базуються на різноманітних засадах — починаючи від елементарних методів різниці й закінчуючи комплексними поліноміальними моделями.

За великим рахунком, способи, які наближають місцеву площину поліноміальною функцією і визначають похідні з цієї функції, визнані найбільш точними.

Способи розрахунку похідних:

- Традиційний прийом Горна (Horn, 1981) — спирається на застосування зваженої середньої різниці; цей спосіб є ефективним при роботі з ЦМР середньої якості, проте має підвищену чутливість до небажаних шумових ефектів.
- Техніка Зевенбергена–Торна (Zevenbergen & Thorne, 1987) — часто застосовується у спеціалізованому програмному забезпеченні, проте відома тим, що систематично недооцінює величину нахилу на ділянках з мінімальним ухилом.
- Квадратичний підхід Еванса (Evans, 1980) — його основою є апроксимація даних поліномом другого ступеня; цей метод характеризується надійністю та високим ступенем точності обчислень.
- Удосконалений алгоритм Еванса–Янга (Evans–Young) — відмінною особливістю є використання аналітичного вікна розміром 5×5 пікселів (на противагу стандартному 3×3), що дозволяє знизити вплив випадкових похибок і артефактів, які містяться у ЦМР.

Незважаючи на значну кількість проведених наукових вишукувань, універсального, "найдосконалішого" алгоритму не знайдено, оскільки кінцевий результат значною мірою детермінується морфологією місцевості, якістю (роздільною здатністю) цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та присутністю як систематичних, так і стохастичних похибок.

Щодо території України, то підхід Еванса демонструє оптимальні показники ефективності у гірських районах та карстових утвореннях Карпатського регіону.

Водночас на плоских територіях Полісся або у пойменних зонах річки Дніпро значну перевагу мають методики, розроблені Хорном та Зевенбергенем–Торном.

Критично важливим етапом перед розрахунком будь-яких гідрологічних характеристик (таких як напрямок потоку, об'єм накопиченої вологи, чи площа водозбору) із застосуванням ЦМР є необхідність ліквідації всіх ізольованих заглиблень, відомих як замкнені пониження або "западини" (sinks чи depressions).

Якщо цього не зробити, алгоритм "потоку вниз" (*flow routing*) не зможе коректно визначити напрямки руху води.

Існує три головні стратегії для ліквідації понижень (западин):

1. "Заповнення раковин" (Fill sinks) — техніка, що полягає у доведенні рівня западини до висоти найнижчої клітини, через яку рідина може витікати.

2. "Нарізання шляхів стоку" (Carving) — метод, спрямований на зменшення висоти перешкод (бар'єрів) задля відновлення безперервного руху водного потоку.

3. Змішані прийоми — використання сукупності процедур заповнення та "нарізання".

Більшість сучасного програмного забезпечення, як-от ArcGIS, QGIS та SAGA GIS, переважно використовує перший підхід — механізм "заповнення раковин".

Однак, ця дія може суттєво трансформувати морфологічні характеристики цифрових моделей рельєфу (ЦМР), особливо там, де поверхня має невеликі ухили, породжуючи ілюзію надмірно вирівняного чи згладженого ландшафту.

У зв'язку з цим, під час симуляції водних потоків у контексті ЦМР, доцільно застосовувати методики, що поєднують адаптивні механізми чи гібридні обчислювальні схеми.

Це необхідно для мінімізації спотворень вихідних параметрів.

Правильне встановлення як напрямку, так і потужності руху водних мас, є необхідною умовою для виведення основних водогосподарських характеристик, до яких належать:

- система водовідведення та річкова мережа;
- територія, з якої відбувається стік;
- величина, що вказує на загальний обсяг води, що накопичується у певному місці (накопичення стоку).

Найуживаніші способи визначення руху води:

- Алгоритм D8 (О'Каллахан і Марк, 1984) – традиційний метод, який скеровує стік виключно до однієї з восьми прилеглих клітинок. Цей підхід є оперативним, хоча він і є дещо спрощеним.
- Алгоритм D_{∞} (Тарботон, 1997) – цей підхід передбачає розподіл водного потоку між двома суміжними напрямками на пропорційній основі. Він значно точніше моделює природне розсіювання стоку.
- Модель MFD (Фріман, 1991) – концепція багаторазового стоку, яка уможлиблює його дистрибуцію одночасно у декілька русел.

Для рівнинних регіонів України, зокрема Полісся та Лісостепу, процедура MFD пропонує більш адекватне моделювання розподілу водної течії по поверхні.

Натомість, у гірських місцевостях Карпатських гір найоптимальніші показники досягаються за допомогою D_{∞} , бо він ефективно працює з існуючими там стрімкими схилами та заплутаною будовою річкових долин.

Отже, точність та стійкість результатів, отриманих при аналізі фізіографічних характеристик (PEM), формується не лише якістю цифрової моделі рельєфу (DEM), але і від конкретного обраного алгоритму

для розрахунку похідних значень, коректного встановлення параметрів вікна для аналізу, процедури нівелювання западин та способу визначення напрямку руху потоку.

Щоб гарантувати достовірність прогностичних моделей екосистемних процесів в Україні, найбільш виправданим є застосування інтегрованої методології, де для проведення морфометрії використовується метод Еванса, а вже гідрологічне моделювання здійснюється за допомогою D_{∞} або MFD.

3.11 Програмне забезпечення для обчислення топографічних атрибутів

Як було вже вказано, оцінювання якісних характеристик топографії – це процес, який передбачає значно більше, аніж лише математичну обробку ЦМР (цифрової моделі рельєфу).

На підсумкову якість одержаних висновків зумовлюють вплив вид ландшафту, ступінь деталізації моделі, присутність помилок, обраний алгоритм, масштаб виконуваного дослідження та використаний програмний інструментарій.

Кожен із цих факторів здатен як покращити точність прогнозованого екосистемного картографування (ПЕК), так і істотно її погіршити.

На цю мить не існує єдиного програмного комплексу, який би цілісно поєднував у собі функції:

- ефективною роботи з величезними обсягами даних цифрових моделей рельєфу (ЦМР);
- гнучкого, інтерактивного задання масштабу дослідження;
- автоматизованого розрахунку повного спектра необхідних топографічних характеристик;

- можливості вибору методологій та регулювання розміру аналітичного вікна.

Наявні програмні засоби охоплюють широкий діапазон — починаючи від класичних, багатоцільових геоінформаційних систем (ГІС) і закінчуючи вузькоспеціалізованими додатками, розробленими суто для потреб геоморфометричного аналізу.

Вони мають відмінності у типі ліцензування (комерційне/платне або ж вільно доступне), методах роботи із ними (за допомогою візуального інтерфейсу, чи через написання команд), і, звичайно, у рівні технічної підтримки та надійності їх функціонування.

Серед геоінформатиків та землевпорядників в Україні, ArcGIS від Esri традиційно зберігає статус найпопулярнішого програмного забезпечення.

Цей програмний комплекс відомий своєю надійністю, можливістю ефективно опрацьовувати значні масиви цифрових моделей рельєфу (ЦМР), широким вибором вбудованих функцій для розрахунку додаткових властивостей рельєфу (таких як ухили, аспекти, кривизна, визначення напрямку та обсягу стоку), а також відмінною якістю навчальних матеріалів, довідкової інформації та активною спільнотою користувачів.

Ентузіастично настроєна спільнота, що користується програмою ArcGIS, невпинно розробляє додаткові розширення та програмні коди (як-от, для посилення функціоналу модулів Spatial Analyst чи ArcHydro).

Нерідко, наявні в самій програмі алгоритми виявляються неактуальними, пропонують обмежене налаштування параметрів і не надають можливості індивідуально коригувати габарити аналітичних вікон чи вибирати конкретний алгоритм для обробки кожної властивості окремо.

Наукові колективи та вищі навчальні заклади дедалі більше надають перевагу вільно поширюваним програмним продуктам, які відкривають значно ширший простір для наукової діяльності.

До переліку найвідоміших програмних пакетів у цій галузі входять: SAGA GIS, GRASS GIS, TauDEM, LandSerf, а також ArcSIE.

Таблиця 3. Порівняльна характеристика програмного забезпечення для обчислення топографічних атрибутів

Програмне забезпечення	Тип ліцензії	Сильні сторони	Обмеження	Рекомендоване застосування в Україні
ArcGIS	Комерційна	Стабільність, підтримка великих даних, інтеграція	Обмежений вибір алгоритмів, висока вартість	Державні кадастрові системи, великі проекти
SAGA GIS	Відкрита	Багато алгоритмів, швидкість, автоматизація	Менш інтуїтивний інтерфейс	Наукові дослідження, ГІС-аналіз рельєфу
GRASS GIS	Відкрита	Багатомасштабний аналіз, висока точність	Складність у навчанні	Академічні дослідження, екологічне моделювання
TauDEM	Відкрита	Сучасні алгоритми D_{∞} , MFD, обробка потоків	Складна установка	Гідрологічне моделювання, PEM
LandSerf	Відкрита	Простота, змінний розмір вікна	Обмежена підтримка великих DEM	Освітні та локальні аналізи
ArcSIE	Безкоштовна надбудова	Експертно-знаннєве PEM-моделювання	Потребує ArcGIS	Моделювання ґрунтів, прогнози карти

Актуальний аналіз рельєфу в рамках PEM вимагає поєднання кількох програмних інструментів, оскільки єдиної системи, яка б надавала повний спектр потрібних функцій, не існує.

Найбільш раціональним для українських теренів є спільне застосування SAGA GIS або TauDEM для морфометричних і гідрологічних

розрахунків, а також ArcGIS чи QGIS для наступних етапів візуалізації, перевірки коректності та включення результатів у кадастрові реєстри.

Застосування програмного забезпечення з відкритим кодом гарантує вищу адаптивність і відкритість наукових процесів, тоді як пропрієтарні системи залишаються критично важливими для урядових ініціатив, де першочерговою є надійність роботи та технічна підтримка від розробника.

Висновок

За підсумками виконаного дослідження підтверджено: поєднання прийомів цифрового аналізу рельєфу (ЦАР) та супутникових технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) визнано одним із найрезультативніших шляхів поліпшення процедур обліку земельних фондів України.

Застосування цих методів гарантує всебічне, високоточне та швидке отримання геопросторової інформації, що дає змогу суттєво наростити продуктивність державного земельного моніторингу, кадастрового супроводу та планування природоохоронної діяльності.

Виконаний огляд засвідчив, що ступінь деталізації цифрових моделей рельєфу (ЦМР) має прямий вплив на коректність обчислення топографічних характеристик, а відтак — і на вірогідність прогнозування умов навколишнього середовища (ПНС).

Глибокий аналіз різновидів помилок (систематичні, випадкові, пов'язані з артефактами) та застосування інструментів для їх мінімізації, зокрема фільтрації, багатоспектрального аналізу чи стохастичного моделювання, сприяє підвищенню достовірності кінцевих результатів.

Ключовим є вибір адекватної просторової деталізації ЦМР, яка мусить корелювати з масштабом ландшафтних форм, що вивчаються, а також правильне визначення розміру вікна для розрахунку топографічних характеристик.

Саме ці змінні критично впливають на якість розроблених моделей для ґрунтового покриву, рослинного світу, рівня зволоження та гідрологічних характеристик.

Встановлено: визначальним фактором точності морфометричних індексів є обрана методологія алгоритму.

З-поміж усіх досліджених алгоритмів, найвищу стійкість продемонстрували методи, в основі яких лежить квадратична апроксимація Еванса, а також його вдосконалена версія – метод Еванса–Янга.

Вони виявилися найменш чутливими до впливу зашумленості цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

Крім того, емпірично доведено, що використання динамічного (змінного) розміру аналітичного вікна при розрахунку геоморфологічних характеристик забезпечує значно точніше моделювання ландшафтних явищ.

Це сприяє зниженню рівня локалізованих помилок та покращує узгодженість (кореляцію) фактичних (польових) та змодельованих даних.

Було визначено, що ефективна імплементація предиктивного моделювання ерозії (ПМЕ) залежить від правильності вибору відповідного програмного інструментарію.

Зіставний розбір продемонстрував, що в реаліях України найдієвішою є синергія безкоштовних геоінформаційних платформ (SAGA GIS, TauDEM, GRASS GIS) та комерційного ПЗ (ArcGIS, ArcSIE) для безперешкодного введення кінцевих даних до кадастрових і аналітичних середовищ.

Подібна комбінація гарантує як оперативність та науково обґрунтовану точність, так і непохитну стійкість системи при обробці значних обсягів інформації.

Отож, імплементація методів цифрового аналізу рельєфу та технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у процедури обліку земельних угідь дозволяє досягти таких ключових переваг:

- скорочення обсягу ручної праці під час виконання робіт "у полі";
- гарантування збільшеної точності позиціонування та більшої детальності відображення просторових даних;
- формування необхідного фундаменту для безперешкодного об'єднання отриманих геопросторових даних із передовими геоінформаційними системами (ГІС);
- підвищення продуктивності процесів управління земельними активами та посилення контролю за змінами у навколишньому середовищі.

У майбутньому, наступні етапи досліджень мають бути зосереджені на таких напрямках:

- поліпшенні функціональності автоматизованих систем, призначених для категоризації фізико-географічних об'єктів;

- створенні загальнодержавного реєстру цифрових моделей рельєфу (DEM) підвищеної деталізації для України, використовуючи при цьому дані, отримані за допомогою світлолокаційних (LiDAR) та радіолокаційних (радарних) методів;
- активнішому застосуванні комплексних платформ, що об'єднують можливості технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) та географічних інформаційних систем (GIS), з метою ефективного регулювання територіальними ресурсами;
- коригуванні підходів до оцінки потенційної наземної ерозії (PEM), аби вони відповідали реаліям кліматичних змін та впливу діяльності людини на структуру земної поверхні.

Отож, видобуті результати засвідчують: поєднання цифрового вивчення ландшафту з інформацією, отриманою через дистанційне зондування, відкриває колосальні можливості для вибудовування якісно нового рівня просторового аналізу на теренах України.

Це, по суті, закладає підвалини для розбудови прогресивної геоінформаційної системи.

Така система, своєю чергою, слугуватиме гарантом збалансованого використання земельних угідь і збереження всього комплексу природних багатств.

Список використаних джерел

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012
2. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. – Львів, 2008.
3. Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. – Львів, 2003.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: ГКНТА, 1999.
5. Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії – Львів, 2001.

6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.

7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. "Геодезія" (частина перша). Чернігів 2002р.

8. Hamilton, Randy & Benton, Robert. (2010). A review of predictive ecosystem mapping.

9. Джонс, К.; Майдінгер, Д.; Кларк, Д.; Шульц, Ф.1999. На шляху до встановлення прогностичних стандартів картографування екосистем: офіційний документ, перше наближення. Підготовлено для Цільової групи з альтернатив картографування наземних екосистем, Комітет з інвентаризації ресурсів Британської Колумбії (RIC). 88 с.

10. Клінгзайзен, Б.; Меттерніхт, Г.; Паулюс, Г. 2008. Геоморфометричний аналіз ландшафту з використанням напівавтоматизованого ГІС-підходу. Моделювання навколишнього середовища та програмне забезпечення. 23: 109–121.

11. Лагашері, П.; Мусса, Р.; Кормарі, Д.; Моленат, Дж. 1996. Вплив джерела даних DEM та схеми вибірки на топографічні параметри та на гідрологічну модель на основі топографії. У Ковар, К.; Нахтнебель, Х.П., ред. Застосування географічних інформаційних систем у гідрології та водних ресурсах. Воллінгфорд, Велика Британія: Міжнародна асоціація гідрологічних наук: 191–199.

12. Ліз, Б.Г.; Чжі, Х.; Ван Ніль, К.; Лаффан, С.В. 2000. Вплив помилки DEM на прогнозне картографування рослинності. У Чжоу, К.; Ліз, Б.; Тан, Г., ред. Досягнення в цифровому аналізі рельєфу. Берлін: Springer-Verlag: 349–362.

13. Олайя, В. 2009. Основні параметри земної поверхні.

14. У Хенгль, Т.; Ройтер, Х.І., ред. Геоморфометрія: концепції, програмне забезпечення, застосування. Том 33 з Розвиток ґрунтознавства. Амстердам: Elsevier: 141–170.

15. Пайк, Р.Дж.; Еванс, І.С.; Хенгль, Т. 2009. Геоморфометрія: короткий посібник.

16. Хенгль, Т.; Ройтер, Х.І., ред. Геоморфометрія: концепції, програмне забезпечення, застосування. Том 33 з Розвиток ґрунтознавства. Амстердам: Elsevier: 3–30.

17. Раафлауб, Л.Д.; Коллінз, М.Дж. 2006. Вплив помилки в сіткових цифрових моделях рельєфу на оцінку топографічних параметрів. Моделювання навколишнього середовища та програмне забезпечення. 21:710–732.

18. Ройтер, Х.І.; Хенгль, Т.; Гесслер, П.; Сойль, П. 2009. Підготовка DEM для геоморфометричного аналізу. Геоморфометрія: концепції, програмне забезпечення, застосування. Том 33 з Розвитку ґрунтознавства. Амстердам: Elsevier: 87–120.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи:

**«Застосування цифрового аналізу рельєфу та
дистанційного зондування для підвищення
ефективності інвентаризації земельних ресурсів
України»**

Обсяг пояснювальної записки: 82 аркушів.

24.12.25 рік

(дата)

(підпис студента)