

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО

Факультет землевпорядкування та інфраструктурного розвитку

Кафедра геодезії і геоінформатики

Кваліфікаційна (дипломна) робота

освітнього ступеня «Магістр»

на тему: **«МЕТОДИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ
ЗАСОБАМИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ»**

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Виконала: студентка групи ЗВ-71з

Жук Аліна Романівна

Науковий керівник: к.е.н., доцент

Рій Іван Федорович

Рецензент: _____

Львів 2025

РЕФЕРАТ

Методи побудови цифрової моделі рельєфу засобами геоінформаційних систем. Жук А.Р. Кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. – Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025.

81 сторінка тексту А4, 2 додатки, 39 рисунків, 37 літературних джерел.

У магістерській роботі досліджено методи побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР) із використанням геоінформаційних систем. Проаналізовано вплив якості, щільності та просторового розподілу вихідних даних на точність моделі та оцінено ефективність різних методів інтерполяції. Моделювання виконано в ArcGIS та Surfer за алгоритмами TIN, триангуляції, природної околиці, крігінгу, зворотно зважених відстаней, поліноміальних та радіальних базисних функцій, ANUDEM. Найвищу точність показали TIN, триангуляція, природна околиця та ANUDEM. Метод ANUDEM забезпечує гідрологічну коректність завдяки використанню додаткових шарів річок, озер і висотних точок. Робота підтверджує, що ГІС-технології підвищують ефективність і достовірність ЦМР, а оптимальний вибір методу залежить від характеристик вихідних даних та особливостей рельєфу.

ЗМІСТ

	ВСТУП	6
1	ПОНЯТТЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ	8
1.1	Цифрові моделі рельєфу	8
1.2	Джерела даних для створення ЦМР	16
2	АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ	29
2.1	Поняття інтерполяції поверхонь	29
2.2	Алгоритм побудови моделі рельєфу за стереопарами	50
3	ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ANUDEM	54
3.1	Загальні відомості про ANUDEM	54
3.2	Базовий алгоритм інтерполяції	57
3.3	Практичне використання методу ANUDEM для побудови ЦМР	59
3.4	Порівняльний аналіз методу ANUDEM з іншими методами інтерполяції цифрових моделей рельєфу	65
4	ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	73
	ВИСНОВКИ	76
	БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	78
	ДОДАТКИ	82

ВСТУП

У сучасних умовах просторові дані набувають дедалі ширшого застосування в науці, виробництві та управлінні територіями. Розвиток геоінформатики значно підвищив ефективність вирішення геопросторових завдань завдяки зростанню доступності вихідних даних, появі потужних комп'ютерів, хмарних сервісів і широкому використанню мережі Інтернет. Особливе місце серед сучасних інформаційних технологій займають географічні інформаційні системи (ГІС), що забезпечують збір, обробку, зберігання, відображення та поширення просторових даних.

Методи аналізу геопросторової інформації в ГІС можуть варіюватися від побудови простих аналітичних карт до складного тривимірного моделювання реального середовища. У зв'язку з цим форми візуалізації даних постійно вдосконалюються, набуваючи більшої наочності, інформативності та інтерактивності.

Одним із ключових напрямів геоінформатики є моделювання рельєфу - важливого природного чинника, що визначає гідрологічні, кліматичні та ґрунтові процеси. Сучасне зображення рельєфу здійснюється у вигляді цифрових моделей рельєфу (ЦМР) - тривимірних математичних моделей земної поверхні, які формують основу автоматизованої картографії та просторового аналізу.

ЦМР дають змогу визначати геометричні параметри рельєфу, будувати горизонталі, оцінювати стабільність територій для будівництва, моделювати ерозійні процеси й зміни ландшафту. Вони використовуються в гідрології, проєктуванні інженерних споруд, лісовому господарстві, сільському та міському плануванні. Актуальним напрямом є створення **гідрологічно коректних ЦМР**, які точно відображають річкову мережу та водозбірні басейни.

Завдяки розвитку дистанційного зондування Землі (зокрема супутників Sentinel, Landsat, а також даних LiDAR і БПЛА) формування ЦМР стало значно швидшим і точнішим. В Україні активно розвиваються національні геопортали,

як-от **Публічна кадастрова карта** та **Geoportal NLS**, що інтегрують цифрові моделі рельєфу у відкритому доступі.

Серед програмного забезпечення для створення та аналізу ЦМР провідні позиції займають **ArcGIS Pro**, **QGIS**, **Surfer**, **Global Mapper**, **ERDAS Imagine**, а також сервіси хмарної обробки - **Google Earth Engine** і **DroneDeploy**. Їх функціональні можливості охоплюють різноманітні методи інтерполяції: TIN, IDW, Kriging, ANUDEM тощо.

Метод **ANUDEM**, реалізований у середовищі ArcGIS як алгоритм «Toro to Raster», забезпечує створення гідрологічно коректних ЦМР шляхом оптимізації висотних даних і усунення похибок водорозділів. Саме цей метод залишається одним із найефективніших для побудови моделей рельєфу з мінімальною середньоквадратичною похибкою (RMSE).

Метою дослідження є аналіз точності побудови цифрових моделей рельєфу в ГІС і визначення оптимального методу створення гідрологічно коректних моделей. Основними завданнями є порівняння методів інтерполяції, побудова моделей у програмах **ArcGIS** та **Surfer**, а також оцінка їх точності на основі контрольних висотних точок.

Наукова новизна полягає у визначенні найбільш придатного методу побудови ЦМР для різних типів місцевості, а практичне значення - у розробці рекомендацій для вибору технологій створення цифрових моделей рельєфу в землевпорядних, будівельних і екологічних проєктах.

Отримані результати сприяють підвищенню точності геопросторового аналізу, оптимізації інженерно-геодезичних робіт і вдосконаленню управління територіями на основі сучасних цифрових технологій.

1 ПОНЯТТЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ

1.1 Цифрові моделі рельєфу

Рельєф є одним із ключових компонентів географічного середовища, що визначає просторову організацію природних процесів та особливості господарської діяльності. Його враховують у сільському господарстві для оцінки дренажу, запобігання ерозії та збереження родючості ґрунтів; у гідрології – для визначення меж водозборів, напрямків поверхневого й підземного стоку, а також під час прогнозування паводків та формування водного балансу.

У військовій сфері рельєф має стратегічне значення, оскільки впливає на прохідність місцевості, можливості оборони й маневрування. В авіації точна інформація про рельєф потрібна для планування маршрутів, особливо на малих висотах, та для навігації безпілотних літальних апаратів.

Рельєф визначає мікрокліматичні умови, формування ландшафтів і придатність територій для забудови чи сільськогосподарського використання. У сучасному просторовому плануванні та екологічному моніторингу він є базовим чинником у моделюванні природних ризиків – зсувів, підтоплень, ерозійних процесів.

Одним із найефективніших способів відтворення рельєфу на основі цифрових технологій є створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР). ЦМР – це структурована форма подання просторових даних, що дає змогу обчислювати параметри рельєфу шляхом інтерполяції, апроксимації чи екстраполяції за висотними точками. Усі обчислення виконуються комп'ютерними алгоритмами, які забезпечують автоматизовану обробку великих масивів геоданих.

У геоінформаційній практиці розрізняють цифрову модель поверхні (ЦМП) та цифрову модель місцевості (ЦММ), відповідно DSM і DTM:

- DSM охоплює висоти всіх надземних об'єктів – рослинності, рельєфу, будівель.
- DTM містить лише дані про реальний рельєф, тому використовується для аналізу природних процесів.

У науковій літературі визначення ЦМР не є уніфікованим. У зарубіжних джерелах її подають як регулярну матрицю висот відносно референційної поверхні (еліпсоїда або геоїда). В українській геоінформатиці ЦМР розуміють як тривимірне цифрове подання рельєфу, сформоване за даними наземного, аерофотограмметричного, лазерного (LiDAR) чи супутникового знімання.

Сучасні ЦМР активно створюють на основі матеріалів дистанційного зондування Землі зі супутників Sentinel-1/2, WorldView, PlanetScope, а також за допомогою БПЛА та мобільних лазерних сканерів, що дає можливість отримувати високоточні моделі з роздільністю до кількох сантиметрів.

Відкриті геопортали, зокрема Copernicus Open Access Hub, USGS Earth Explorer та українські ресурси Geoportal NLS і Публічна кадастрова карта, забезпечують доступ до актуальних ЦМР, які широко застосовують у землевпорядкуванні, екологічному моніторингу, проєктуванні інфраструктури та просторовому плануванні.

Цифрова модель рельєфу – це цифрове подання форми земної поверхні, яке містить висоти у вузлах регулярної чи нерегулярної мережі, організованих у вигляді матриць або тріангуляційних структур. Точність моделі визначається густотою висотних точок і вибраним методом інтерполяції.



Рис. 1.1. Основні види висотної інформації

Сьогодні термін «цифрова модель рельєфу» охоплює кілька близьких за змістом понять – DEM (Digital Elevation Model), DTM (Digital Terrain Model) і

DSM (Digital Surface Model). У міжнародній практиці ці моделі використовуються паралельно, проте мають змістові відмінності:

- DEM – узагальнена назва всіх цифрових моделей висот, незалежно від методу їх отримання.
- DTM – цифрова модель місцевості, що відображає рельєф земної поверхні без надземних об'єктів.
- DSM – модель поверхні, яка відтворює висоти всіх видимих елементів, включно з будівлями та рослинністю.

У різних країнах використовують додаткові терміни: DHM - у Німеччині, DGM - у Великій Британії, DTEM - у США. В Україні поняття ЦМР і ЦММ застосовують як взаємодоповнювальні, але ЦММ розглядається як ширша категорія, що включає не лише висоти, а й метричну та атрибутивну інформацію.

На думку дослідників [11], цифрова модель місцевості - це неперервна поверхня, сформована у вигляді регулярної сітки або трикутної нерегулярної мережі (TIN), доповнена похідними параметрами – схилами експозицією та кривизною. Такий підхід забезпечує реалістичне тривимірне подання рельєфу, необхідне для гідрологічних, інженерних, геоморфологічних і екологічних досліджень.

Головне завдання побудови ЦМР - максимально точне відтворення рельєфу при оптимальній кількості опорних точок. Зазвичай модель складається з набору координат (X , Y , Z) і алгоритмів, що описують взаємозв'язки між точками для формування неперервної поверхні.

Сучасне створення ЦМР ґрунтується на GNSS-вимірюваннях, аерофотограмметрії, лазерному скануванні (LiDAR) та даних дистанційного зондування Землі. Це дозволяє отримувати моделі з високою просторовою точністю – від кількох сантиметрів до 1 м. Так, програми Copernicus (ESA) та NASA SRTM пропонують глобальні моделі з роздільністю 30–10 м, тоді як LiDAR-моделі на локальному рівні досягають точності 0,1–1 м.

В Україні розвиток ЦМР відбувається в межах національних геоінформаційних систем, зокрема Національного геопорталу відкритих даних,

Публічної кадастрової карти та регіональних баз просторових даних, що формуються при створенні комплексних планів розвитку громад.

Найпоширенішим форматом подання ЦМР у ГІС є растрова модель, де кожна піксельна комірка містить висотне значення. Для інтерполяції застосовують кригінг, IDW, метод природної околиці, сплайни та алгоритм ANUDEM, що забезпечують гідрологічно коректну поверхню.

Загалом цифрові моделі рельєфу є ключовим інструментом тривимірної візуалізації, інженерного проєктування, управління природними ресурсами, а також моделювання паводків, ерозії та екологічного моніторингу.



Рис. 1.2 Основні типи інформації в цифровій моделі

Метрична інформація визначає просторові та вимірювальні характеристики геооб'єктів і є основою геопросторових даних у ГІС. Вона охоплює координати точок, ліній і полігонів, які відтворюють форму, розміри та положення об'єктів, а також похідні параметри – відстані, площі, об'єми, кути нахилу та експозицію схилів. Сучасні GNSS-технології, супутникове та безпілотне знімання забезпечують високу точність таких даних, зокрема під час створення ЦМР і ЦММ.

Атрибутивна інформація містить властивості та якісні характеристики об'єктів, представлених у метричному просторі. Це атрибутивні таблиці, семантичні описи та метадані щодо джерела, точності, методів отримання й формату геоданих. Завдяки геопорталам і хмарним сервісам (ArcGIS Online, QGIS Cloud, Google Earth Engine) атрибутивні дані інтегруються з метричними для комплексного аналізу просторових процесів.

Семантична складова визначає зміст і забезпечує логічне узгодження просторових та атрибутивних даних. Вона пов'язана з кодуванням та класифікацією геоінформації й гарантує її коректне тлумачення в різних програмних середовищах. У сучасних ГІС для цього використовують стандарти ISO 19115, INSPIRE та OGC, що забезпечують міжнародну сумісність.

Синтаксична складова визначає правила структурування й обробки цифрових моделей рельєфу та місцевості. Вона регламентує формати даних (GeoTIFF, LAS, XYZ, GRID), структуру геобаз і алгоритми просторового аналізу, інтерполяції та візуалізації. Сучасні ГІС застосовують стандартизовані синтаксичні моделі, що забезпечують обмін інформацією між різними системами (QGIS, ArcGIS Pro, Global Mapper).

Цифрові моделі рельєфу поділяють на три основні типи залежно від структури даних [14]:

- GRID – моделі з регулярним розміщенням точок на прямокутних, трикутних чи гексагональних сітках; використовуються в SRTM, ASTER GDEM, Copernicus DEM.
- TIN (Triangulated Irregular Network) – моделі з нерегулярною сіткою точок, створеною на основі тріангуляції Делоне; забезпечують високу точність на складному рельєфі.
- TGRID – моделі з ізолінійним представленням, де точки розміщуються вздовж горизонталей; застосовуються для реконструкції рельєфу за картографічними матеріалами.

Моделі TIN широко використовуються у сучасних ГІС, оскільки дозволяють адаптувати щільність точок до складності рельєфу. У 2020–2025 рр.

значно удосконалено автоматизовані алгоритми побудови TIN на основі хмар точок, отриманих за допомогою LiDAR та фотограмметрії з БПЛА. Такі моделі забезпечують детальне відтворення мікрорельєфу, урбанізованих територій і лінійних споруд з точністю до кількох сантиметрів.

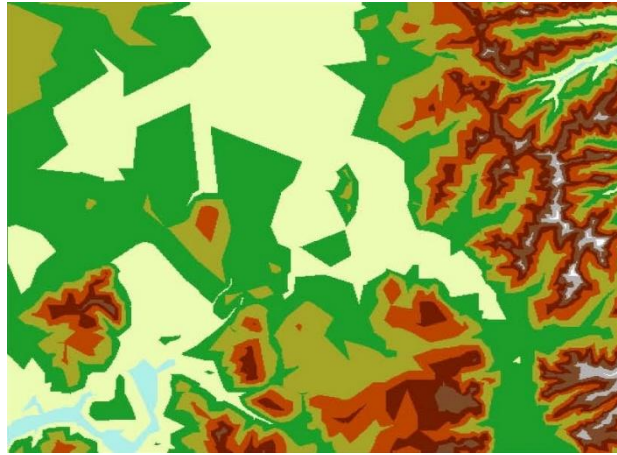


Рис. 1.3. Лінійна нерегулярна мережа системи нерівнокутних трикутників

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) є ключовим інструментом просторового аналізу, що забезпечує автоматизоване визначення геоморфологічних, гідрологічних та морфометричних параметрів місцевості. Завдяки розвитку супутникових систем спостереження (Copernicus Sentinel, TanDEM-X, ALOS PALSAR), LiDAR-технологій та фотограмметрії з БПЛА точність і деталізація цифрових моделей істотно підвищилися.

Сучасні операції на основі ЦМР охоплюють широкий спектр аналітичних і моделювальних процедур:

- отримання морфометричних параметрів (висот, ухилів, експозицій, кривизни) з точністю до сантиметрів;
- аналіз крутизни та експозицій схилів з побудовою тематичних карт «на льоту» для оцінки ерозійних ризиків, проєктування угідь та інженерних споруд;
- автоматичне формування горизонталей та карт рельєфу;
- побудову профілів поперечних і поздовжніх перерізів із можливістю поєднання з геологічними й геотехнічними даними;
- моделювання поверхневого стоку та водозборів, визначення напрямків течії, зон акумуляції та потенційного підтоплення;

- розрахунок площ поверхонь, об'ємів земляних мас і моделювання затоплень для гідротехнічних і природоохоронних задач;
- створення тривимірних моделей рельєфу з рендерингом, драпіруванням та текстурованням ортофотопланами й растровими даними;
- розроблення відеосимуляцій і «віртуальних прольотів» із застосуванням VR/AR;
- аналіз зон видимості (viewshed) для визначення ліній прямої видимості, оптимального розміщення антен, веж чи вітрових турбін;
- інтеграцію з ГІС-аналізом для оцінки зсувів, ерозійних процесів і планування протиерозійних заходів.

Аналітична обробка ЦМР дозволяє визначати похідні морфометричні показники, будувати профілі перерізів, аналізувати видимість/невидимість, окреслювати вододіли й тальвеги, виконувати інтерполяцію (kriging, spline, IDW), створювати ізолінії, здійснювати цифрове ортотрансформування знімків та проводити геофізичні розрахунки. Це також дає змогу моделювати ерозійні процеси та прогнозувати зміни рельєфу під впливом природних і антропогенних чинників.

У 2020–2025 рр. ЦМР стали складовою інтелектуальних геопросторових систем (Smart GIS), що застосовуються у містобудуванні, гірничій галузі, обороні, агросекторі, моніторингу природних ресурсів та просторовому плануванні.

На основі ЦМР створюють широкий спектр тематичних карт: гіпсометричні, карти ухилів і експозицій (рис. 1.4, 1.5), карти ерозійної небезпеки, напрямків стоку, зон акумуляції, стійкості ландшафтів, потенційних зсувів і затоплення. Використання алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж у поєднанні з ЦМР дозволяє автоматизувати класифікацію територій і прогнозування геоморфологічної динаміки.

Властивості рельєфу, визначені на основі цифрових моделей, нині широко застосовуються у міждисциплінарних дослідженнях, що охоплюють географію, ґрунтознавство, гідрологію, екологію, геологію та сферу землекористування.

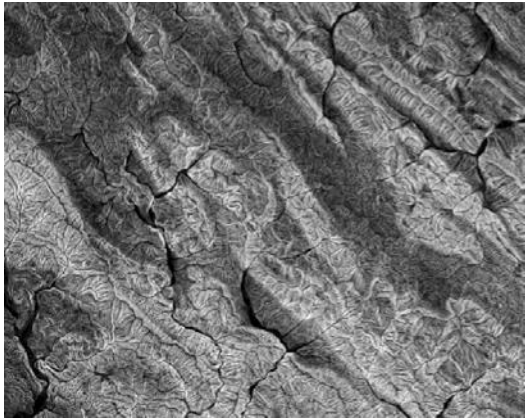


Рис. 1.4. ЦМР, представлена у вигляді карти крутизни схилів

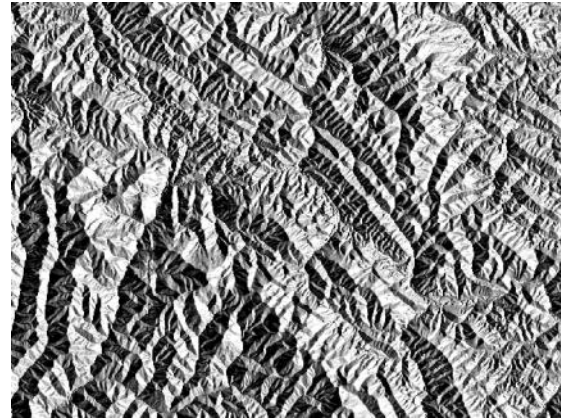


Рис. 1.5. ЦМР, представлена у карти експозиції схилів

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) забезпечують високоточний просторовий аналіз, результати якого активно використовуються для:

- прогнозування просторового розподілу властивостей ґрунтів, виявлення ділянок із підвищеною ерозійною небезпекою чи ризиком деградації ґрунтового покриву, формування картогенетичних моделей ґрунтів та оцінювання стійкості агроландшафтів [14];
- моделювання ерозійних процесів і поверхневого стоку з урахуванням кліматичних сценаріїв, гранулометричного складу ґрунтів, крутизни та експозиції схилів, характеру землекористування й антропогенного навантаження, що дає змогу прогнозувати зміни водного режиму територій [15];
- картографування рослинного покриву та оцінки його просторової структури, з урахуванням мікрорельєфу, інсоляційних умов, вологості ґрунту та теплових характеристик поверхні, що є ключовим для прецизійного землеробства, моніторингу екосистем і планування агротехнічних заходів [16];
- оцінки ймовірності зсувів, обвалів, карстових провалів і підтоплень, що має суттєве значення для геотехнічного моніторингу, інженерно-геологічних досліджень, будівництва, розробки протиерозійних та протизсувних заходів, визначення зон потенційної небезпеки для інфраструктури [17];
- аналізу біорізноманіття, моделювання просторового поширення видів та екологічних ніш, прогнозування поведінкових реакцій диких тварин у різних геоморфологічних умовах, визначення екокоридорів та ключових ареалів збереження популяцій [18];

- планування територій і ландшафтно-екологічного аналізу, що дозволяє комплексно оцінювати придатність територій для забудови, сільськогосподарського використання, рекреації, охорони природи або формування природоохоронних зон.

Завдяки інтеграції цифрових моделей рельєфу з даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) – такими як супутникові знімки Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat 9, продукти радарної інтерферометрії, дані LiDAR-знімань та хмарні геоінформаційні платформи (Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub) – стало можливим формування багат шарових, динамічних просторових моделей, що відображають не лише морфометричні характеристики, але й тенденції трансформації рельєфу в часі.

У сучасних геоінформаційних системах (ГІС) ЦМР виступає базовим просторовим шаром для аналітичного моделювання природних процесів, оцінки екологічних ризиків, системи підтримки прийняття рішень у сфері сталого природокористування та моніторингу стану довкілля. Завдяки інтеграції з тематичними даними, просторовою статистикою та алгоритмами машинного навчання ЦМР забезпечує комплексний, багатовимірний аналіз територій, що робить цей інструмент незамінним у наукових дослідженнях і практичних застосуваннях різних галузей.

1.2 Джерела даних для створення ЦМР

На сучасному етапі розвитку геоінформаційних технологій основними джерелами даних для побудови цифрових моделей рельєфу (ЦМР) залишаються різноманітні методи геодезичних, картографічних і дистанційних вимірювань, кожен з яких має власні переваги, точність та сферу застосування. До таких джерел належать:

- геодезичні (польові) вишукування, що виконуються із застосуванням електронних тахеометрів, GNSS-приймачів у режимах RTK та NRTK, а також автоматизованих систем збору координат із підключенням до мережі ZAKPOS

або аналогічних сервісів диференціальних поправок. Ці методи забезпечують високу точність вимірювань та використовуються для створення базових висотних опорних мереж, детального інженерного знімання та уточнення локальних ділянок рельєфу;

- картометричні методи, що ґрунтуються на використанні топографічних карт, ортофотопланів і топографічних планів, з яких шляхом ручного або автоматизованого цифрування отримують дискретні висотні дані. У середовищах ArcGIS Pro, QGIS, Global Mapper та інших програмних продуктах здійснюється векторизація горизонталей, відміток висот і структурних елементів рельєфу;

- дані наземного лазерного сканування (TLS), які формують надзвичайно детальні хмари точок із міліметровою точністю. TLS застосовують для знімання міських територій, архітектурних та археологічних об'єктів, техногенних споруд, кар'єрів і інших локальних територій, де необхідне високоточне моделювання мікрорельєфу;

- дані аеролазерного сканування (ALS), отримані з БПЛА, літаків чи гелікоптерів. ALS дозволяє створювати високоточні цифрові моделі навіть у важкодоступних районах, лісових масивах або під густим рослинним покривом завдяки здатності лазерних імпульсів проникати крізь крону дерев;

- інтерферометричні дані дистанційного зондування Землі, отримані за допомогою SAR-радарів супутників Sentinel-1, TerraSAR-X, ALOS PALSAR. Інтерферометрична обробка забезпечує формування ЦМР незалежно від погодних умов, освітлення чи вегетаційного покриву, що робить цей метод важливим для великомасштабного моніторингу;

- фотограмметричні методи, засновані на стереовимірюванні цифрових зображень із супутників, літаків чи БПЛА. Програмні комплекси Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, DroneDeploy дозволяють отримувати хмари точок, ортофотоплани та цифрові моделі рельєфу з точністю до кількох сантиметрів.

Хоча кожне з джерел має свої особливості застосування, останніми роками спостерігається стрімке зростання ролі дистанційного зондування Землі та

фотограмметрії. Підвищення роздільної здатності сенсорів, автоматизація обробки даних, використання машинного навчання, вдосконалення GNSS-навігації та алгоритмів ортотрансформування сприяють створенню високоточних та регулярно оновлюваних цифрових моделей рельєфу. Такі моделі інтегруються у системи просторового аналізу, застосовуються в проектуванні землекористування, моніторингу територій, моделюванні інженерних процесів і природних явищ.

Оцифровування топографічних карт – це процес перетворення аналогових карт, що містять інформацію про рельєф, у цифрову форму з метою подальшого використання в геоінформаційних системах. У ході оцифровування відтворюються елементи паперових карт: горизонталі, відмітки висот, гідрографія, дорожня мережа, межі об'єктів та інші структурні компоненти.

Сучасне оцифровування здійснюється шляхом векторизації растрових зображень у програмних продуктах ArcGIS Pro, QGIS, AutoCAD Map 3D, Global Mapper, MicroStation. Алгоритми автоматичного та напіваавтоматичного розпізнавання контурів, що використовують технології машинного навчання (AI digitizing), істотно підвищують швидкість та точність цифровізації картографічних матеріалів. У результаті формується векторна модель карти, яку можна редагувати, оновлювати, масштабувати, інтегрувати з іншими просторовими шарами та використовувати для побудови ЦМР або ЦМП (цифрової моделі поверхні).

Основною метою оцифровування є не лише перенесення вмісту карти, а й максимально точне відтворення морфології рельєфу, що забезпечує коректність подальших ГІС-аналізів та висотного моделювання.

Карта – це математично обґрунтоване, зменшене та узагальнене зображення земної поверхні, що відображає розміщення природних і штучних об'єктів у відповідній системі координат та умовних позначень. Основними картографічними джерелами для побудови ЦМР є:

- топографічні карти та плани, які використовують для моделювання рельєфу суходолу;

- морські навігаційні та топобатиметричні карти, що застосовуються для відтворення рельєфу дна водойм.

Рельєф на топографічних картах подається системою горизонталей і висотних відміток. Висота перетину рельєфу визначається масштабом карти та характером місцевості. Горизонталі відображають лінії однакових абсолютних висот і забезпечують наочне уявлення про форму, крутизну й протяжність схилів.

Відповідно до чинних стандартів висота перетину горизонталей становить: 2,5 м – для карт масштабу 1:10 000; 5,0 м – 1:25 000; 10,0 м – 1:50 000; 20,0 м – 1:100 000; 40,0 м – 1:200 000; 50,0 м і більше – для карт масштабу 1:500 000 і дрібніше. Карті масштабу 1:500 000 і дрібніше не забезпечують достатньої точності для детального моделювання рельєфу через значний ступінь картографічної генералізації, коли точність розташування горизонталей підпорядковується загальній виразності зображення.

В останні роки в Україні активно триває цифровізація топографо-геодезичного фонду та створення Національної геопортальної системи, яка містить відкриті дані топографічних карт, ортофотопланів, цифрових моделей рельєфу та інших просторових ресурсів. Дані формуються із застосуванням GNSS-технологій, БПЛА, супутникового зондування (Sentinel, WorldView, Pleiades), що істотно підвищує їх актуальність, оновлюваність та точність. Це забезпечує ширші можливості для землеустрою, моніторингу територій, проектування, управління природними ресурсами та реалізації проєктів просторового планування.

На сучасному етапі розвитку геоінформаційних технологій застосовують п'ять основних методів оцифровування топографічних карт, кожен із яких має свої переваги та сферу використання.

Оцифровування по точках є найточнішим, але й найбільш трудомістким способом, що полягає у визначенні координат характерних точок (кутів, вершин, перетинів). Він забезпечує високий рівень контролю і використовується під час створення детальних цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

Автоматичне оцифровування передбачає векторизацію растра без участі оператора. Алгоритми у ArcGIS Pro, QGIS, Global Mapper, Adobe Illustrator Map Tools та сучасні нейромережеві сервіси значно прискорюють роботу та знижують вплив людського фактора.

Інтерактивне оцифровування поєднує автоматичну та ручну обробку. Користувач коригує або доповнює результати векторизації, що дозволяє отримати оптимальне співвідношення між швидкістю та точністю, особливо під час оновлення карт.

Сканування є початковим етапом створення цифрової карти, коли отримується растрова копія з роздільною здатністю 300–1200 dpi. Сучасні сканери усувають деформації старих оригіналів, а отримані зображення підлягають геоприв'язці та векторизації.

Векторизація за допомогою дигітайзера – традиційний, нині менш поширений метод, що базується на зчитуванні координат із планшета. Він зберігає актуальність для робіт з архівними матеріалами.

В Україні значна частина топографічних карт існує у паперовому або растровому вигляді, тому їх масове оцифровування є ключовим напрямом розвитку геоінформаційної інфраструктури. Цей процес активно впроваджується в межах НІГД, державного геопорталу та стандартів INSPIRE. У 2024–2025 рр. здійснюється системна оцифровка карт масштабів 1:10 000, 1:25 000 і 1:50 000 із залученням аерофотознімання БПЛА та супутникових даних Sentinel-2, Pleiades Neo, WorldView-3, що підвищує точність і актуальність картографічної інформації.

Матеріали польових знімів та супутникового позиціонування залишаються найточнішою основою для створення ЦМР і цифрових моделей місцевості. Саме наземні вимірювання забезпечують ту метричну точність, якої інколи не досягають методи дистанційного зондування.

За останні роки інструментальна база геодезичних робіт суттєво оновилася: оптичні прилади замінили електронні тахеометри, цифрові нівеліри, лазерні сканери, GNSS-приймачі та системи RTK/PPK. Це дозволяє визначати

координати з точністю 1–2 см у режимі реального часу. Комплекс сучасних інструментів включає електронні далекоміри, теодоліти, лазерні сканери (стаціонарні та мобільні), БПЛА та портативні GNSS-приймачі, підключені до мереж ZAKPOS, System.NET, Leica SmartNet.

Їх комплексне застосування дозволяє суттєво знизити вартість польових робіт, підвищити продуктивність, мінімізувати помилки оператора та забезпечити інтеграцію з ГІС-платформами (ArcGIS Pro, QGIS, Global Mapper).

Геодезичні вимірювання сьогодні одразу формуються в цифровому вигляді, а за потреби оперативно переводяться в цифрові координати й висоти за допомогою Trimble Business Center, Leica Infinity, Magnet Office, Topcon Tools, GNSS Solutions.

Лазерне сканування (LiDAR) дає змогу створювати високодетальні 3D-моделі рельєфу з щільністю 1–10 точок/м². Поєднання наземного сканування, GNSS-спостережень і фотограмметрії з БПЛА забезпечує точне моделювання місцевості для землеустрою, кадастру, містобудування та моніторингу деформацій.

Тахеометричне знімання виконується електронними тахеометрами та використовується для створення великомасштабних топографічних планів. Сучасні роботизовані тахеометри зберігають дані, проводять первинні обчислення й сумісні з Trimble Access, Leica Captivate, Topcon MAGNET.

Фототеодолітне знімання, хоч і ефективно в гірських умовах, сьогодні замінене цифровою фотограмметрією. Дані обробляються в Fotomod, Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, що дозволяє автоматично визначати координати та отримувати 3D-моделі рельєфу.

Наземно-космічні знімання на основі GNSS-технологій забезпечують високу точність визначення координат у статичному, RTK, NRTK, PPK і PPP режимах. Сучасні багатосистемні приймачі (Trimble R12i, Leica GS18, Topcon HiPer VR), оснащені IMU, підтримують сигнали GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou та NavIC. В Україні широко застосовується мережа ZAKPOS, що забезпечує доступ до RTK-розв'язку в режимі реального часу.

Традиційні топографічні карти й дані польових зніманих доповнюються технологіями ДЗЗ: аерофотозніманням БПЛА, LiDAR та радарною інтерферометрією (InSAR), які дозволяють створювати детальні цифрові моделі рельєфу швидше й точніше. Радіолокаційна інтерферометрія (InSAR) порівнює фазові дані з різних орбітальних положень супутників. Інтерферометрична база визначає точність, що дає змогу фіксувати деформації земної кори, осідання та зсуви. Першим масштабним проектом стала місія SRTM (2000 р.), а сучасні дані забезпечують супутники Sentinel-1A/B, TerraSAR-X/TanDEM-X, ALOS PALSAR-2, RADARSAT-2 і RCM.



Рис. 1.6. Цифрова модель рельєфу території України за даними SRTM (в хмарній платформі Google Earth Engine)

Міжнародна місія SRTM. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) – спільний проєкт NASA, NIMA (нині NGA), DLR та ASI, спрямований на створення найбільш повної цифрової топографічної бази Землі. Експедиція тривала з 11 по 22 лютого 2000 року та охопила території між 56° пд. і 60° пн. широти, тобто понад 80% суходолу. У результаті отримано глобальні цифрові моделі рельєфу (DEM), які стали фундаментом для картографії, геодезії, моніторингу довкілля, землевпорядкування та моделювання природних процесів.

Знімання виконували з борту шатла Endeavour (місія STS-99) за допомогою інтерферометричної радарної системи InSAR у С- та Х-діапазонах (5,6 та 3,1 см). Для отримання тривимірних даних застосовувалася висувна 60-метрова щогла з

другою антеною. Підсумком стало формування глобальної моделі SRTM DEM, яка з 2015 року доступна у відкритому доступі з роздільною здатністю 30 м. Дані SRTM широко використовують у ГІС-аналізі, гідрологічному моделюванні, плануванні територій та 3D-візуалізації. Місія стала основою для подальших проєктів – TanDEM-X (2010–2020) та NISAR (з 2024 р.), що забезпечують вищу точність і регулярне оновлення ЦМР.

Система SRTM складалася з основної антени, зовнішніх сенсорів, 60-метрової щогли та системи AODA для точного визначення просторового положення. За дослідженнями А. Корвеула та І. Евіака, середня похибка становила –2,9 м на рівнинах і до 5,4 м у горбистій місцевості. Незважаючи на систематичні відхилення, дані SRTM придатні для побудови горизонталей карт масштабу 1:50 000 і дрібніше.

Основні характеристики SRTM:

- просторове розрізнення – 3" (≈ 90 м) глобально, 1" (≈ 30 м) – з 2015 р.;
- середня вертикальна похибка – ± 10 –20 м;
- відкритий доступ через Earthdata, EarthExplorer, OpenTopography;
- активне використання в ГІС, гідрології та просторовому плануванні.

Метод InSAR базується на аналізі фазових різниць двох когерентних знімків, що забезпечує високе визначення висот. Через відкритий доступ SRTM DEM широко застосовується для побудови моделей рельєфу різного рівня деталізації.

ALOS та цифрова модель AW3D30. Альтернативою SRTM стала глобальна модель AW3D30, створена на основі стереознімків сенсора PRISM супутника ALOS (Advanced Land Observing Satellite). Супутник ALOS «Daichi», запущений 24 січня 2006 року, понад п'ять років забезпечував високоточне картографування, геодезичні роботи та моніторинг катастроф. На його борту працювали три сенсори:

PRISM – панхроматична камера 2,5 м для стереознімання;

AVNIR-2 – багатоспектральна система для аналізу поверхні;

PALSAR – радар L-діапазону для знімання за будь-яких погодних умов.

У 2015 році JAXA відкрила доступ до глобальної моделі AW3D30 із розрізненням 30 м, яка в багатьох гірських регіонах перевершує SRTM1 та ASTER GDEM. У 2024 році розпочато роботу супутника ALOS-4 з удосконаленим радаром PALSAR-3 для моніторингу змін поверхні, лісів і морських акваторій.

LiDAR у створенні цифрових моделей рельєфу. LiDAR (Light Detection and Ranging) – один із найточніших методів формування ЦМР і ЦМП. Технологія ґрунтується на визначенні часу проходження лазерного імпульсу, що дозволяє обчислювати координати точок (X, Y, Z) та формувати щільну хмару точок.

Сучасні сканери забезпечують 100 тис. – понад 2 млн вимірів за секунду, характеризуються великою дальністю, високою точністю та широким кутом огляду.

Переваги LiDAR: дуже висока швидкість збору даних; мінімальна участь оператора; безконтактність та можливість роботи у важкодоступних зонах; щільність вимірів – до сотень тисяч точок/м²; незалежність від часу доби.

Види лазерного сканування. Наземне лазерне сканування (TLS) застосовується для моделювання архітектурних і інженерних споруд, пам'яток, а також у геодезії та археології. Повітряне лазерне сканування (Airborne LiDAR) використовують для великомасштабного картографування рельєфу, лісів, берегових зон, транспортної та міської інфраструктури.

До провідних розробників LiDAR-систем належать RIEGL, Leica Geosystems, Trimble, Topcon, FARO, а також виробники сенсорів для БПЛА – Velodyne, Livox, DJI.

Фактори точності LiDAR-знімання. На точність впливають похибка вимірювання лазером, щільність та роздільна здатність даних, нахил поверхні, відбивна здатність матеріалів, а також атмосферні явища – туман, пил, опади та вологість. Сучасні LiDAR-комплекси об'єднують лазерні сенсори, GNSS-приймачі та інерціальні навігаційні системи (INS), забезпечуючи сантиметрову точність позиціонування. Технологія активно використовується у топографо-

геодезичних, кадастрових, інженерних, архітектурних, лісових та екологічних дослідженнях.

Вибір і застосування LiDAR-систем. Під час вибору враховують не лише технічні характеристики, а й вартість, інтервали калібрування, сервісну підтримку, гарантію, рівень підготовки персоналу та доступність ПЗ для обробки. Аеролазерні системи встановлюють на літаках, вертольотах і БПЛА; вони оснащені лазерними випромінювачами, INS для контролю орієнтації та GNSS-приймачами для геоприв'язки. Поєднання GNSS та INS забезпечує визначення траєкторії польоту з високою точністю.

Сучасні LiDAR-системи генерують до 2 млн імпульсів/с, реєструючи відбиття від земної поверхні, рослинності та споруд. Точність залежить від висоти й швидкості польоту, кута сканування ($20\text{--}30^\circ$), розміру лазерної плями та щільності точок ($1\text{--}100+$ точок/м²). Оптимальні висоти знімання становлять 800–1200 м, що забезпечує компроміс між точністю та шириною смуги.

Обробка даних та створення цифрових моделей. Побудова ЦМР потребує очищення хмар точок від об'єктів, що не належать до рельєфу. Для цього застосовують TerraScan, LAStools, Global Mapper, ArcGIS Pro, Pix4D. Сучасні програми автоматизують класифікацію точок, побудову контурів рельєфу, 3D-моделей та інтеграцію результатів у ГІС.

Переваги LiDAR над аерофотозніманням. Лазерне сканування не залежить від освітлення та майже не реагує на погодні умови, не формує тіней та забезпечує високоточне відтворення рельєфу. Тому його широко застосовують у топографії, кадастрі, моніторингу деформацій, лісовому та екологічному картографуванні й територіальному плануванні.

Фотограмметричні методи та створення моделей рельєфу. Фотограмметрія – технологія отримання просторових координат об'єктів за зображеннями. Стереопари формують зі знімків з перекриттям, що дає змогу виконувати тривимірну реконструкцію місцевості. Для побудови коректної стереомоделі визначають внутрішнє та взаємне орієнтування знімків, які уточнюють у процесі фототріангуляції.

Дистанційне зондування Землі охоплює дані з аеро-, космічних і безпілотних платформ та є базовим джерелом інформації для створення ЦМР і ЦМП.

Аерофотознімання виконується з висот 500–10 000 м і забезпечує деталізацію до кількох сантиметрів (масштаби 1:5 000 – 1:50 000). Космічні апарати працюють на висотах понад 100 км, мають нижчу деталізацію, але більшу площу охоплення. Сучасні супутники забезпечують розрізненість до 0,3 м/піксель, що дозволяє ідентифікацію дрібних об'єктів. Космічні дані стали доступнішими та економічно вигіднішими, а їх якість постійно зростає.

Україна отримує ДЗЗ-дані із супутників NOAA, Meteosat, Terra, Aqua, Sentinel-2, Landsat 8–9, а також від комерційних апаратів високої розрізненості – WorldView-3, GeoEye-1, Pleiades Neo, PlanetScope, SkySat, Kompsat-3, SPOT 7, ALOS/PRISM, RapidEye, EROS-B, QuickBird та ін. Розвивається й національна програма ДЗЗ.

Фотограмметричні етапи створення ЦМР:

1. Визначення елементів взаємного орієнтування за не менш як п'ятьма парами точок.
2. Побудова стереомоделі з довільним масштабом.
3. Зовнішнє орієнтування моделі за опорними точками.
4. Розрахунок просторових координат та формування цифрової 3D-моделі рельєфу.

2020–2025 роки характеризуються впровадженням автоматизованої обробки стереозображень у Pix4D Mapper, Agisoft Metashape, Erdas Imagine, SOCET GXP, Trimble Inpho, RealityCapture. Ці системи виконують автоматичне знаходження зв'язкових точок, блокове вирівнювання, побудову щільних хмар точок, створення ортомозаїк та ЦМР. Завдяки поєднанню ДЗЗ, фотограмметрії та алгоритмів AI точність сучасних систем досягає 5–10 см у плані та 10–20 см за висотою, що відповідає вимогам планів масштабів 1:5 000–1:10 000.

У підсумку, створення стереомоделей місцевості на основі аеро- та космічних знімків залишається ключовим напрямом геодезії та картографії,

забезпечуючи високу точність, оперативність та універсальність даних для наукових, інженерних і природоохоронних завдань. В ідеальному випадку знімання аерознімки горизонтальні і паралельні базису фотографування, а їх головні базисні площини співпадають з площиною XZ. Отже, висоту точки місцевості можна визначити за формулою:

$$h = \frac{H_A \Delta p^0}{p_a^0 + \Delta p^0} \quad (1.1)$$

де H_A - висота фотографування над початковою точкою А;

Δp^0 - різниця поздовжніх паралаксів;

p^0 - паралакс початкової точки.

При вирішенні багатьох задач вираз в знаменнику можна замінити середнім базисом фотографування, що можливо коли місцевість рівнинна. Тоді:

$$h = \frac{H_A \Delta p}{b_{cp}} \quad (1.2)$$

Основними перевагами створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) фотограмметричним методом є: швидке отримання актуальних і ретроспективних матеріалів дистанційного зондування Землі; високий рівень автоматизації моделювання завдяки сучасним цифровим системам і програмному забезпеченню; значна просторово-геометрична точність, що забезпечує використання результатів у топографії, землеустрої, геодезії та інженерії.

Одним із найефективніших засобів знімання місцевості сьогодні є безпілотні літальні апарати (БПЛА) – літальні пристрої без екіпажу, здатні виконувати автономні або дистанційно керовані польоти. Керування здійснюється за допомогою бортових навігаційно-програмних систем або через радіоканали у дискретному чи безперервному режимі.

Методика обробки фотограмметричних матеріалів, отриманих з БПЛА, подібна до класичної обробки аерофотознімків із пілотованих літальних апаратів, однак має низку особливостей. Через невеликі розміри та масу

безпілотники більш чутливі до метеорологічних факторів - швидкості вітру, турбулентності, опадів, що впливає на стабільність польоту та якість знімків.

Більшість БПЛА оснащені малоформатними некаліброваними камерами, що знижує точність внутрішнього орієнтування. Похибки просторової моделі частково усуваються завдяки наземним контрольним точкам або додатковій калібруванню під час обробки. Попри певні обмеження, використання БПЛА має низку очевидних переваг: гнучкість планування польотів і можливість повторного знімання невеликих ділянок; зниження вартості польових робіт; оперативне отримання детальних цифрових моделей рельєфу та ортофотопланів.

Класифікація БПЛА та напрями використання. За принципом керування безпілотні літальні системи (БПЛС) поділяють на: некеровані – виконують політ за заздалегідь заданою траєкторією; автоматичні – працюють автономно на основі вбудованих навігаційних систем; дистанційно-пілотовані – контролюються оператором у реальному часі через радіо- чи супутникові канали.

БПЛА широко застосовуються у військовій сфері для повітряної розвідки завдяки мобільності, тривалості польоту та невисокій вартості експлуатації. У цивільних галузях дрони використовують там, де застосування пілотованих апаратів економічно або технічно недоцільне. Основні напрями їх використання: моніторинг земної, водної та повітряної поверхні; екологічний контроль стану природних ресурсів і забруднення довкілля; підтримка навігаційних і комунікаційних систем; контроль судноплавства; логістичні операції та доставка вантажів; створення фото- та відеоматеріалів для картографування, інженерних, будівельних, археологічних і сільськогосподарських цілей.

Отже, БПЛА завдяки універсальності, економічності та можливості інтеграції з геоінформаційними системами (ГІС) посідають важливе місце у сучасних технологіях дистанційного зондування Землі та створенні цифрових моделей рельєфу.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ

2.1 Поняття інтерполяції поверхонь

У цьому розділі розглянуто сучасні методи створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) із використанням програмного забезпечення Surfer. Побудова безперервних поверхонь за дискретними даними ґрунтується на просторовій інтерполяції, яка перетворює набір вимірних точок у суцільну модель.

Surfer від Golden Software є одним із найпоширеніших інструментів для аналізу та візуалізації просторових даних завдяки доступності, простому інтерфейсу й високій точності. Широкий набір функцій зробив програму фактичним стандартом геоінформаційного моделювання. Формати Surfer підтримуються більшістю сучасних ГІС-систем, зокрема ArcGIS, QGIS та Global Mapper.

У Surfer кожен метод інтерполяції має власні параметри, частина яких є спільними, що полегшує порівняння результатів. У версії 16 реалізовано 12 методів інтерполяції, серед яких: Kriging, Inverse Distance to a Power, Radial Basis Function, Minimum Curvature, Nearest Neighbor, Local Polynomial, Triangulation with Linear Interpolation, Natural Neighbor, Moving Average тощо. Вибір методу залежить від структури даних і характеру моделюваної поверхні.

Гнучкість у виборі алгоритму дає можливість отримати найбільш точну модель для різних типів рельєфу – гірського, рівнинного чи комбінованого. Також у програмі передбачено побудову моделей рельєфу зі стереопар аерофотознімків, що автоматизує формування ЦМР із фотограмметричних даних. У новіших версіях (Surfer 23–24) підтримується імпорт хмар точок із БПЛА та LiDAR, що значно підвищує деталізацію моделей.

Інтерполяція – це математичне відновлення значень функції у проміжних точках за відомими спостереженнями. За припущення лінійної зміни функції її графік подається ламаною лінією між сусідніми точками. Для опису просторових явищ використовують просторову змінну $Z = Z(X, Y)$, де Z – показник (висота,

температура, вологість), а X і Y – координати точки. Суть інтерполяції полягає у прогнозуванні значень у невідомих точках за наявними вимірюваннями. Оскільки виконати вимірювання у всіх місцях неможливо, застосовують вибірки даних, що містять необхідні показники.

Основні типи вибірок: випадкова – кожна точка має однакову ймовірність бути вибраною; регулярна – здійснюється за заданим кроком; упорядкована – формується для територій із різними властивостями (наприклад, різні геоморфологічні ділянки). На рисунку 2.1 показано приклади вибіркової та регулярної вибірки точок та їхній вплив на точність побудови ЦМР.

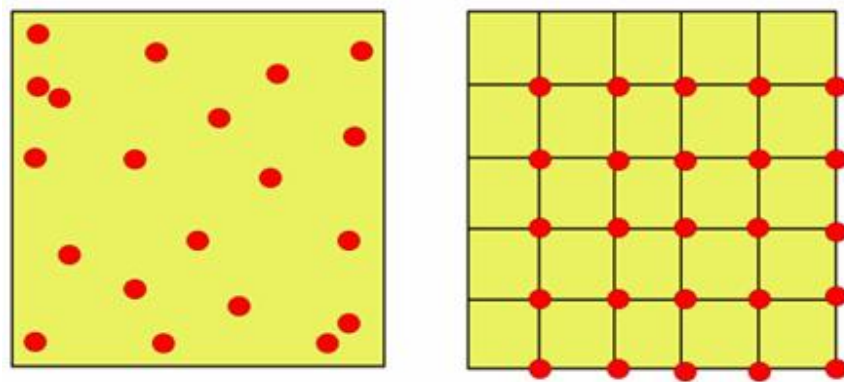


Рис. 2.1. Випадкова та регулярна вибірки відповідно

Задача інтерполяції полягає в тому, щоб за відомими значеннями функції у фіксованих точках відтворити її у вигляді аналітичної залежності або цифрової моделі, що охоплює весь діапазон аргументів. Оскільки множина можливих функцій, здатних задовольнити набір дискретних спостережень, є невизначеною, для коректного розв'язання задачі потрібно обрати тип функції чи модель, що описує просторову поведінку даних.

Методи інтерполяції поділяються на дві основні групи – детерміновані та геостатистичні.

1. Детерміновані методи. Ці методи використовують математичні функції без випадкової складової та прогнозують значення у невідомих точках відповідно до геометрії просторових даних. До них належать:

- *Глобальні та локальні поліноміальні методи* – формують згладжені поверхні, де локальні моделі краще адаптуються до дрібномасштабних змін рельєфу.

- *IDW* – визначає значення як зважену середню сусідніх точок із урахуванням відстані.
- *RBF* – створює плавні моделі на основі відстаневих функцій.
- *Barrier Interpolation* – враховує природні та техногенні перешкоди.
- *Diffusion Kernel i Kernel Smoothing* – виконують моделювання за принципом фізичної дифузії та згладжування шумів.

У версіях Surfer 23–24 користувач може комбінувати параметри детермінованих методів (радіус впливу, згладжування тощо), оптимізуючи точність моделі.

2. Геостатистичні методи. Геостатистичні підходи базуються на імовірнісних моделях, що враховують просторову автокореляцію. Найпоширенішим методом є **крігінг**, який оцінює і прогноз, і статистичну похибку.

Основні різновиди крігінгу:

- *Ordinary, Simple, Universal Kriging* – залежно від відомості середнього значення та наявності тренду.
- *Indicator Kriging* – для категоріальних змінних.
- *Імовірнісний, диз'юнктивний та полігональний крігінг* – для даних зі складною структурою.
- *Empirical Bayesian Kriging (EBK)* – автоматично визначає параметри варіограми.

Завдяки точності та можливості оцінки невизначеності геостатистичні методи широко застосовують у геології, гідрології, екології та під час створення ЦМР.

3. Точні та неточні методи. Методи також класифікують за відповідністю вихідним даним:

- *Точна інтерполяція* – результати збігаються з вимірюваннями (*IDW*, триангуляція).
- *Неточна або згладжувальна* – допускає відхилення для отримання плавнішої поверхні (*RBF*, згладжений крігінг).

4. Налаштування параметрів і оцінка якості. Якість побудованої поверхні залежить від кількості та просторового розподілу точок. У Surfer можна регулювати кількість точок, що враховуються під час розрахунку, або встановлювати радіус пошуку, забезпечуючи баланс між точністю та швидкістю.

5. Критерії ефективності програмних засобів. Ефективність інтерполяційного програмного забезпечення визначають: різноманітність доступних методів; можливості тонкого налаштування параметрів; наявність засобів перевірки точності (RMS Error, Cross-Validation); функції експертного коригування моделей.

Сучасні ГІС-системи (Surfer 24, ArcGIS Pro, QGIS 3.36) підтримують автоматичну оцінку похибок та побудову карт невизначеності, що дозволяє повноцінно оцінити достовірність цифрової моделі рельєфу.

Метод зворотно-зважених відстаней (Inverse Distance to a Power) – це алгоритм просторової інтерполяції, у якому значення в невідомій точці визначаються як зважена сума відомих значень, причому ваги зменшуються зі збільшенням відстані. Метод ґрунтується на припущенні, що близько розташовані об'єкти мають подібніші властивості, ніж віддалені. Значення кожного осередку растра розраховується як середньозважене значень точок, що потрапляють у задану околицю: чим менша відстань до центру комірки, тим більший внесок точки у результат. Оцінка змінної Z визначається формулою (2.1):

$$Z_0 = (\sum w_i z_i) / (\sum w_i), \quad (2.1)$$

де Z_0 – інтерпольоване значення; z_i – значення опорних точок; w_i – ваги, обернено пропорційні відстані.

Вплив точки зменшується зі збільшенням відстані, а значення ваг обчислюють за формулою (2.2):

$$w_i = 1 / (d_{i0} + \delta)^\beta, \quad (2.2)$$

де d_{i0} – відстань між точкою оцінки та точкою вимірювання; δ – параметр згладжування; β – степеневий коефіцієнт.

Степеневий параметр β визначає швидкість спадання ваги: великі значення β підсилюють вплив найближчих точок, а малі – роблять поверхню більш вирівняною. Параметр δ дозволяє врахувати похибки: при $\delta = 0$ метод є точним, при $\delta > 0$ – згладжувальним. Для цього методу характерний ефект «волових очей» – концентричні контури навколо точок вибірки. Його можна частково усунути збільшенням δ , але це знижує відповідність вихідним даним. Метод є обчислювально простим і добре працює за рівномірного розподілу точок. Приклад ЦМР, створеної методом IDW, наведений на рис. 2.2.

Методи крігінгу – Крігінг (Kriging) – це сучасний метод просторової інтерполяції, який дозволяє за відомими значеннями в окремих точках поверхні обчислювати прогнозовані значення у проміжних місцях. Його основу становить варіограмний аналіз, що визначає ступінь просторової кореляції між точками вимірювань. Метод розроблено у 1970-х роках південноафриканським геостатистиком Д. Дж. Кріге (D.J. Krige) і він широко застосовується для побудови цифрових моделей рельєфу, карт концентрацій та інших просторових полів. Особливістю крігінгу є врахування не лише відстані між точками, а й їхнього взаємного розташування, що забезпечує більш точну оцінку значень. При цьому ближчі точки вважаються більш корельованими, а отже, отримують менші вагові коефіцієнти. У сучасних програмних продуктах, таких як Surfer 16, ArcGIS Pro та QGIS, реалізовано декілька варіантів методу, які базуються на лінійних оцінках.

1. Розрізняють три основні форми крігінгу:

- простий крігінг – використовується, якщо відоме математичне сподівання випадкової функції Z ;
- ординарний крігінг – математичне очікування невідоме, але постійне;
- універсальний крігінг – математичне очікування невідоме і змінюється в межах області дослідження.

Крім цих варіантів, застосовується також кокрігінг – метод, що враховує додаткові просторово корельовані змінні. Методи крігінгу та кокрігінгу найбільш поширені в геології, сейсмології, гідрогеології, екології та

дистанційному зондуванні. Вони забезпечують високу точність прогнозу у порівнянні з іншими методами інтерполяції, особливо для складних поверхонь.

Формула (2.3) крігінгу має вигляд:

$$Z_0 = \sum (\lambda_i \times Z(s_i)), \quad (2.3)$$

де $Z(s_i)$ - виміряне значення у точці i ; λ_i - ваговий коефіцієнт точки i ; s_0 - точка, у якій здійснюється прогноз; N - кількість виміряних точок.

Для застосування методу необхідно побудувати варіограму - функцію, що описує залежність різниці між значеннями опорних точок від відстані між ними. Варіограма визначає ступінь просторової залежності даних і є ключовим елементом при побудові моделі крігінгу.

2. Основні етапи побудови геостатистичної моделі включають:

- аналіз і попередню обробку даних (усунення трендів, декластеризація, аналіз анізотропії);
- розрахунок емпіричної варіограми або коваріації;
- побудову теоретичної моделі варіограми;
- розв'язання системи рівнянь крігінгу для визначення вагових коефіцієнтів;
- отримання прогнозованого значення та оцінку похибки у кожній точці сітки.

Метод крігінгу може бути як точним, так і згладжувальним інтерполятором - залежно від вибраних параметрів. Його перевагою є можливість врахування анізотропії, просторових трендів і випадкових похибок. Завдяки цим властивостям крігінг рекомендований для створення цифрових моделей рельєфу у Surfer і використовується за замовчуванням у більшості геоінформаційних систем. Метод крігінгу демонструє високу ефективність у відновленні океанологічних, атмосферних та геофізичних полів, де просторові закономірності виражені складно. Порівняно з методом зворотно-зважених відстаней, крігінг забезпечує більш гладкі поверхні та точніше відображає природну варіацію значень. ЦМР, побудована методом «Крігінг», наведена на рис. 2.3.

Метод «Мінімальної кривизни» (Minimum Curvature) широко застосовується у геології, геофізиці та гідрології для створення згладжених поверхонь, що наближено повторюють значення опорних точок. Його принцип полягає у формуванні гладкої моделі з мінімальною кривизною, яка водночас відображає основні просторові закономірності даних.

У програмі Surfer цей метод формує найгладшу можливу поверхню за допомогою математичної функції, здатної проходити через вихідні точки або бути частково регуляризованою. Розрізняють два варіанти побудови поверхні: сплайн натягу – точно проходить через опорні точки; регуляризований сплайн – допускає відхилення від значень Z для сильнішого згладження.

Метод не є точним інтерполятором, тому може створювати локальні артефакти або додаткові ізолінії там, де опорних точок недостатньо. Алгоритм складається з двох етапів: локальної інтерполяції – для вузлів, близьких до вихідних точок, та глобальної екстраполяції – для формування цілісної поверхні. У Surfer користувач може задавати параметри збіжності, зокрема Max Residuals, що визначає допустиму нев'язку. Рекомендовано встановлювати його на рівні близько 10% точності вимірювань. Ітерації тривають до моменту, коли максимальна похибка стає меншою за поріг.

Метод «Мінімальної кривизни» найефективніший для моделювання плавних поверхонь – рельєфів із незначною розчленованістю або полів концентрацій у повітрі та воді. Завдяки гладким і природним результатам він є одним із найпоширеніших інструментів для побудови цифрових моделей рельєфу. Цифрову модель рельєфу, отриману цим методом, наведено рис. 2.4.

Модифікований метод Шепарда ("Modified Shepard's Method") є удосконаленим варіантом інтерполяції, що походить від методу зворотних відстаней. Як і в класичному IDW, ваги визначаються за відстанню, однак для побудови інтерполяційної поверхні застосовується метод зважених найменших квадратів. Це дає змогу суттєво зменшити ефект концентричних ізоліній («волових очей»), характерний для стандартного підходу.

Значення змінної Z у точці (X_0, Y_0) визначають як середньозважене значення локальних апроксимуючих функцій. При цьому підсумовування виконується не по всіх точках вибірки, а лише по Tlw найближчих сусідах. Параметр Tlw задає ступінь локальності методу, визначаючи, скільки сусідніх точок беруть участь у розрахунку.

На відміну від звичайного IDW, у методі Шепарда усереднюються не самі значення Z , а результати квадратичних апроксимуючих функцій, побудованих навколо кожної опорної точки. У Surfer такі функції мають вигляд квадратичного полінома, а їхні коефіцієнти визначаються методом зважених найменших квадратів. Ваги розраховуються за спеціальною функцією, де параметр Kq контролює локальність: зі збільшенням Kq вплив віддалених точок зменшується.

Такий підхід усуває ефект «волових очей» і забезпечує точну інтерполяцію, оскільки поверхня точно проходить через опорні точки. У програмі Surfer реалізовано можливість застосування параметра згладжування β , завдяки якому метод може працювати і як згладжувальний інтерполятор: при $\beta = 0$ інтерполяція є точною, а при $\beta \rightarrow 1$ поверхня стає більш вирівняною.

Попри переваги, модифікований метод Шепарда не завжди коректно описує просторові закономірності, особливо для складних екологічних або гідрогеологічних полів, і може генерувати артефакти у зонах з недостатньою кількістю вихідних даних. Цифрову модель рельєфу, побудовану цим методом, наведено на рис.2.5.

Метод природної околиці (Natural Neighbor). Метод інтерполяції «Природної околиці» (Natural Neighbor) базується на визначенні середньозваженого значення локальних даних, що обчислюється за допомогою координат природної околиці, сформованих полігонами Тіссена (діаграмами Вороного) [9]. Основна ідея полягає в тому, що значення змінної Z у заданій точці визначають як зважене середнє значень у найближчих вибіркових точках. Ваги формуються відповідно до геометрії діаграм Вороного, які відображають просторовий вплив кожної точки.

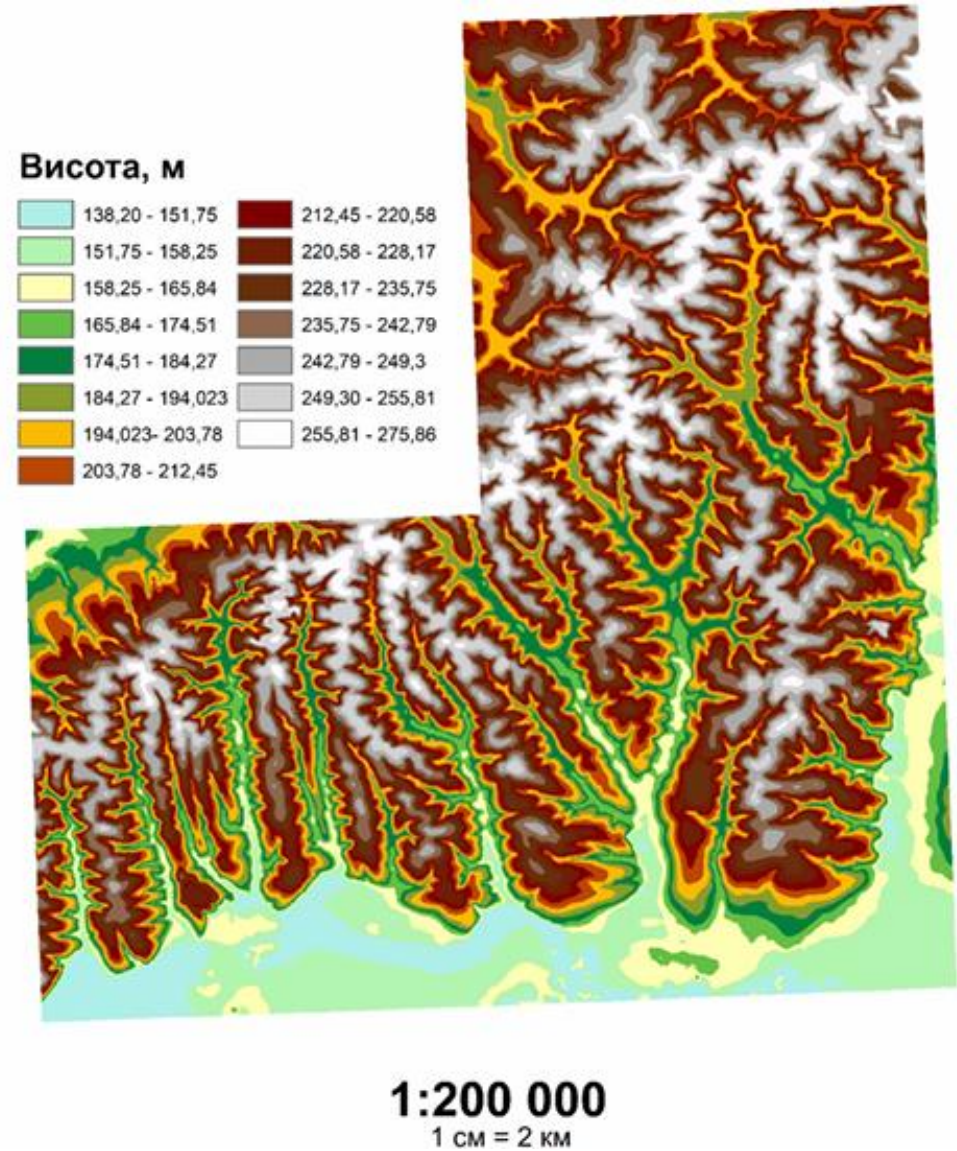
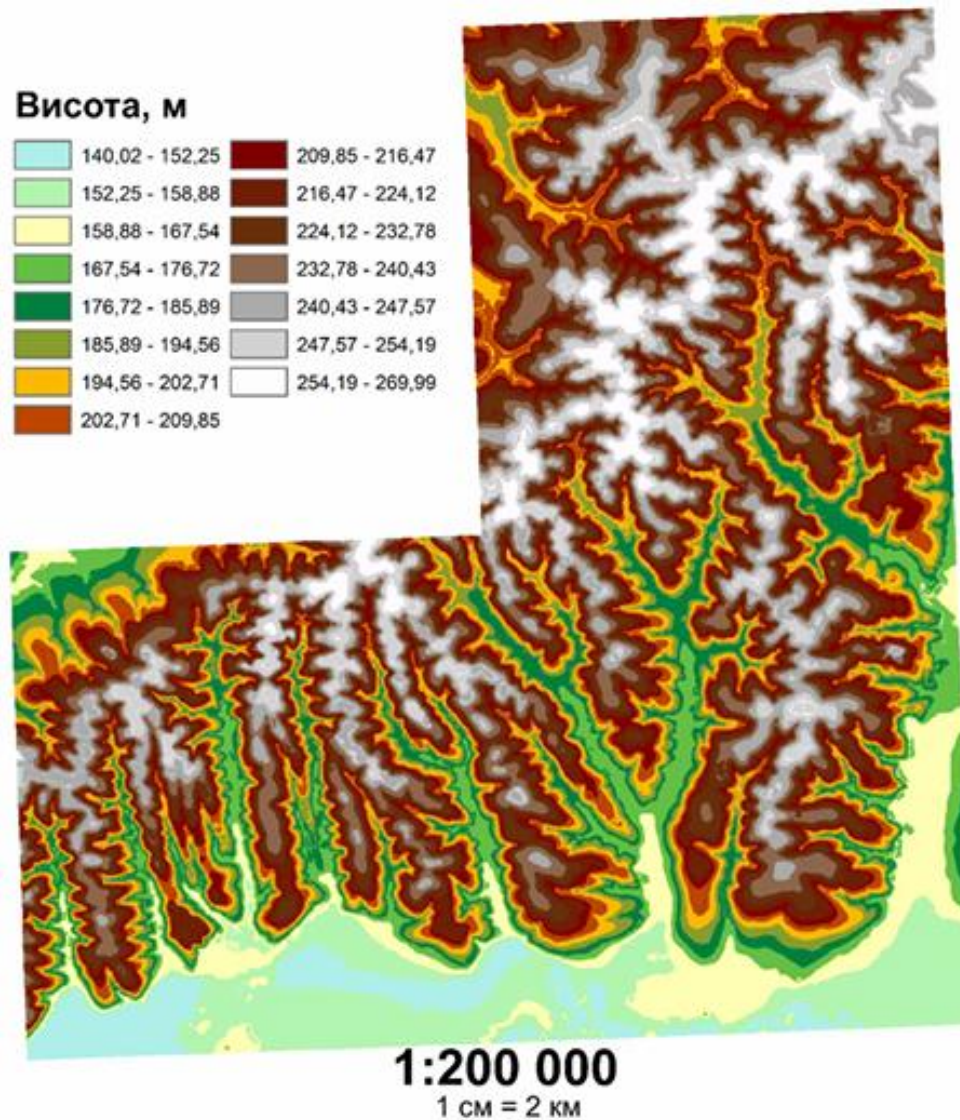


Рис. 2.2 ЦМР побудована методом «Inverse Distance to a Power» в програмі Surfer

Рис. 2.3 ЦМР побудована методом «Krining» в програмі Surfer

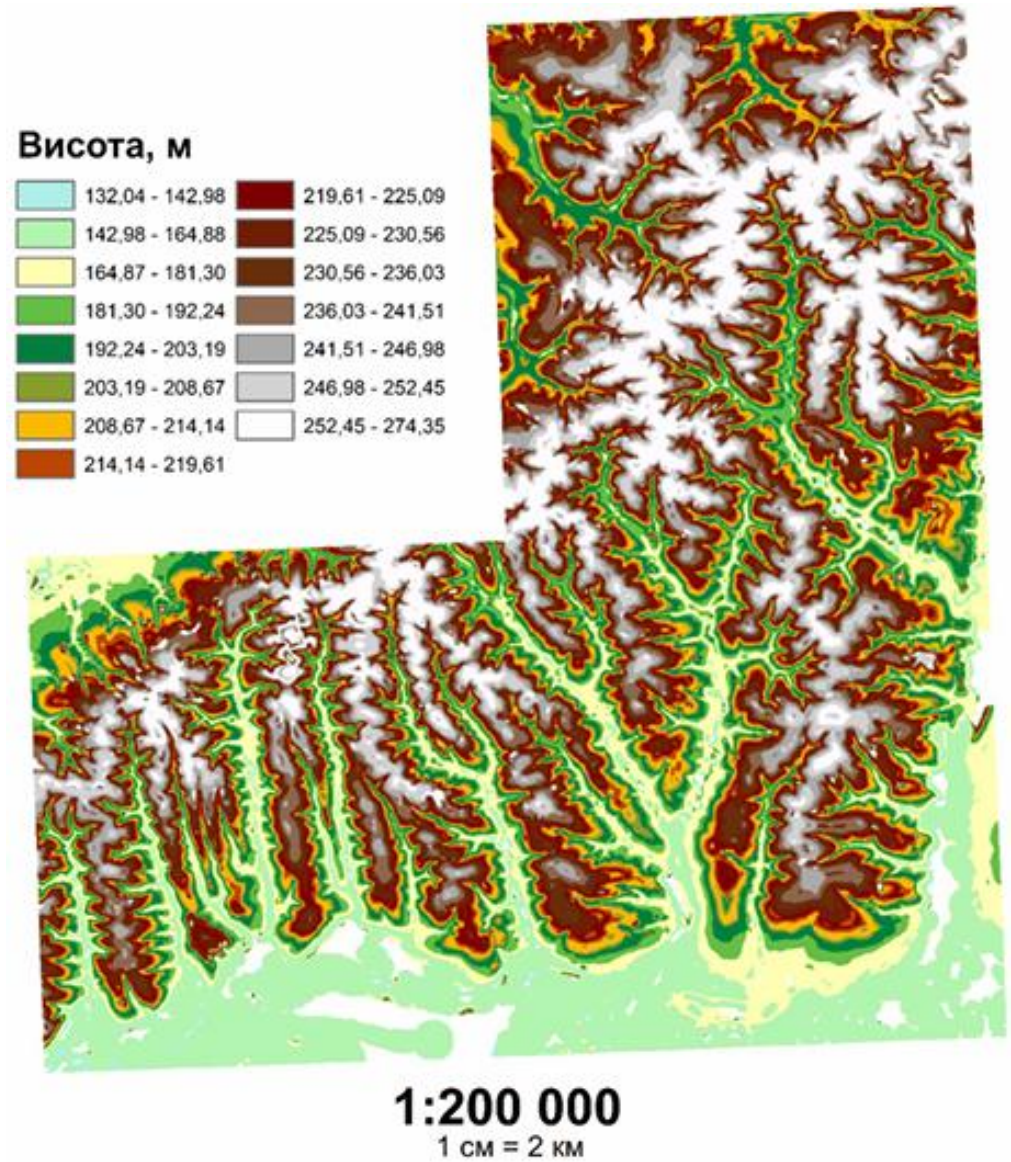
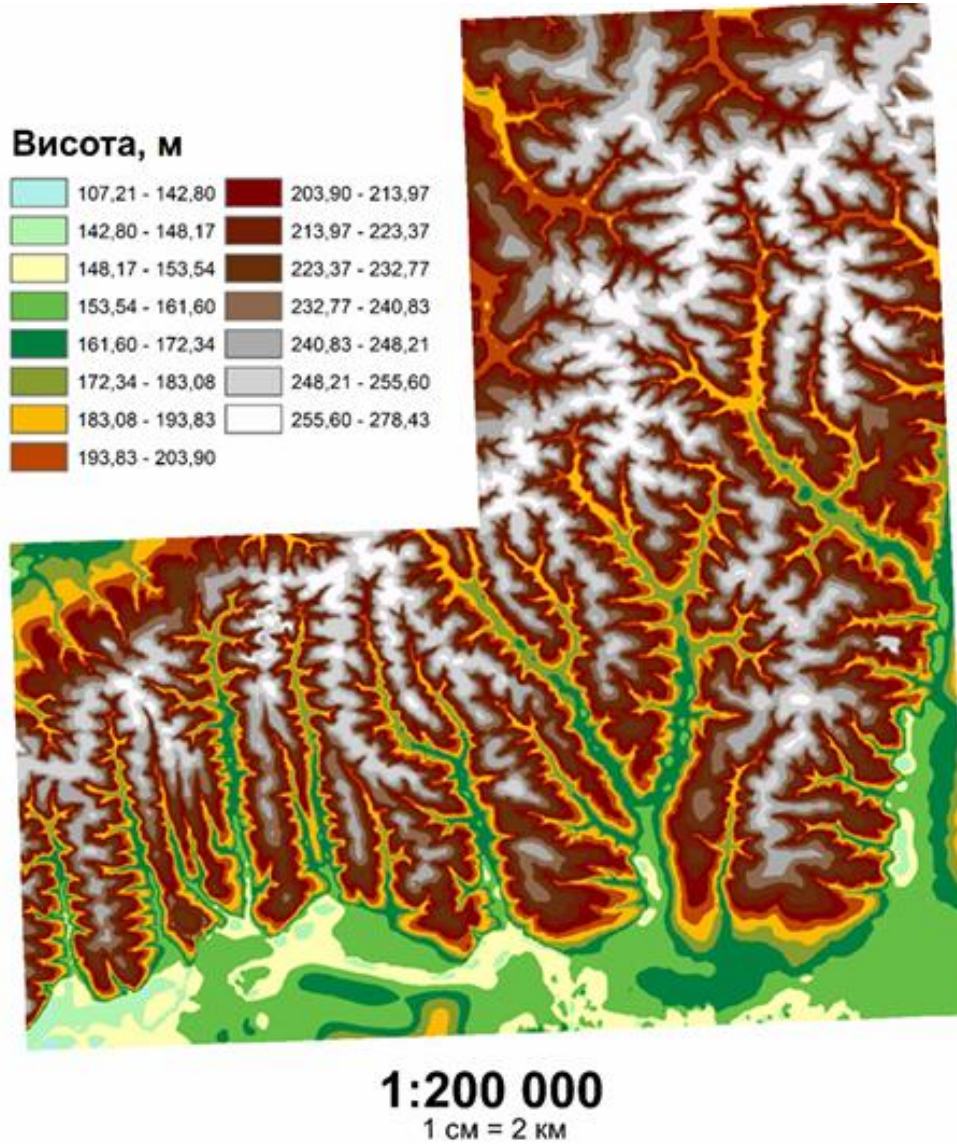


Рис. 2.4 ЦМР побудована методом «Minimum Curvature» в програмі Surfer

Рис. 2.5 ЦМР побудована методом «Modified Shepard's Method» в програмі Surfer

Полігони Тіссена представляють собою багатокутники, у межах яких кожна точка простору є найближчою до свого центрального об'єкта, ніж до будь-якого іншого [2]. Ці структури широко використовують для просторового аналізу близькості та сусідства (рис. 2.6). Діаграми Вороного тісно пов'язані з триангуляцією Делоне: з'єднавши центри сусідніх полігонів, утворюємо трикутники Делоне (рис. 2.7). Разом ці моделі є основою багатьох алгоритмів просторової інтерполяції.

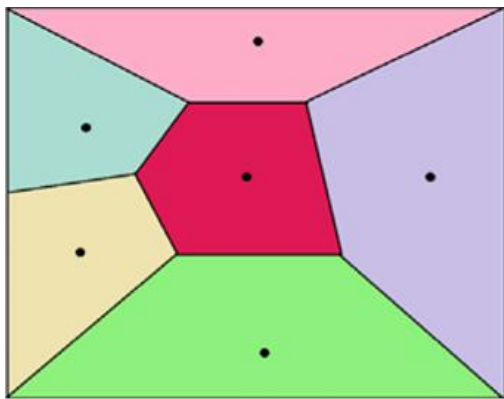


Рис. 2.6. Полігони Тіссена

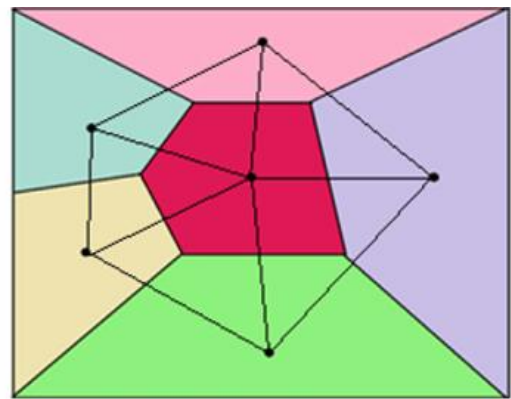


Рис. 2.7. Триангуляція Делоне

Алгоритм методу Natural Neighbor включає такі етапи: 1) визначення найближчих точок вихідних даних; 2) побудова локальної діаграми Вороного; 3) обчислення ваг залежно від зміни площ після додавання нової точки; 4) отримання інтерпольованого значення Z за зваженою сумою [45]. Метод природної околиці забезпечує створення якісних ізолінійних карт, особливо за неоднорідної густоти вибірових точок. Значення у будь-якій позиції залишаються в межах діапазону сусідніх даних, тому модель не створює штучних локальних екстремумів. Крім того, метод є точним інтерполятором: побудована поверхня проходить через усі вихідні точки. Цифрову модель рельєфу, отриману за цим методом, наведено на рис. 2.8.

Метод найближчого сусіда (Nearest Neighbor). Метод найближчого сусіда – один із найпростіших методів інтерполяції, який використовується для оцінки значень змінної у точках, де вимірювання відсутні. Ідея методу полягає в тому, що значення у довільній точці області дослідження приймається рівним значенню найближчої опорної точки.

Основні особливості методу. **Вагові коефіцієнти:** вага найближчого сусіда дорівнює 1, всіх інших точок – 0; для побудови поверхні враховується лише одна точка, яка є найближчою до оцінюваної.

Структура поверхні: інтерпольована поверхня набуває ступінчастого характеру, утворюючи дискретну структуру; перехід між зонами даних різкий, без плавних градієнтів, що може бути недоліком при створенні гладких моделей рельєфу.

Обмеження та застосування: найбільш ефективний при регулярному розташуванні вибірових точок, наприклад, у вузлах сітки; може використовуватися за умов невеликої нерегулярності розташування точок, якщо крок растрової моделі близький до кроку вибіркової сітки; не підходить для побудови **гладких цифрових моделей рельєфу** або поверхонь із плавними переходами, оскільки не враховує віддалені точки і не забезпечує згладжування.

Переваги: простота реалізації; обчислювальна ефективність; гарантоване проходження поверхні через вихідні точки (точний інтерполяційний метод).

Недоліки: ступінчаста поверхня, яка не відображає плавні зміни; можлива поява «штучних меж» між зонами даних; невідповідний для моделей, де важлива візуальна гладкість, наприклад, для рельєфу або розподілу концентрацій речовин.

Метод найближчого сусіда зазвичай застосовується у геоінформаційних системах (GIS) для швидкої побудови растрових моделей, коли потрібно зберегти точні значення опорних точок і немає вимог до згладженості поверхні.

Цифрова модель рельєфу, побудована цим методом, зазвичай демонструє різкі переходи між зонами даних і наочно ілюструє «вплив» кожної вихідної точки на навколишню область (рис. 2.9).

Поліноміальна регресія - “Polynomial Regression”. Метод *Polynomial Regression* використовується для оцінки **просторового тренду** у наборі даних, тобто для встановлення залежності досліджуваної просторової змінної (Z) від координат (X) та (Y). Цей метод **не є інтерполяційним**, оскільки побудована поверхня не проходить безпосередньо через експериментальні точки. Його

основне призначення - виявлення глобальних просторових закономірностей, що описують загальну тенденцію зміни величини, при цьому втрачається детальна локальна інформація, притаманна окремим спостереженням.

У програмному середовищі **Surfer** при виборі поліноміальної регресії користувач має можливість задати тип полінома. У діалоговому вікні, яке відкривається після натискання кнопки “*Advance Options*”, вибирається вид рівняння, за допомогою якого формується модель поверхні. У Surfer реалізовано кілька типів поліноміальних моделей [43]: **Simple planar surface** - проста плоска поверхня; **Bi-linear saddle** - білінійна (сідлоподібна) поверхня; **Quadratic surface** - квадратична поверхня; **Cubic surface** - кубічна поверхня. Опція “*User defined polynomial*” дозволяє користувачеві самостійно задати рівняння поліноміальної регресії через параметри групового вікна *Parameters*.

Рівняння поліноміальної регресії (Z) від (X) та (Y) формується за методом **найменших квадратів**, на основі всіх наявних вхідних даних. Таким чином, цей метод можна розглядати як **глобальний згладжувальний підхід**, який мінімізує суму квадратів відхилень між спостережуваними та розрахованими значеннями.

Основною метою поліноміальної регресії є моделювання **нелінійних залежностей** між незалежними та залежними змінними (зокрема, між координатами простору та середнім значенням змінної). Такий підхід дозволяє виділити головні просторові тренди, що характеризують загальний рельєф місцевості. Цифрова модель рельєфу, побудована методом “Поліноміальної регресії”, наведена в рис 2.10.

Метод радіальних базисних функцій - “Radial Basis Function”. Радіальна базисна функція (РБФ) – це група математичних методів, що застосовуються для інтерполяції просторових даних. Метод *Radial Basis Function* належить до **точних інтерполяційних методів**, проте для досягнення більш плавної та стабільної поверхні може використовуватись спеціальний параметр згладжування (*smoothing parameter*). У цьому методі оцінка змінної (Z) у довільній точці області дослідження визначається як **лінійна комбінація** значень радіальних базисних функцій, що розраховуються для всіх відомих

вибіркових точок. Радіальна базисна функція виступає **ядерною функцією**, яка визначає оптимальні вагові коефіцієнти, застосовані до вхідних даних під час інтерполяції.

У програмі **Surfer** реалізовано кілька видів радіальних базисних функцій [27]: *Multiquadric* – мультиквадратична функція; *Inverse Multiquadric* – обернена мультиквадратична функція; *Multilog* – мультилогарифмічна функція; *Thin-Plate Spline* – плоский сплайн; *Natural Cubic Spline* – кубічний сплайн природної форми.

Всі перелічені види РБФ є методами **точної інтерполяції**, оскільки побудована поверхня проходить через усі вихідні точки. Їхній підхід ґрунтується на уявному розбитті простору гіперсферами, кожна з яких визначається власним центром і радіусом.

Кожна базисна функція має свою математичну форму, що впливає на характер отриманої поверхні. Найчастіше використовується мультиквадратична функція, оскільки вона забезпечує найкраще згладження поверхні при збереженні точності проходження через експериментальні точки. Цифрова модель рельєфу, побудована методом “Радіальних базисних функцій”, наведена на рис. 2. 11.

Тріангуляція з лінійною інтерполяцією - “Triangulation with Linear Interpolation”. Тріангуляція – один із методів створення мережі опорних геодезичних пунктів і сама мережа, створена цим методом. Вона полягає у побудові рядів або мереж, де трикутники примикають один до одного, визначаючи положення їх вершин у вибраній системі координат.

Тріангуляція з лінійною інтерполяцією використовує алгоритм побудови **тріангуляції Делоне** – розбиття досліджуваної області на сукупність трикутників. У тріангуляції Делоне для уникнення зламів ізоліній на межах полігонів для кожної вихідної точки будується локальний поліном першого або другого степеня, і за допомогою тріангуляції ці локальні поліноми «склеюються» в одну гладку поверхню. При цьому виконується **умова Делоне** – всередину кола, описаного навколо будь-якого побудованого трикутника, не повинна

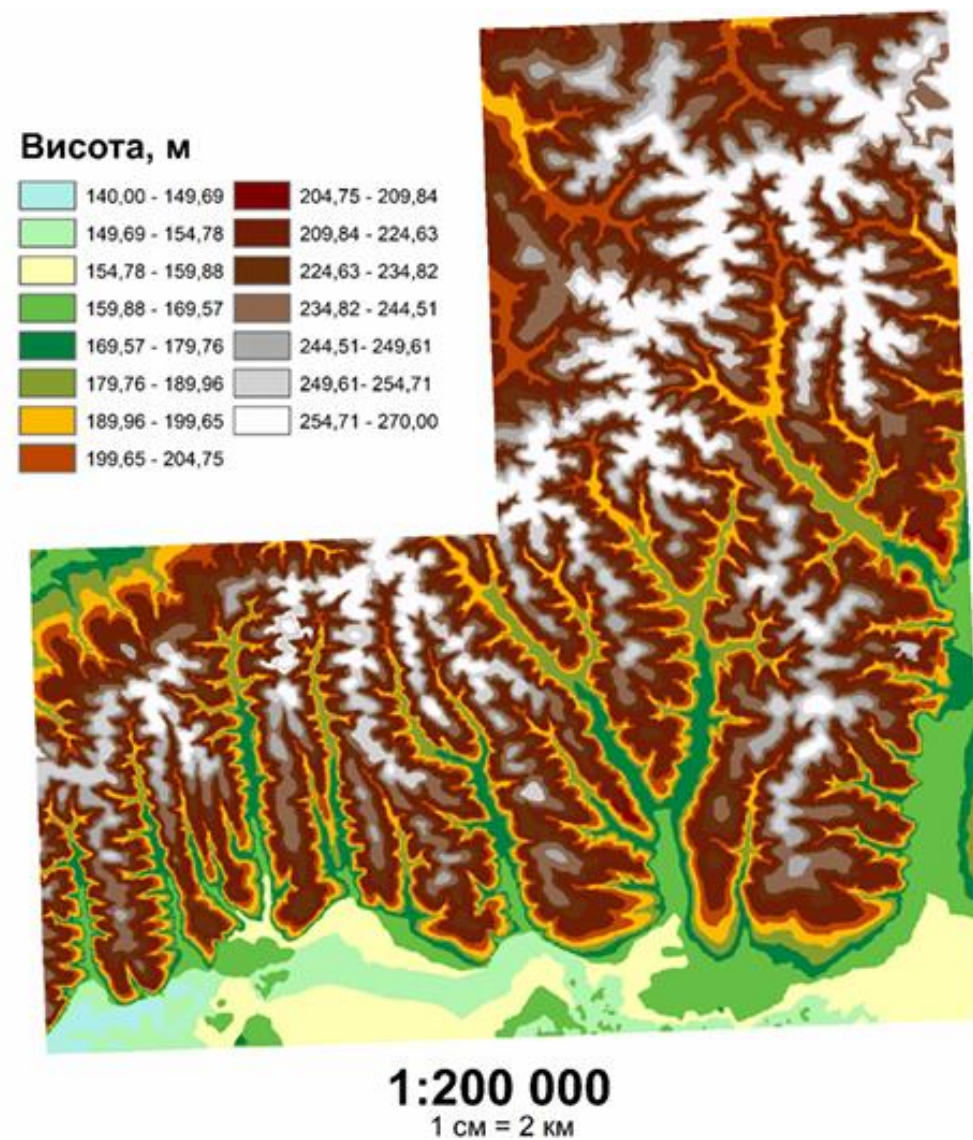
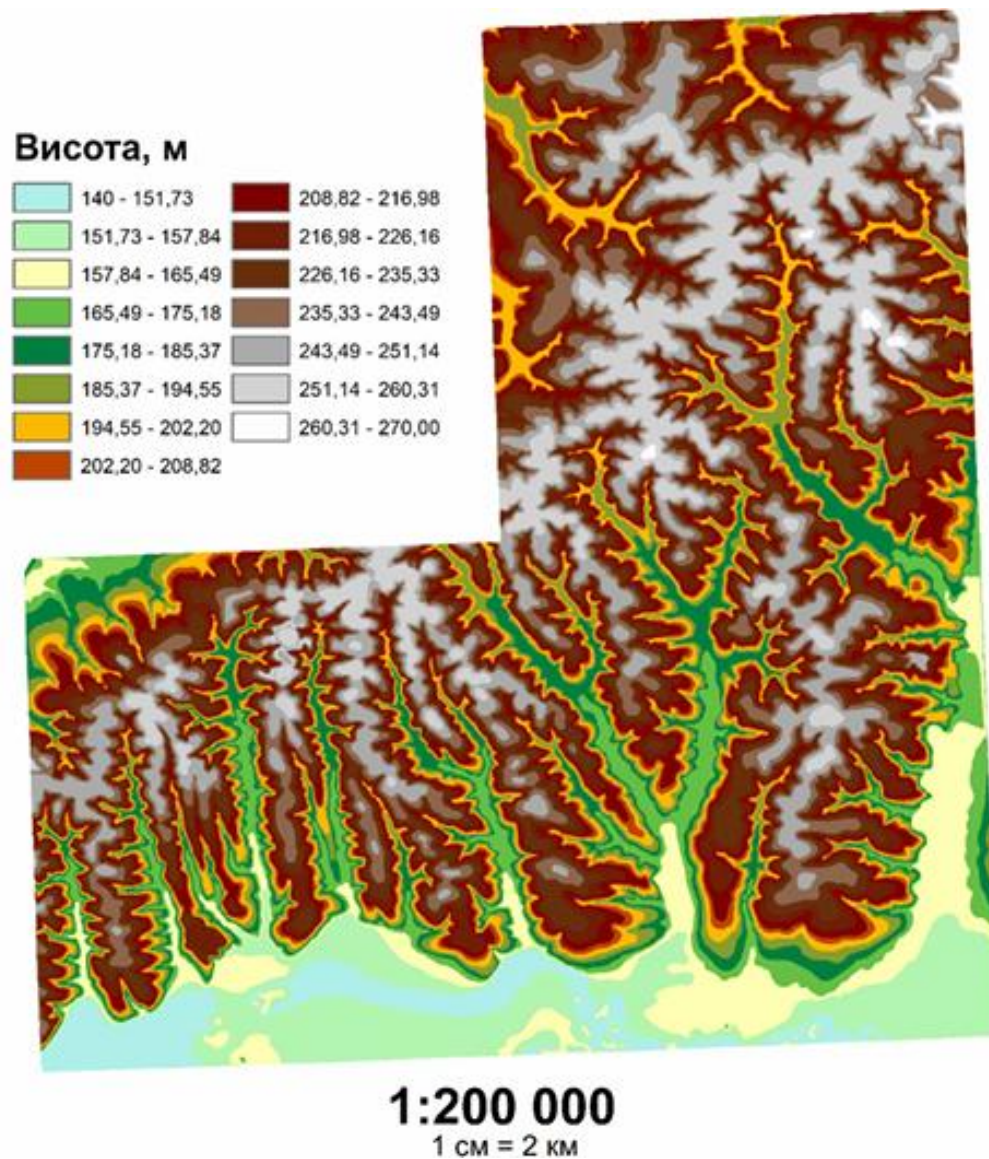


Рис. 2.8 ЦМР побудована методом «Natural Neighbor» в програмі Surfer

Рис. 2.9 ЦМР побудована методом «Nearest Neighbor» в програмі Surfer

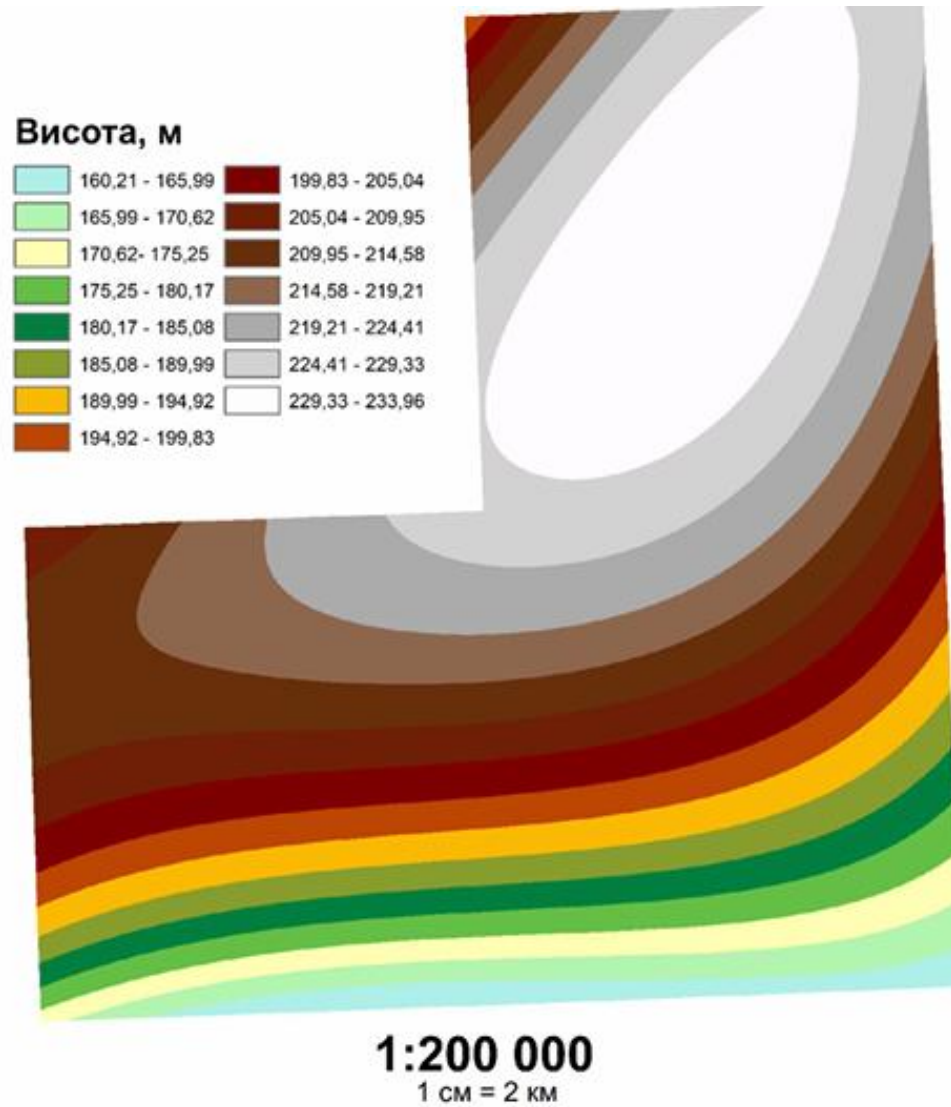


Рис. 2.10 ЦМР побудована методом «*Polynomial Regression*» в програмі Surfer

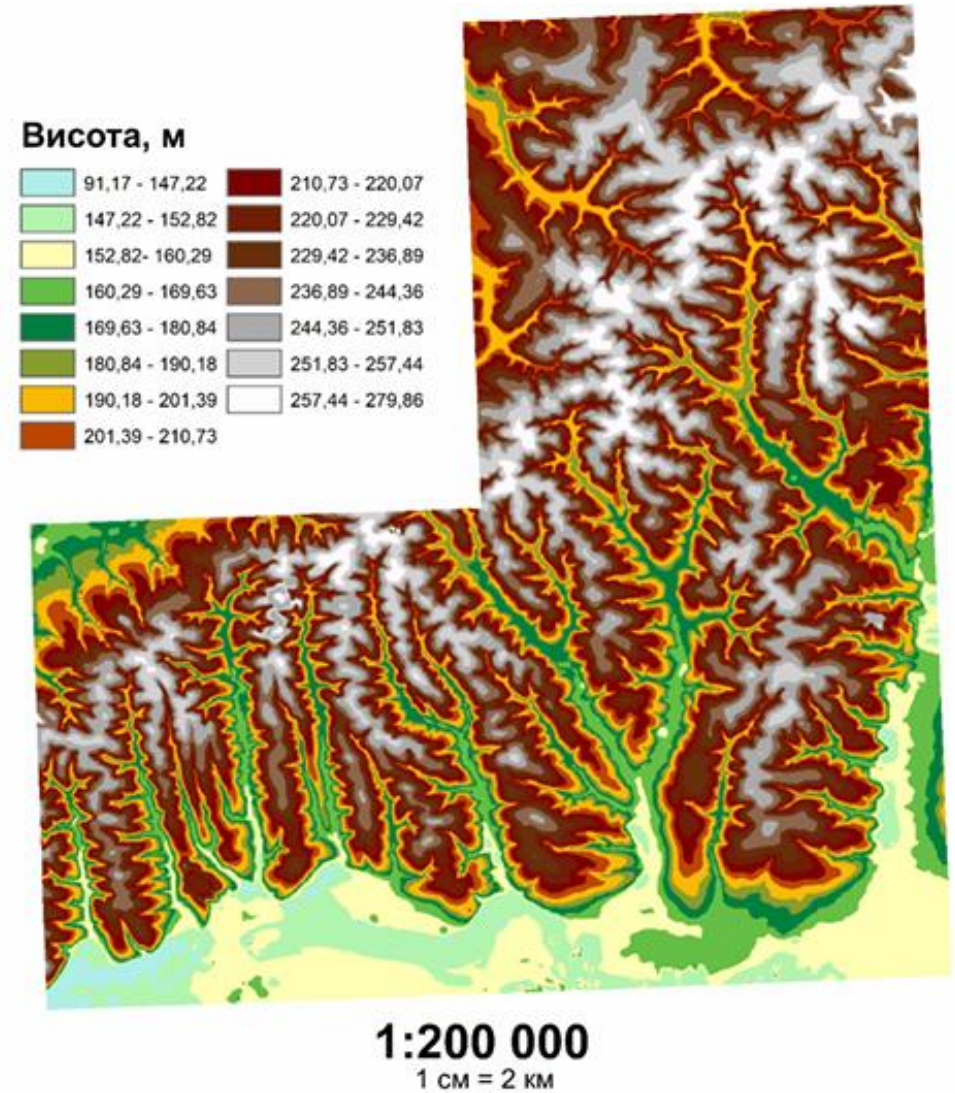


Рис. 2.11 ЦМР побудована методом «*Radial Basis Function*» в програмі Surfer

потрапляти жодна із заданих точок тріангуляції. Якщо точка знаходиться поза трикутником, алгоритм використовує значення найближчої точки або значення *NoData*.

Для оцінки змінної Z у деякій точці (X_0, Y_0) області дослідження спочатку визначають, у який трикутник вона потрапляє. Нехай інтерпольована точка потрапила в трикутник, утворений вибіровими точками з координатами (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) і (X_3, Y_3) . Тоді в тривимірному просторі (X, Y, Z) будується площина, що проходить через точки з координатами (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) та (X_3, Y_3, Z_3) . Рівняння площини має вигляд (формула 2.4) [43]:

$$Z = aX + bY + cZ = aX + bY + cZ = aX + bY + c \quad (2.4)$$

Де a, b, c - коефіцієнти рівняння площини, визначені через координати трьох вибірових точок.

Оцінкою змінної Z у точці (X_0, Y_0) буде відповідне значення на цій площині (формула 2.5):

$$Z_0 = aX_0 + bY_0 + cZ_0 = aX_0 + bY_0 + cZ_0 = aX_0 + bY_0 + c \quad (2.5)$$

Використання цього методу при невеликій кількості точок вибірки може призводити до появи видимих трикутних граней на модельній растровій поверхні або великих прямолінійних сегментів на карті ізоліній.

Тріангуляція з лінійною інтерполяцією працює краще, коли дані рівномірно розподілені по досліджуваній території. Метод точно відтворює значення у вибірових точках, тобто є **точним інтерполятором**. Також він може враховувати **анізотропію** досліджуваної змінної. Недоліком цього методу є можливі розриви на межах, що знижує наочність полів, побудованих за відновленими даними.

Цифрова модель рельєфу, побудована методом “Тріангуляція з лінійною інтерполяцією”, наведена на рис. 2.12.

Метод змінного середнього - “Moving Average”. Метод змінного середнього використовується для побудови цифрових моделей рельєфу, коли необхідно згладити випадкові коливання даних і отримати плавну поверхню за результатами вибірових вимірювань. Суть методу полягає у визначенні

значення змінної (Z) у певній точці досліджуваної області як середнього арифметичного значень у вибіркових точках, що потрапляють у зону пошуку (еліпс або коло) з центром у цій точці.

Оцінку змінної (Z) у точці $((X_0, Y_0))$ можна подати у вигляді:

$$[Z(X_0, Y_0) = \frac{1}{n_0} \sum_{i \in I_0} Z_i]$$
 де: (n_0) - кількість вибіркових точок, що потрапили до області пошуку; (I_0) - множина індексів таких точок; (Z_i) - значення змінної у вибірковій точці з координатами $((X_i, Y_i))$. Алгоритм змінного середнього в програмному середовищі **Surfer** має такі параметри [27]:

1. **radius1** – перший радіус (вісь X , якщо кут нахилу дорівнює 0) еліпса пошуку. Для використання всіх точок цей параметр приймає значення 0.

2. **radius2** – другий радіус (вісь Y , якщо кут нахилу дорівнює 0) еліпса пошуку. Для використання всіх точок цей параметр також повинен бути рівним 0.

3. **angle** – кут орієнтації еліпса пошуку в градусах (раховується проти годинникової стрілки). За замовчуванням приймає значення 0° .

4. **Minimum number of data points to use** – мінімальна кількість вибіркових точок. Якщо їх менше за задане значення, вузол ґрида вважається порожнім і заповнюється значенням *NODATA*.

5. **NODATA marker to fill empty points** – значення, яке присвоюється порожнім вузлам ґрида. За замовчуванням дорівнює 0.

Метод змінного середнього не рекомендується використовувати за невеликої кількості вибіркових даних, оскільки в такому випадку точність відновлення поверхні є низькою. Проте за наявності великих і дуже великих вибірок цей метод є ефективним інструментом аналізу просторових даних. Він дозволяє виявляти різномасштабні тренди у вибірці, забезпечує згладжування локальних флуктуацій і характеризується високою швидкістю обчислень навіть при значних обсягах інформації. Цифрова модель рельєфу, побудована методом “Змінного середнього”, наведена на рис. 2.13.

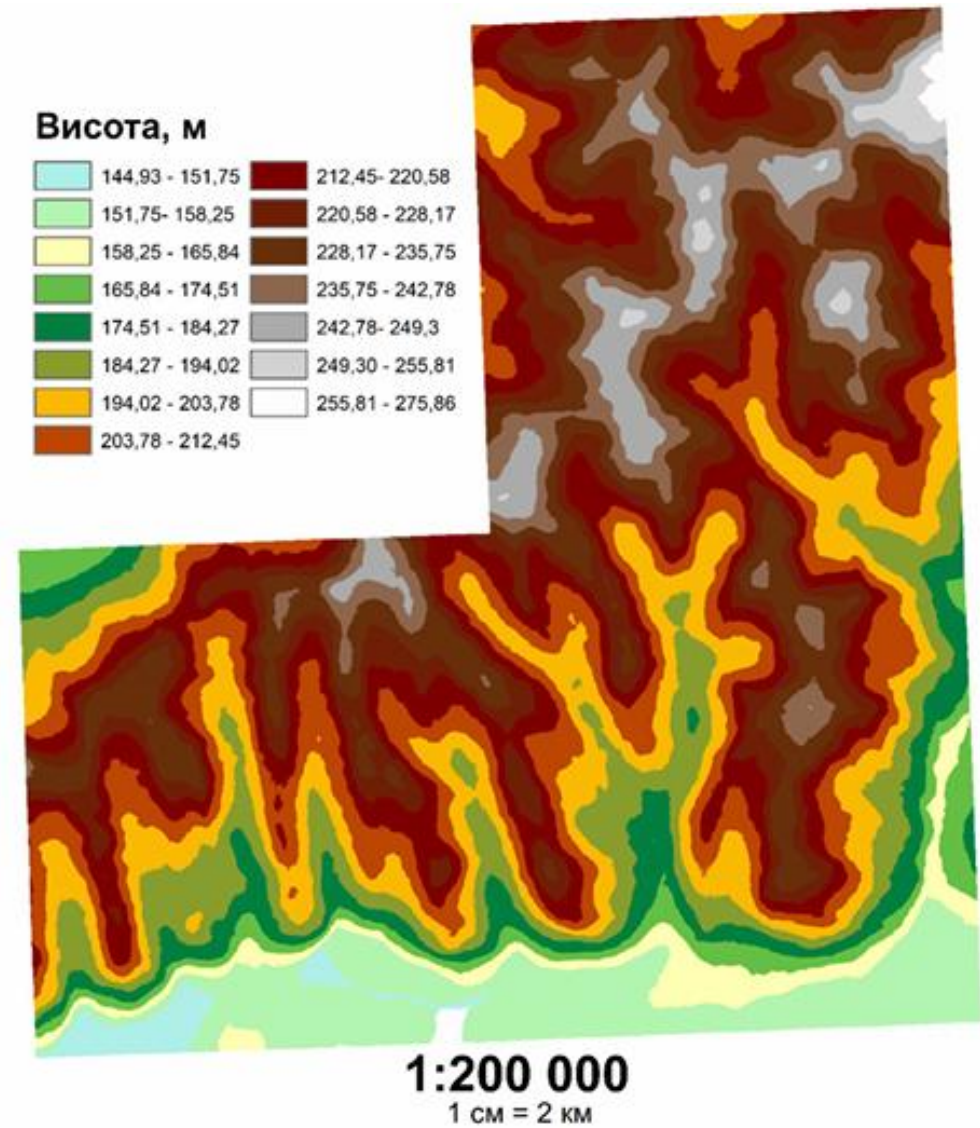
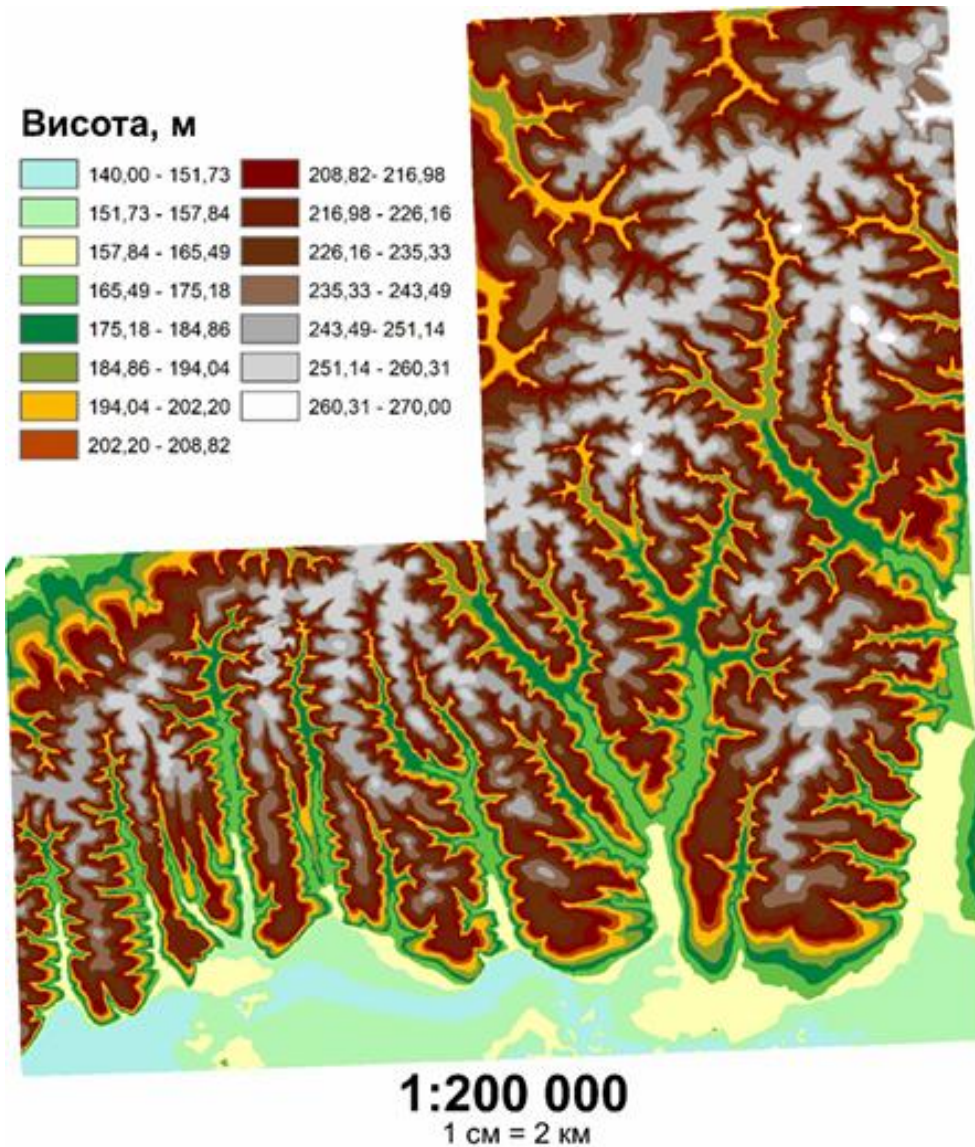


Рис. 2.12 Цифрова модель рельєфу побудована методом «Triangulation with Linear Interpolation» в програмі Surfer

Рис. 2.13 Цифрова модель рельєфу побудована методом «Moving Average» в програмі Surfer

Метод локальних поліномів – “Local Polynomial”. Метод локальних поліномів (Local Polynomial Interpolation, LPI) є помірно швидким інтерполятором, що забезпечує плавну, хоча й неточну, апроксимацію просторових даних. Він гнучкіший за глобальні поліноми, але потребує більшої кількості параметричних налаштувань. Метод оцінює залежність просторової змінної Z від координат X і Y , виконуючи поліноміальну регресію $Z(X, Y)$ для вибірових точок у межах пошукового еліпса з центром у вузлі досліджуваної території. Так формується локальне поліноміальне наближення поверхні. У Surfer можна використовувати поліноми 1–3-го ступенів [27].

Метод ефективний для моделювання локально згладжених поверхонь. Глобальний поліном 1-го порядку описує площину; 2-го — поверхню з одним вигином; 3-го — з двома. Однак у складному рельєфі з комбінацією схилів і рівнин глобальні поліноми часто недостатньо точні, тоді як локальні забезпечують реалістичніше відтворення.

На відміну від глобальних поліномів, що узгоджують одну функцію для всієї території, LPI обчислює окремий поліном для кожної локальної області. Перекриття областей гарантує безперервність поверхні. Розмір і форма зони пошуку залежать від кількості сусідніх точок і секторування [29]. Точність підвищується за умов рівномірного розміщення даних та близького до нормального розподілу значень у межах околиці.

На практиці ці вимоги часто не виконуються, що може знижувати точність, однак похибка зазвичай менша, ніж у типових методів інтерполяції.

Переваги: формування гладких поверхонь, виявлення тенденцій великого масштабу, ефективність для даних короткого діапазону.

Недоліки: порівняно невисока точність; чутливість до вибору сусідніх точок, тому бажаний попередній перегляд результатів.

Метод локальних поліномів доцільний, коли просторові дані мають локальні варіації в невеликих діапазонах, які найточніше відтворюються саме цим методом. Приклад цифрової моделі рельєфу, побудованої за LPI, наведено на рис. 2.14.

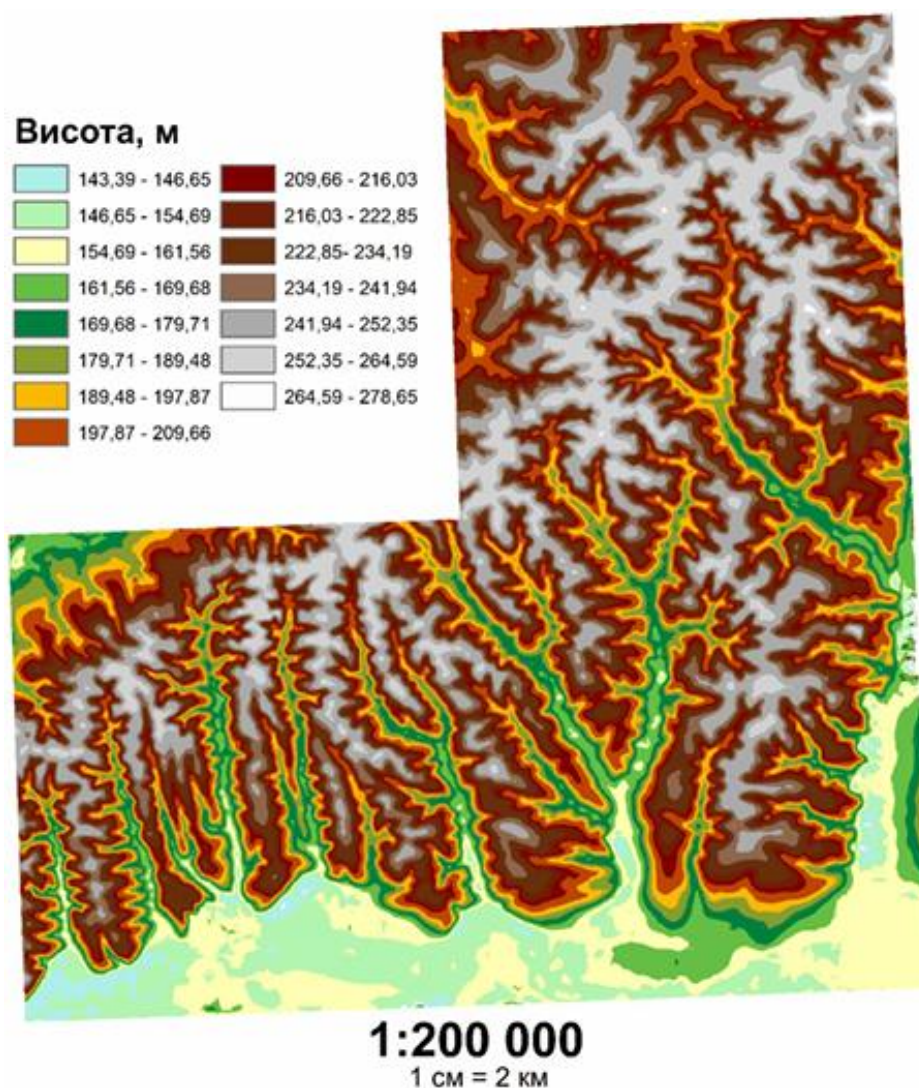


Рис. 2.14 ЦМР побудована методом «Local Polynomial» в програмі Surfer
Розрахунок статистичних показників — “Data Metrics”. Метод “Data Metrics” використовується для визначення статистичних характеристик у вузлах заданої регулярної сітки на основі значень вибірових точок, що потрапляють у межі пошукового еліпса.

Цей підхід не є інтерполяційним у класичному розумінні, оскільки він не створює безперервної поверхні. Натомість його застосовують для попереднього аналізу просторової структури та властивостей даних. За допомогою методу можна отримати такі показники, як середнє значення, медіану, дисперсію, мінімум і максимум, стандартне відхилення та інші.

У середовищі Surfer під час обчислення статистичних параметрів користувач може налаштовувати: розміри та форму області пошуку вибірових даних, а також враховувати наявні порушення просторової безперервності

(наприклад, розломи чи тектонічні межі), що можуть впливати на кінцеві результати.

Метод “Data Metrics” найчастіше застосовується на початкових стадіях створення цифрових моделей рельєфу для перевірки однорідності даних, оцінювання щільності вибірки та попереднього виявлення можливих аномалій у вихідних спостереженнях.

2.2 Алгоритм побудови моделі рельєфу за стереопарами

Оброблення космічних та аерознімків має свої особливості. На відміну від аерофотознімка, побудованого в центральній проекції, зображення космічного сканерного знімка формується в різних проекціях – у напрямку польоту та напрямку сканування. Це необхідно враховувати під час фотограмметричної обробки даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Спектральний діапазон знімання також має важливе значення під час створення тривимірних моделей та дешифрування об’єктів місцевості.

Відповідно до теорії фотограмметрії, для формування стереомоделі необхідно мінімум два зображення, що мають перекриття. У результаті виконання комплексу фотограмметричних операцій – внутрішнього, взаємного та зовнішнього орієнтування знімків – зі знімків формується **стереопара**. Стереопара – це пара плоских зображень одного й того самого об’єкта, отриманих із різних точок простору, що дозволяє створити ефект об’єму.

Фотограмметричний блок методики (рис. 2.15) охоплює процеси фотограмметричної обробки матеріалів ДЗЗ – класичних стереопар аеро- та космічних знімків, а також матеріалів з безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Сформована стереомодель є основою для побудови цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

Основні етапи визначення рельєфу за стереопарами. Щоб отримати цифрову модель рельєфу за стереопарою, необхідно виконати низку послідовних дій:

точки, коефіцієнт дисторсії об'єктива, розмір пікселя або сенсора, координати міток (для аналогових камер). **Взаємне орієнтування:** параметри, що визначають просторове положення знімків відносно один одного; виконується за сполучними точками на знімках. **Зовнішнє орієнтування:** координати центрів проєкції та кути нахилу знімків у момент експозиції, які забезпечують приведення моделі до геодезичної системи координат.

Для космічних знімків орієнтування часто виконується автоматично – на основі метаданих. Існують три основні алгоритми обробки: **Строгий алгоритм** – використовує повний набір елементів орієнтування з метаданих. **Універсальний алгоритм** – придатний для будь-яких зображень, але потребує більшої кількості опорних точок (мінімум 6). **RPC-алгоритм (Rational Polynomial Coefficients)** – дозволяє працювати з обмеженою кількістю опорних точок.

2. Зрівнювання зображень. Зрівнювання блоку знімків виконується за наявності внутрішнього та взаємного орієнтування. Воно може здійснюватися як у вільній моделі (без геоприв'язки), так і з використанням опорних точок. Для космічних зображень вибір параметрів зрівнювання залежить від обраного алгоритму (строгий, універсальний, RPC).

3. Отримання висотної інформації. Цей етап передбачає ручну або автоматизовану побудову **цифрової моделі поверхні (ЦМП)** і **цифрової моделі рельєфу (ЦМР)** у векторній чи растровій формах. ЦМР доцільно створювати на основі відфільтрованих пікетів і структурних ліній рельєфу, а ЦМП – з невідфільтрованих пікетів, що містять контури будівель і рослинності.

4. Стереовекторизація. Процес ручного оцифровування елементів місцевості в режимі стерео з використанням спеціального обладнання (дзеркальні чи високочастотні монітори, анагліфічні або поляризаційні окуляри). У результаті створюються точкові, лінійні або полігональні об'єкти – структурні лінії рельєфу, водні об'єкти, забудова, рослинність тощо.

5. Автоматизована побудова ЦМП і ЦМР. Алгоритм базується на аналізі коефіцієнта кореляції між відповідними точками стереопари. На основі цього

аналізу визначаються координати точок місцевості та формується тривимірна модель рельєфу.

Особливості фотограмметричної обробки знімків з БПЛА. Методика обробки матеріалів аерознімання з безпілотних літальних апаратів загалом аналогічна класичним фотограмметричним методам, але має низку особливостей:

- підвищена залежність від погодних умов (вітер, опади), що впливає на точність елементів зовнішнього орієнтування;
- використання некаліброваних камер, що знижує точність внутрішнього орієнтування.

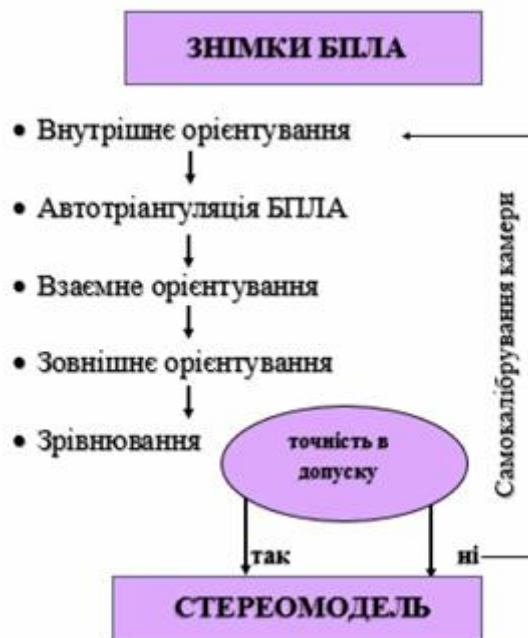


Рис. 2.16. Схема фотограмметричної обробки знімків з БПЛА

Ці недоліки усуваються шляхом **самокалібрування** камери під час зрівнювання знімків. За наявності достатньої кількості опорних точок створюється новий файл параметрів камери з уточненими значеннями фокусної відстані, координат головної точки та коефіцієнтів дисторсії.

Після завершення самокалібрування виконується внутрішнє орієнтування з урахуванням скоригованих параметрів, зрівнювання стереопари та формування остаточної цифрової моделі рельєфу відповідно до стандартних методик.

3 ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ANUDEM

3.1 Загальні відомості про ANUDEM

Алгоритм **ANUDEM** є локально-адаптивним інтерполяційним методом, розробленим Майклом Хатчинсоном в Австралійському Національному університеті [30]. Він базується на спеціальному підході до інтерполяції, створеному для побудови поверхні, що максимально точно відтворює природну дренажну структуру місцевості та зберігає як хребтові лінії, так і руслові мережі.

У своїй основі метод реалізує ітеративну інтерполяцію кінцевих різниць, що поєднує ефективність локальних алгоритмів із безперервністю глобальних методів. Отримана цифрова модель рельєфу може бути використана для визначення гідрографічних характеристик річкових систем та їх басейнів, а також у завданнях гідрологічного моделювання (рис. 3.1).

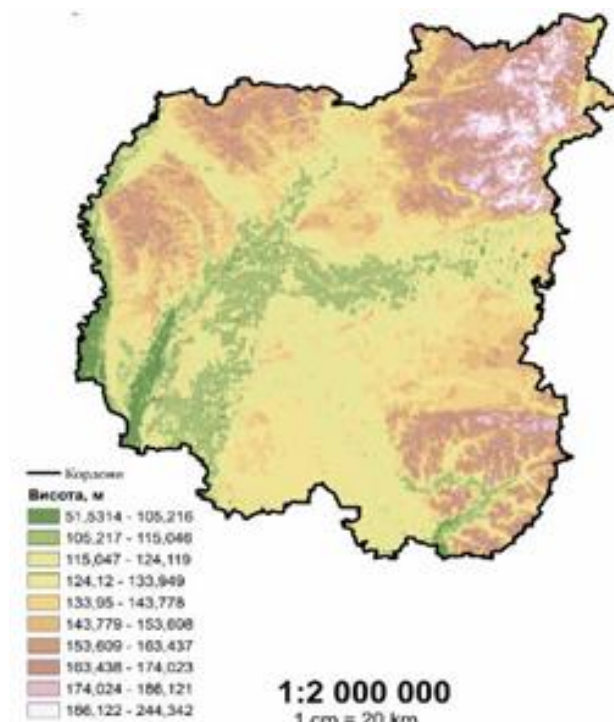


Рис. 3.1. ЦМР побудована методом "Топо в растр" за даними ALOS

ANUDEM враховує специфіку рельєфу та окремі характерні точки поверхні, що важливі для її коректного відображення. Топо-растрові моделі, отримані за його допомогою, широко застосовуються для формування гідрологічно правильних ЦМР [31, 32]. Гідрологічна коректність ЦМР

передбачає: відсутність штучних замкнених знижень (фіктивних депресій); відповідність тальвегів на моделі реальній річковій мережі.

Програмна реалізація ANUDEM вирізняється здатністю швидко обробляти різні типи вхідних даних — точки, лінії — та точно відтворювати поверхні як із плавними змінами висот, так і з різкими перепадами.

Для створення цифрових моделей рельєфу методом ANUDEM може бути використаний повний набір даних про рельєф, отриманих з топографічних карт:

1. Висотні позначки (рис. 3.2., а). Точкові об'єкти, що містять в атрибутивній таблиці значення висот: висотні позначки, урізи води, пункти геодезичної мережі. Кожен файл у загальному форматі містить координати X, Y, Z, які позначають положення та висоту кожної точки даних. Нема обмежень у кількості вхідних висотних позначок, прочитаних з файлів даних, які надані користувачем.

2. Дані точок знижень (рис. 3.2., б). Клас точкових об'єктів, який показує відомі локальні топографічні зниження. Висоту точки зниження можна залишити невизначеною, встановивши значення Z, що лежить поза визначеними користувачем межами (наприклад -999,0).



Рис. 3.2 а) Висотні позначки

б) Точки знижень

3. Дані гідрографічної мережі (рис. 3.3, а.). Лінійні об'єкти, що представляють мережу водотоків (річки, струмки, водотоки, що пересихають). Всі дуги повинні бути орієнтовані вниз за течією. Пари координат у кожному потоці обов'язково повинні бути упорядковані від найвищої точки до найнижчої.

4. Дані обрисів берегової лінії (рис. 3.3., б.). Клас полігональних просторових об'єктів, що містять обриси берегової лінії. Комірки в завершальному вихідному растрі, розташовані поза цими полігонами, приймають значення менше, ніж зазначена користувачем мінімальна межа висоти.

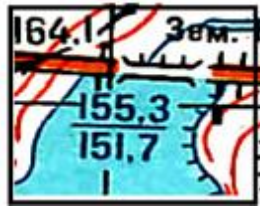


Рис. 3.3 а) Гідрографічна мережа

б) Обриси берегової лінії

5. Ізолінії (рис. 3.4., а). Лінійні об'єкти (горизонталі основні, додаткові), які містять в атрибутивній таблиці значення висоти. Таблиця повинна містити координати та висоту контуру. Ізолінії, що з'єднуються з ізолініями з різними висотами, позначені у файлі помилок.

6. Дані кордонів озер (рис. 3.4., б). Клас полігональних просторових об'єктів, що визначають місце розташування озер. Всім коміркам вихідного растра, що потрапляють всередину озера, присвоюється значення висоти, мінімальне з висот всіх комірок розташованих уздовж берегової лінії

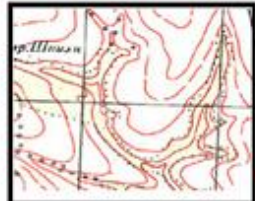
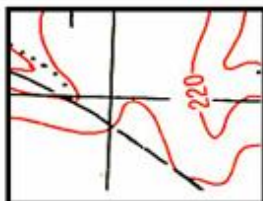


Рис. 3.4 а) Ізолінії

б) Кордони озер

7. Дані ліній обривів (рис. 3.8.). Лінійні об'єкти, що представляють обриви. Лінійні об'єкти обриви повинні мати напрямок, при цьому ліва сторона лінії повинна відповідати низькій стороні обриву, а права - високій.

8. Винятки (рис. 3.9.). Полігональні об'єкти області, які виключаються з процесу інтерполяції. Найчастіше використовуються для виключення даних, пов'язаних з дамбами і мостами.

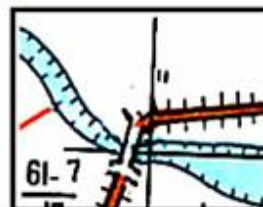
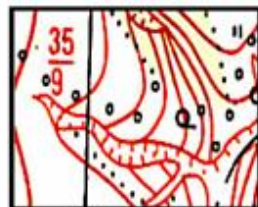


Рис. 3.5 а) Обриви

б) Винятки

Якість побудованих цифрових моделей рельєфу значною мірою визначається характеристиками вихідних даних і вибором методу інтерполяції. У середовищі ArcGIS застосовується реалізація алгоритму ANUDEM версії 5.3.

За результатами оцінювання, проведеного авторами роботи [33], цифрова модель рельєфу, згенерована за допомогою ANUDEM, продемонструвала такі показники точності: для горбистої території середня абсолютна похибка становила 2,704 м, а середньоквадратична — 5,864 м; для гірських районів відповідно 5,8 м та 7,083 м.

Отримані величини виявилися найнижчими серед усіх інтерполяційних методів, залучених до порівняння у дослідженні, зокрема крігінгу, методу зворотно-зважених відстаней, сплайнової інтерполяції, природної околиці та TIN-моделювання.

Алгоритм ANUDEM був також використаний під час створення дев'яти секундної цифрової моделі рельєфу Австралії [34], яка згодом стала базою для визначення меж водозборів та підземних водних систем на континенті [35]. До ключових переваг ANUDEM належать здатність оперативно обробляти різномірні дані у форматах точок і ліній; придатність для розрахунку гідрографічних параметрів річкових мереж і їх басейнів; менша потреба у великому масиві вхідних даних порівняно з методами, що ґрунтуються на оцифрованих ізолініях; а також нижчі середні похибки створюваних ЦМР у порівнянні з більшістю альтернативних підходів.

Упродовж останніх двох десятиліть алгоритм ANUDEM постійно удосконалюється, що розширює спектр його застосування для опрацювання різних типів топографічної інформації та підвищує точність отримуваних моделей. Водночас результат значною мірою залежить від якості та структури вихідного набору даних, що слід обов'язково враховувати при використанні цього методу.

3.2 Базовий алгоритм інтерполяції

Процедуру інтерполяції побудовано так, щоб максимально раціонально використати переваги доступних вхідних даних і врахувати характерні властивості рельєфних поверхонь. Оскільки вода є головним чинником ерозії та визначальним елементом формування морфології більшості ландшафтів,

природні території зазвичай містять багато локальних максимумів (вершин) і порівняно небагато локальних мінімумів. Саме така особливість формує притаманну їм дренажну структуру. Алгоритм ANUDEM використовує ці уявлення про поведінку рельєфу, вводячи відповідні обмеження в процес інтерполяції, що забезпечує узгоджене відтворення річкової мережі.

Застосування загальної дренажної умови практично усуває необхідність ручного редагування або повторного опрацювання з метою усунення помилкових локальних понижень. Під час їх коригування алгоритм діє обережно: дренажні умови не накладаються на ділянки, для яких вони суперечать фактичним вхідним висотним даним. Такі зони, як правило, фіксуються у діагностичному файлі як локальні зниження. Метод дає можливість створювати цифрові моделі рельєфу, формуючи взаємопов'язану мережу водотоків на основі горизонталей. Під час інтерполяції на кожному кроці алгоритм виявляє понижені ділянки рельєфу — на вододілах, сідловинах, у лощинах — та встановлює їх зв'язок із лініями поверхневого стоку.

Метод ґрунтується на обчисленні значень інтерпольованої функції відповідно до виразу [55] (формула 3.1).

$$z_i = f(x_i, y_i) + \varepsilon_i, \quad (3.1)$$

де ε_i ; середня похибка стандартного відхилення для w_i $i = 1, \dots, n$

Кожна опорна точка розташовується, як правило, випадковим чином, і стандартне відхилення для кожної комірки растрової моделі обчислюється за формулою 3.2:

$$w_i = hv_i \sqrt{12}, \quad (3.2)$$

де h — розмір комірки; v_i — локальний кут нахилу в комірці.

Потім функцію f оцінюють шляхом розв'язання наближення кінцевої різниці регулярної сітки до двофазної функції f , яка мінімізується (формула 3.3):

$$\sum_i = 1, n \left[(z_i - f(x_i, y_i)) / w_i \right]^2 + \lambda J(f), \quad (3.3)$$

де $J(f)$ міра шорсткості функції f з точки зору першої та другої похідних, λ додатне число, яке називаються параметром згладжування. Параметр

згладжування λ зазвичай вибирають так, що зважена залишкова сума квадратів у формулі (3.3) дорівнювала n . Ітерація завершується коли досягнуто задане користувачем максимальне число ітерацій (зазвичай 20). По завершенні ітерацій програма обчислює всі точки знижень, що залишилися у встановленій сітці, і записує детальний підсумок у вихідний файл журналу. Решта точок знижень записуються у вихідний файл для побудови графіку, щоб допомогти у виявленні та виправленні помилок вхідних даних. Поточні дані, включені в сітку та інші діагностики, також записуються у вихідні діагностичні файли точок та рядків для подальшої оцінки процесу побудови сітки.

3.3 Практичне використання методу ANUDEM для побудови ЦМР

Цифрову модель рельєфу, отриману за допомогою інструменту «Топо в растр», можна використовувати для визначення ключових характеристик поверхневого стоку, таких як напрямок руху води, обсяг сумарного стоку та довжина ліній стоку, а також для автоматичної ідентифікації постійних і тимчасових водотоків та встановлення їхнього порядку. В якості вихідних даних для побудови ЦМР методом ANUDEM використовувалися топографічні карти масштабу 1:50 000 (три аркуші, що охоплюють необхідну територію), які попередньо були відскановані та оцифровані з метою отримання висотної інформації (ізолінії через 10 м) (рис. 3.6).

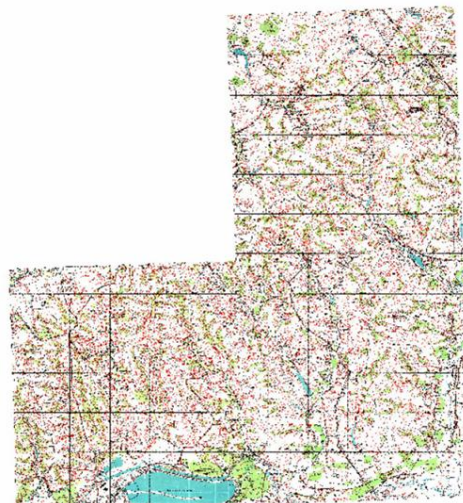


Рис. 3.6. Вхідна топографічна карта 1:50 000

Ізолінії традиційно слугують найпоширенішим способом відображення та зберігання висотних даних, однак саме вони створюють найбільші труднощі під час використання стандартних інтерполяційних методів. Основна складність полягає в тому, що проміжки між ізолініями не містять повної інформації про форму рельєфу.

Під час побудови ґрид-моделі рельєфу враховують не лише просторове положення горизонталей, відміток висот і урізів води, а й конфігурацію гідрографічної мережі, межі водних об'єктів (озер, водосховищ, ставків), а також локальні зниження рельєфу (рис. 3.7).

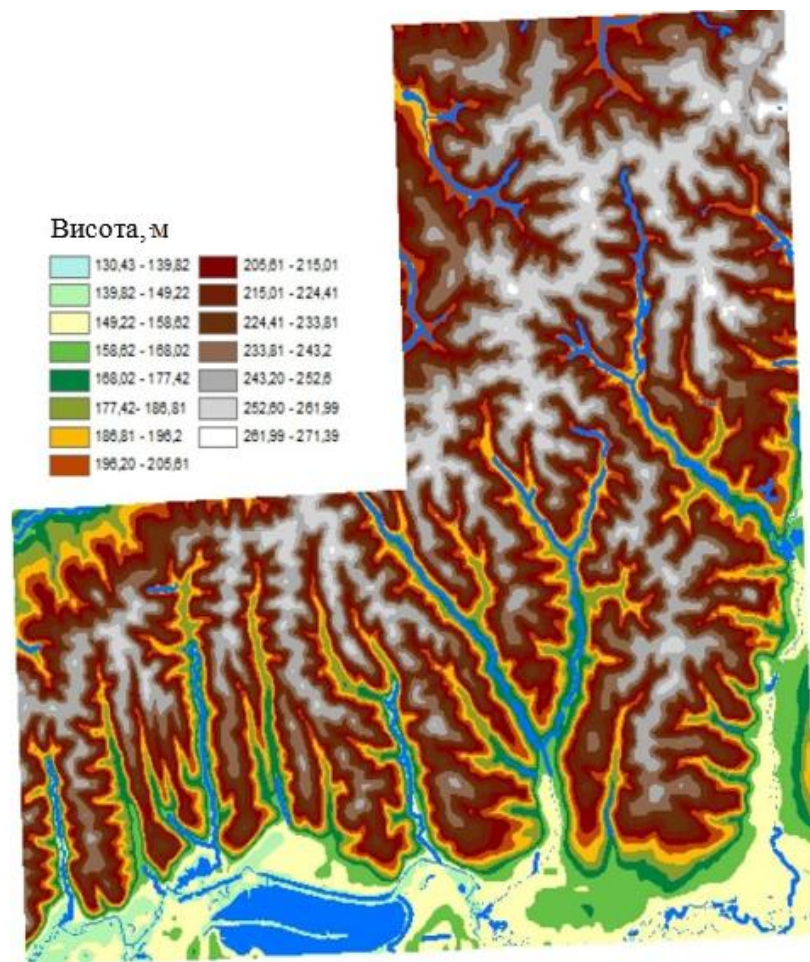


Рис. 3.7. ЦМР побудована методом “Топо в растр” із накладенням гідрологічної мережі та озер.

На початковому етапі інтерполяції інструмент «Топо в растр» опрацьовує дані, подані у вигляді ізоліній. Для цього визначаються точки локальних максимумів кривизни кожної ізолінії. Далі, на основі початкового растра висот, формується мережа криволінійних водотоків і хребтів, що проходять через ці

точки [48]. Отримані дані використовуються для забезпечення коректних гідрогеометричних параметрів вихідної цифрової моделі рельєфу. Алгоритм обробки меж озера передбачає автоматичне визначення його висоти на основі просторового зв'язку з лініями водотоків та сусідніми висотними значеннями. Метод розглядає кожну межу як ізолінію з невідомим значенням висоти і шляхом ітерацій визначає її висоту, використовуючи значення осередків, що розташовані вздовж цієї межі. Одночасно, під час розрахунку висотних значень кордону конкретного озера враховуються висоти інших водойм. У результаті роботи алгоритму значення комірок, розташованих безпосередньо поза межею озера, стають більшими за висоту кордону озера, тоді як комірки всередині озера мають нижчі значення.

Для створення цифрової моделі рельєфу на заданій території за алгоритмом ANUDEM, реалізованим у програмному забезпеченні ArcGIS, були використані вхідні дані, оцифровані з топографічної карти (рис. 3.8), а саме: ізолінії, елементи гідрографічної мережі, висотні позначки, точки локальних знижень і межі озер.

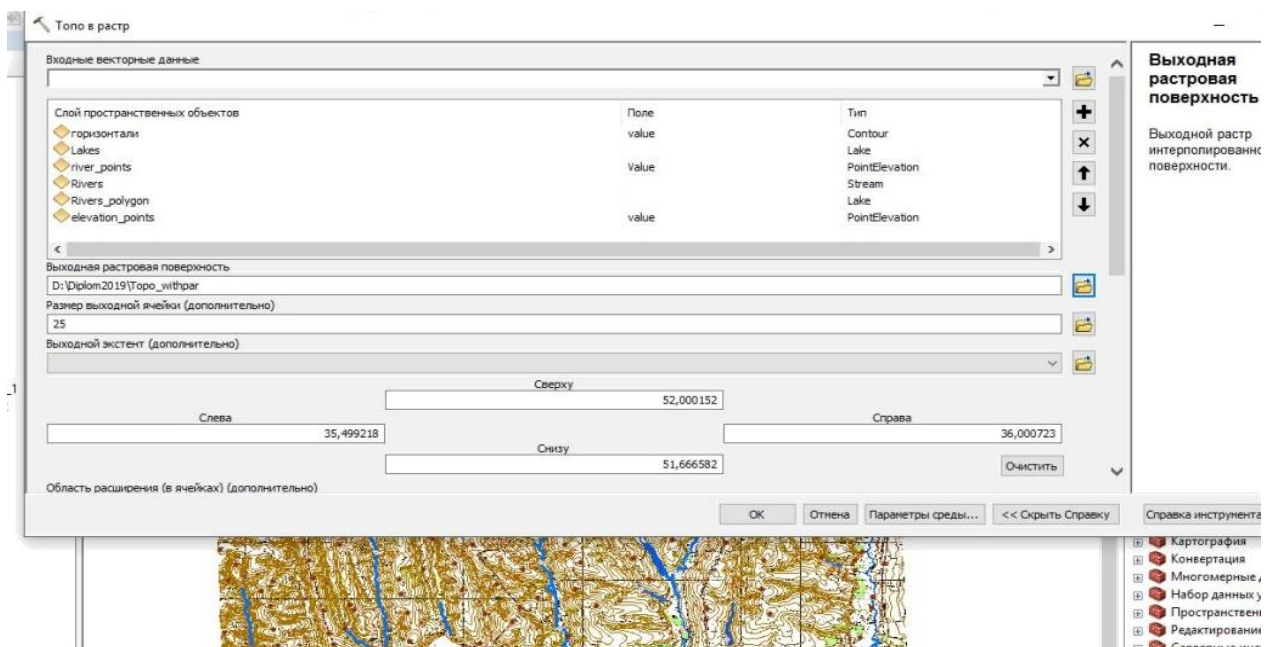


Рис. 3.8. Вхідні дані для побудови ЦМР у програмному забезпеченні ArcGIS

Розмір пікселя цифрової моделі рельєфу зазвичай задають на рівні приблизно 0,5 мм у масштабі карти (у джерелі [2] вказується значення 0,2 мм).

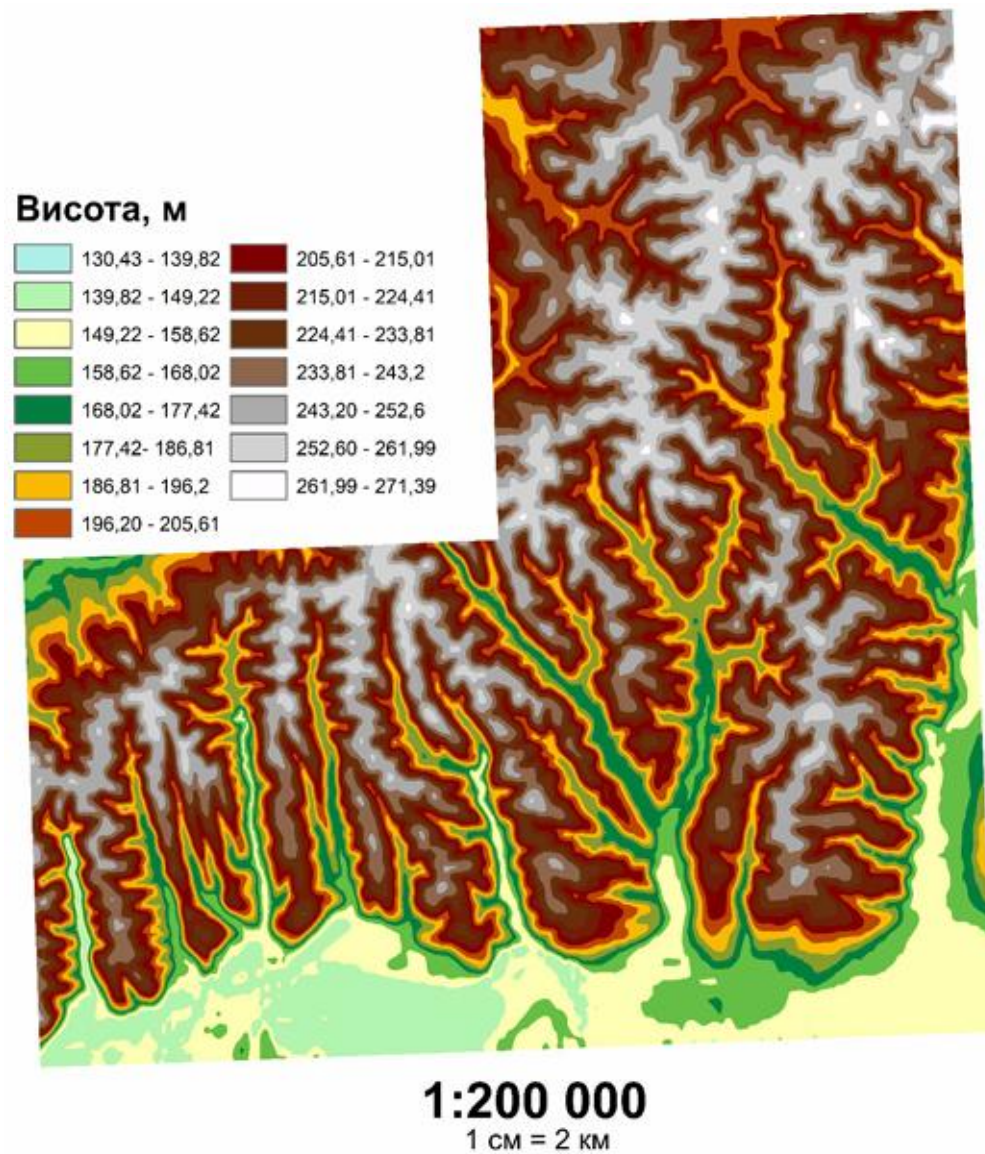


Рис.3.9 Метод «ANUDEM»

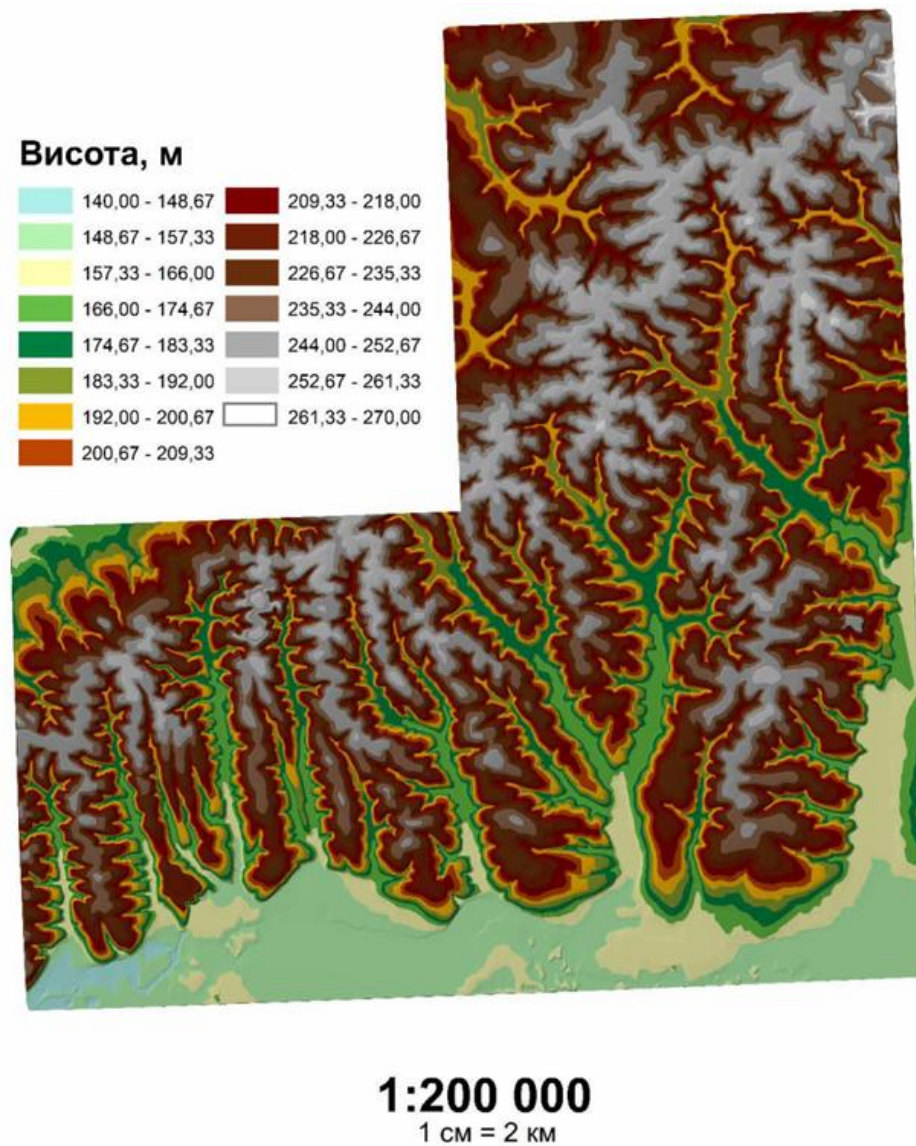


Рис. 3.10 Метод «TIN»

Водночас необхідно враховувати, що метод інтерполяції «Топо в растр» характеризується високими вимогами до обсягу оперативної пам'яті, що ускладнює створення високодетальної ЦМР для значних за площею територій. Розмір комірки DEM було встановлено 25 м. Оскільки використовується карта масштабу 1:50 000, то: 1 см відповідає 500 м, 1 мм — 50 м, 0,5 мм — 25 м. Таким чином, 25 м є максимальним допустимим розміром пікселя.



Рис. 3.11. Вибрані елементи в ArcGIS для побудови ЦМР

Якщо застосувати більший розмір комірки, цифрова модель рельєфу втратить точність порівняно з вихідними векторними даними. Водночас потрібно враховувати, що зменшення розміру пікселя призводить до зростання обсягу кінцевої ЦМР. При виборі оптимального значення слід також брати до уваги технічні можливості комп'ютера.

Цифрову модель рельєфу, побудовану методом ANUDEM, наведено на рис. 3.9.

Для порівняння результатів створення ЦМР було додатково застосовано ще один метод — TIN, реалізований у програмному забезпеченні ArcGIS. Вихідними даними для побудови TIN виступає набір точок із координатами X, Y, Z. Завдання полягає у формуванні на основі цих точок мережі суміжних, непересічних трикутників.

Модель TIN використовується як спосіб зберігання вхідної інформації про поверхню та як інструмент для виконання задач у ГІС, що працюють з тривимірними моделями. Тріангуляційна мережа забезпечує більш точне, ніж растрова модель, відтворення неоднорідних поверхонь, які можуть різко

змінюватися на окремих ділянках та залишатися відносно рівними на інших. Це зумовлено тим, що кількість опорних точок можна збільшити в місцях значних змін рельєфу та зменшити там, де поверхня змінюється поступово.

Цифрову модель рельєфу, отриману методом TIN, подано на рис. 3.10.

ЦМР, побудовані різними методами, можуть бути відображені в програмі ArcScene від Esri (додаток для роботи з тривимірними даними, що входить до складу модуля 3D Analyst). ArcScene дає змогу візуалізувати ГІС-дані у тривимірному просторі.

На рис. 3.12 представлено тривимірне зображення цифрової моделі рельєфу, створеної методом ANUDEM.

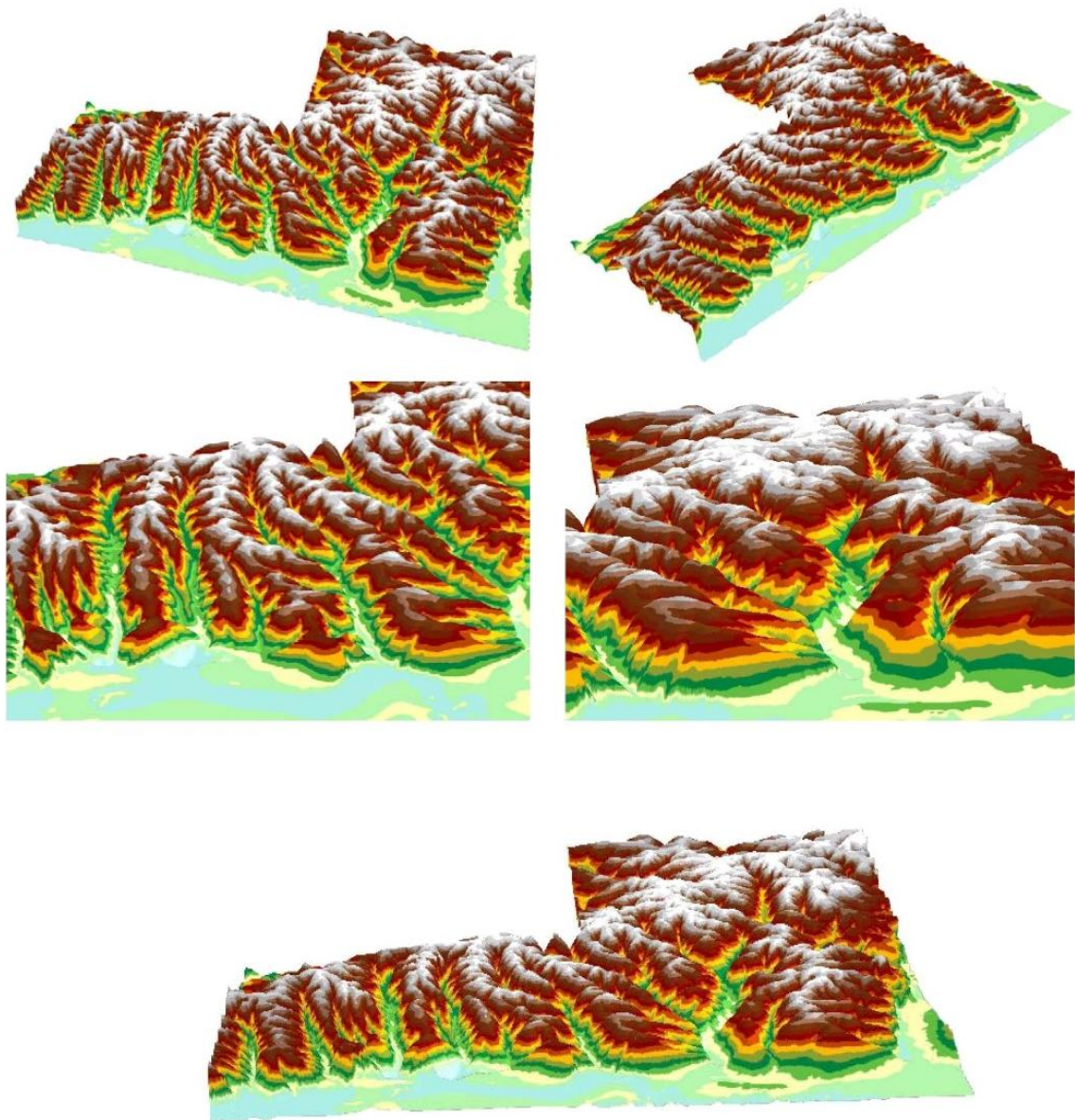


Рис. 3.12. ЦМР відображена в ArcScene

3.4 Порівняльний аналіз методу ANUDEM з іншими методами інтерполяції цифрових моделей рельєфу

Точність є однією з ключових характеристик якості цифрової моделі рельєфу, яку оцінюють за ступенем відповідності моделі реальній поверхні. Ця відповідність, або точність ЦМР, визначається на основі вибірових оцінок середньоквадратичних похибок висотних значень. На точність моделі впливають: тип джерела та якість вихідних даних, технологія їх опрацювання, точність відтворення висотної функції під час переходу від оцифрованих горизонталей до регулярного набору даних, а також тип і параметри моделі, що застосовується при побудові.

Вибір конкретного методу залежить від вимог користувача та доступних ресурсів системи. Водночас навіть найбільш точні інтерполяційні процедури формують досить умовне відображення фактичного просторового розподілу значення, що моделюється.

Аналіз характеристик методів побудови ЦМР свідчить, що кожен із них має свої переваги й недоліки, які необхідно враховувати під час вибору оптимального підходу для розв'язання конкретного завдання. Крім того, вибір методу визначається кількістю вихідних точок і рівномірністю їх розташування в межах області інтерполяції.

У даній роботі розглянуто 13 методів створення цифрових моделей рельєфу за картографічними даними у програмних продуктах Surfer та ArcGIS, а саме: метод зворотно зважених відстаней; крігінг; метод мінімальної кривизни; поліноміальна регресія; радіальні базисні функції; модифікований метод Шепарда; тріангуляція з лінійною інтерполяцією; метод природної околиці; метод найближчого сусіда; метод змінного середнього; метод локальних топонімів; «Топо в растр» (ANUDEM).

Для аналізу кожного методу інтерполяції використовуватимуться контрольні точки з визначеними на топографічній карті висотами, а також порівняння графіків рельєфних профілів на одну й ту саму територію. На

топографічній карті було відібрано 20 контрольних точок з урахуванням особливостей рельєфу та елементів гідрографічної мережі (рис. 3.13).

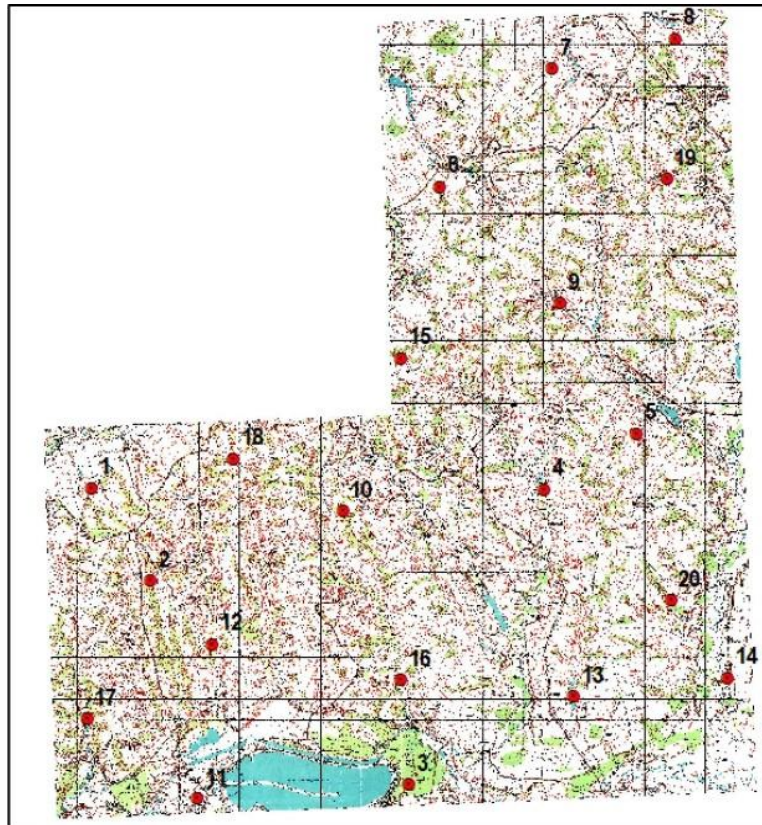


Рис. 3.13. Контрольні точки та їх нумерація.

Для кожної контрольної точки було визначено її висотне значення за топографічною картою, а послідовність виконання цього розрахунку наведено на рис. 3.14.

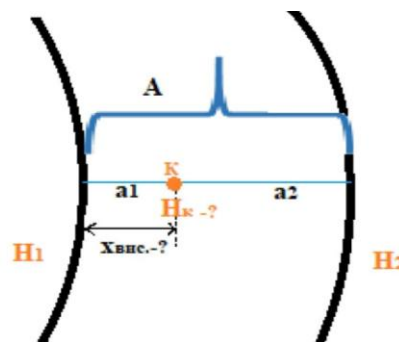


Рис. 3.14. Алгоритм визначення висотних відміток контрольних точок

На рис. 3.14. показано визначення висоти контрольної точки К. Необхідно з точки К провести лінію, що буде перпендикулярною до обох горизонталей H_1 та H_2 . Однією з умов є $H_1 > H_2$. Отже, отримаємо співвідношення:

$$\frac{A}{(H_1 - H_2)} = \frac{a_1}{X_{\text{вис}}}, \quad (3.4)$$

де A – віддаль між двома горизонталями; a_i – віддаль від H_1 та контрольною точкою; $X_{\text{вис}}$ – різниця у висоті між H_1 та k .

Спочатку необхідно визначити на скільки відрізняється висота точки від H_1 – висоти горизонталі за формулою:

$$X_{\text{вис}} = \frac{a_1}{A} (H_1 - H_2), \quad (3.5)$$

Наступним кроком є визначення висоти контрольної точки H_k (за умови $H_1 > H_2$) за формулою:

$$H_k = H_1 + X_{\text{вис}}, \quad (3.6)$$

Використовуючи вище наведені формули визначено висотні відмітки контрольних точок, які буде використано як істинні для визначення середньоквадратичних похибок висот точок, отриманих різними методами побудови цифрових моделей рельєфу за формулою Гауса (3.7):

$$m_{\text{СКП}} = \sqrt{\frac{[(x_i - X_i)^2]}{n}}, \quad (3.7)$$

де x_i – результат вимірювання (в даному випадку висотні відмітки отримані з ЦМР, для кожного методу); X_i – істинне значення вимірюваної величини (висота контрольних точок); n – кількість точок ($n=20$).

Для розрахунків всі дані були записані в окремий Excel - файл, для зручності та швидкості обчислень. Результати наведені в Додатку А.

Точність отриманих ЦМР наведена на рис. 3.15. у вигляді гістограми.

Для оцінювання середньоквадратичної похибки застосовують метод побудови довірчих інтервалів. Довірчим інтервалом називають випадковий інтервал для параметра a , про який із високою, близькою до одиниці ймовірністю можна стверджувати, що він містить невідоме істинне значення цього параметра.

Ймовірність, пов'язану з довірчим інтервалом, називають довірчою ймовірністю. Якщо довірчий інтервал будується для рівня 95%, то відповідна довірна ймовірність становить 5% або 0,05; для рівня 98% - 2% або 0,02 тощо.

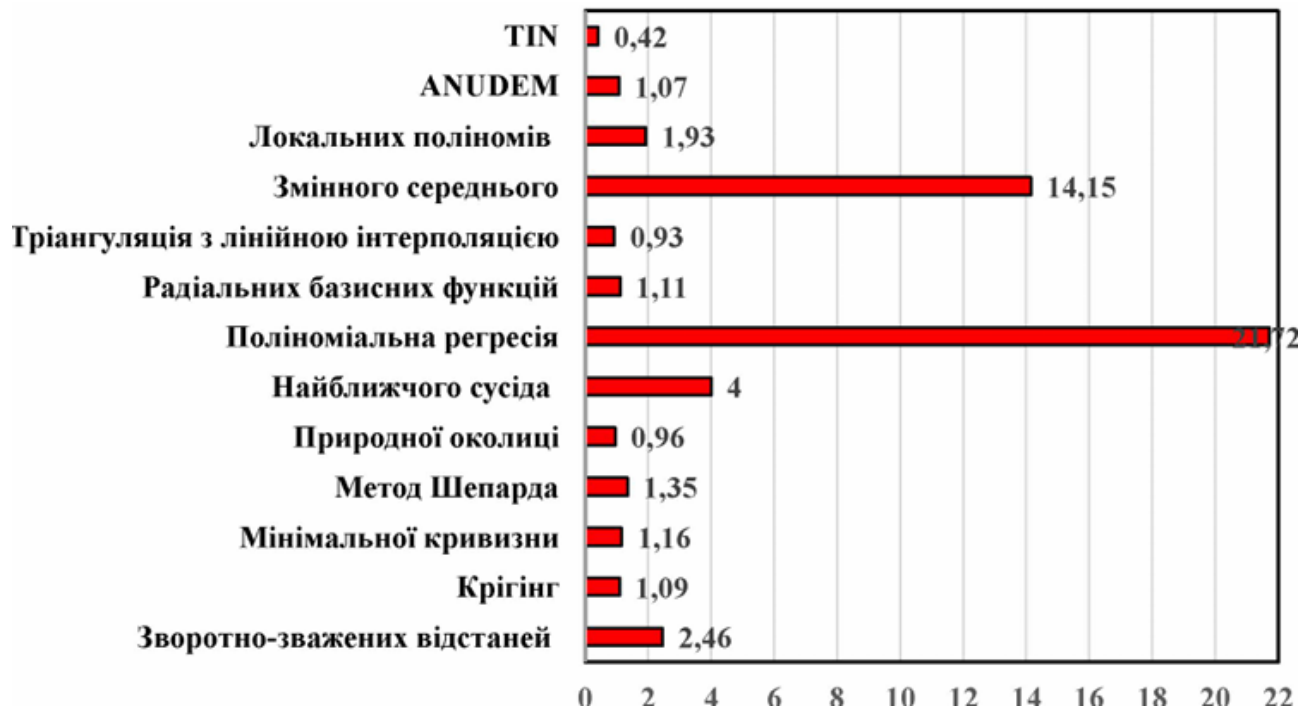


Рис. 3.15. Середньоквадратичні похибки методів побудови ЦМР

Довірчі межі для істинного значення вимірюваної величини та її середньоквадратичної похибки встановлюють залежно від заданої довірчої ймовірності та закону розподілу помилок.

Довірчий інтервал для середньоквадратичної похибки у випадку нормальної вибірки будується у вигляді за формулою:

$$((n-1)m^2)/\chi^2_2 < \sigma^2 < ((n-1)m^2)/\chi^2_1 \quad (3.8)$$

де m - оцінка середньоквадратичної похибки за вибіркою,

- σ - істинне значення середньоквадратичної похибки,

- n - обсяг вибірки,

- χ^2_1 і χ^2_2 - табличні значення розподілу χ^2 для відповідних рівнів ймовірності.

Значення n та необхідні критичні значення χ^2 можна знайти у статистичних таблицях або обчислити за заданою довірчою ймовірністю.

Якщо оцінка m отримана за формулою Бесселя або Гаусса (у даній роботі обчислення виконані за формулою Гаусса), тоді величини χ^2 -критеріїв χ^2_1 та χ^2_2 вибирають з таблиці розподілу χ^2 з числом ступенів свободи $n-1$ або n відповідно, за ймовірностями: $p_1 = (1-\beta)/2$, $p_2 = 1-p_1$, де β - довірна ймовірність (наприклад, 95% $\rightarrow \beta = 0,95$).

Побудувавши інтервал, легко отримати довірчий інтервал для середньоквадратичної похибки простої арифметичної середини, поділивши всі члени нерівності (3.8) на n . З огляду на те, що $\bar{m} = m/\sqrt{n}$, отримуємо :

$$((n-1)m^2)/(n\chi^2_{2}) < \bar{m}^2 < ((n-1)m^2)/(n\chi^2_{1}) \quad (3.9)$$

Розрахунок довірчих інтервалів для σ та СКП кожного методу побудови цифрової моделі рельєфу виконується при довірчій ймовірності $\beta = 95\%$ та обсязі вибірки $n = 20$. Ступені свободи: $k = n - 1 = 19$. Критичні значення χ^2 : - $\chi^2_{1} = \chi^2_{0.975;19} - \chi^2_{2} = \chi^2_{0.025;19}$

Результати розрахунків наведено в Додатку Б.

За результатами розрахунків встановлено, що методи «TIN», «Тріангуляція з лінійною інтерполяцією», «Природна околиця» та «ANUDEM» забезпечують найменші значення середньоквадратичних похибок — 0,42 м, 0,93 м, 0,96 м та 1,07 м відповідно.

Водночас порівняння отриманих цифрових моделей рельєфу показує, що метод ANUDEM точніше відтворює елементи гідрографічної мережі та контури озер (це добре видно на картах, оскільки межі озера чітко простежуються саме на ЦМР, побудованій методом «Топо в растр»). Тому моделі, створені за допомогою цього методу, доцільно використовувати для аналізу особливостей річкової мережі та напрямків стоку.

Одним із підходів, застосованих для порівняння методів побудови ЦМР, стала побудова профілів рельєфу для кожної моделі. На рис. 3.16 показано лінію, вздовж якої виконувалося профілювання. Застосування цього методу дає можливість візуально оцінити плавність зміни рельєфу, а також зіставити мінімальні й максимальні висотні значення на заданій лінії.

Профілі рельєфу (рис. 3.17) були створені у програмному забезпеченні ArcGIS з використанням модуля 3D Analyst, який забезпечує тривимірну візуалізацію, побудову та аналіз поверхонь і містить набір 3D-символів та понад 40 інструментів геообробки [29].

Проаналізувавши результати побудови профілів рельєфу, варто відзначити, що не всі графіки плавно змінюються. Відмінним від інших 12 є

графік профіля ЦМР, побудованої методом “Поліноміальної регресії”, це можна пояснити тим, що даний метод використовується для оцінки просторового тренда і є не інтерполяційним. Тому, згенерована поверхня не проходить через експериментальні точки.

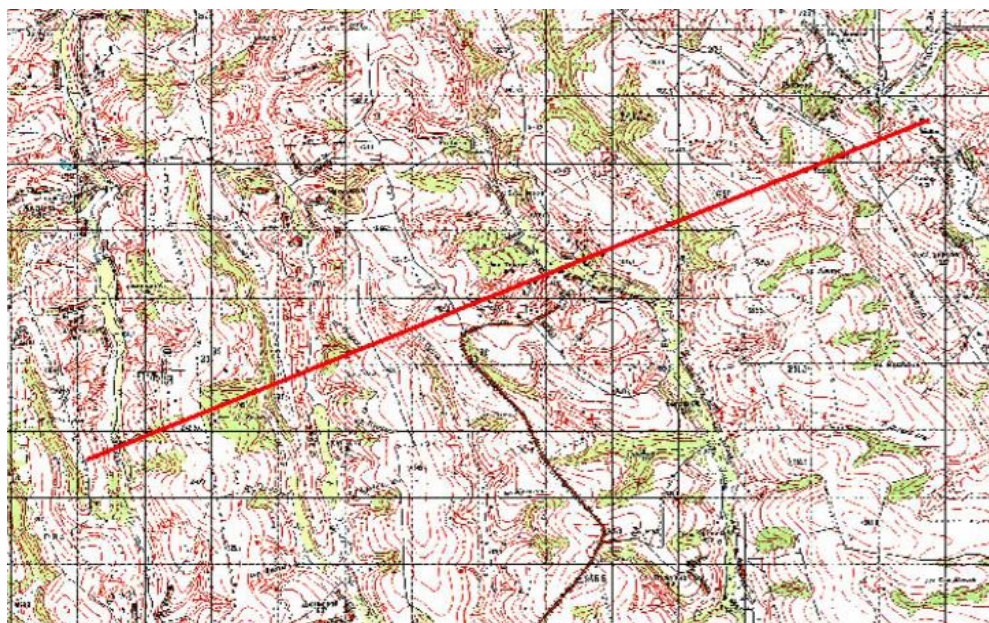
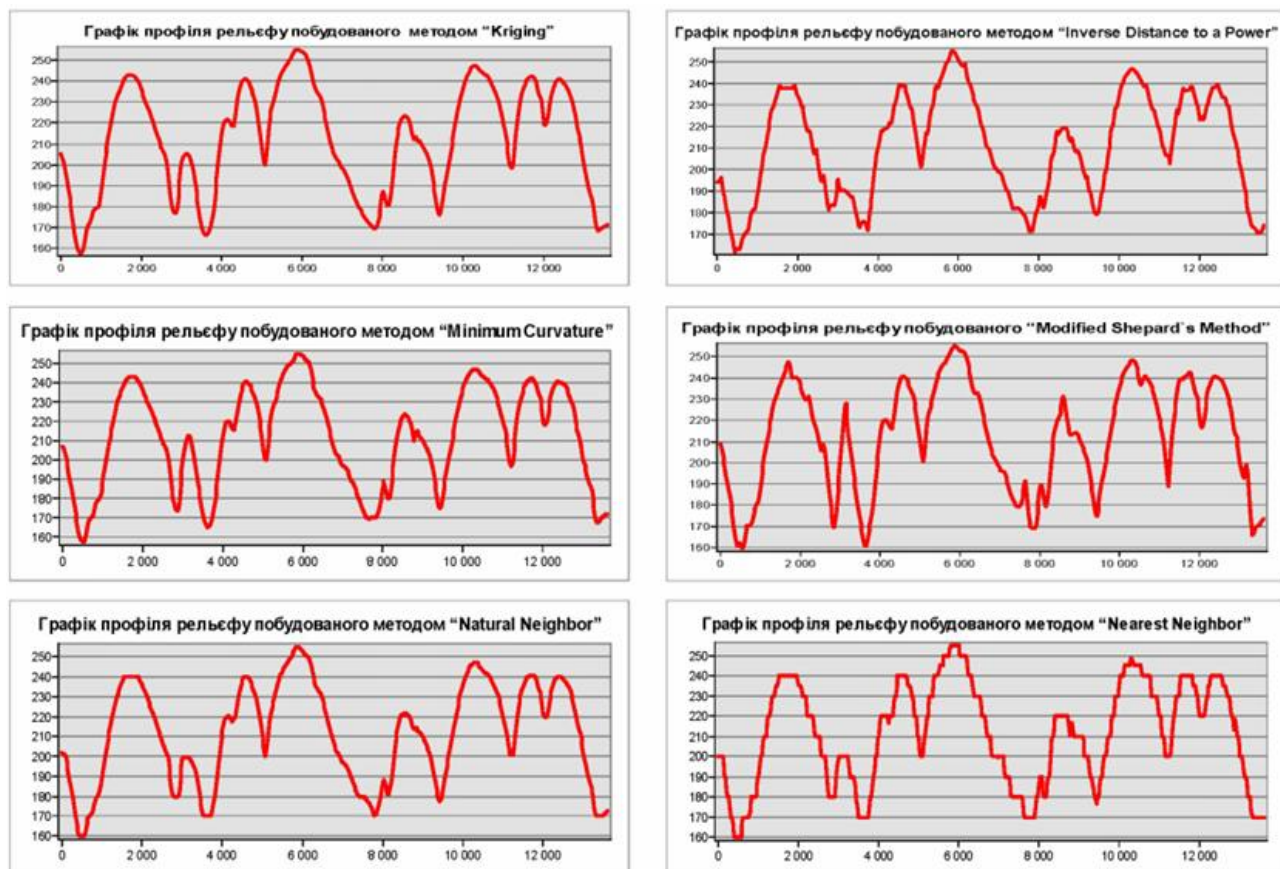
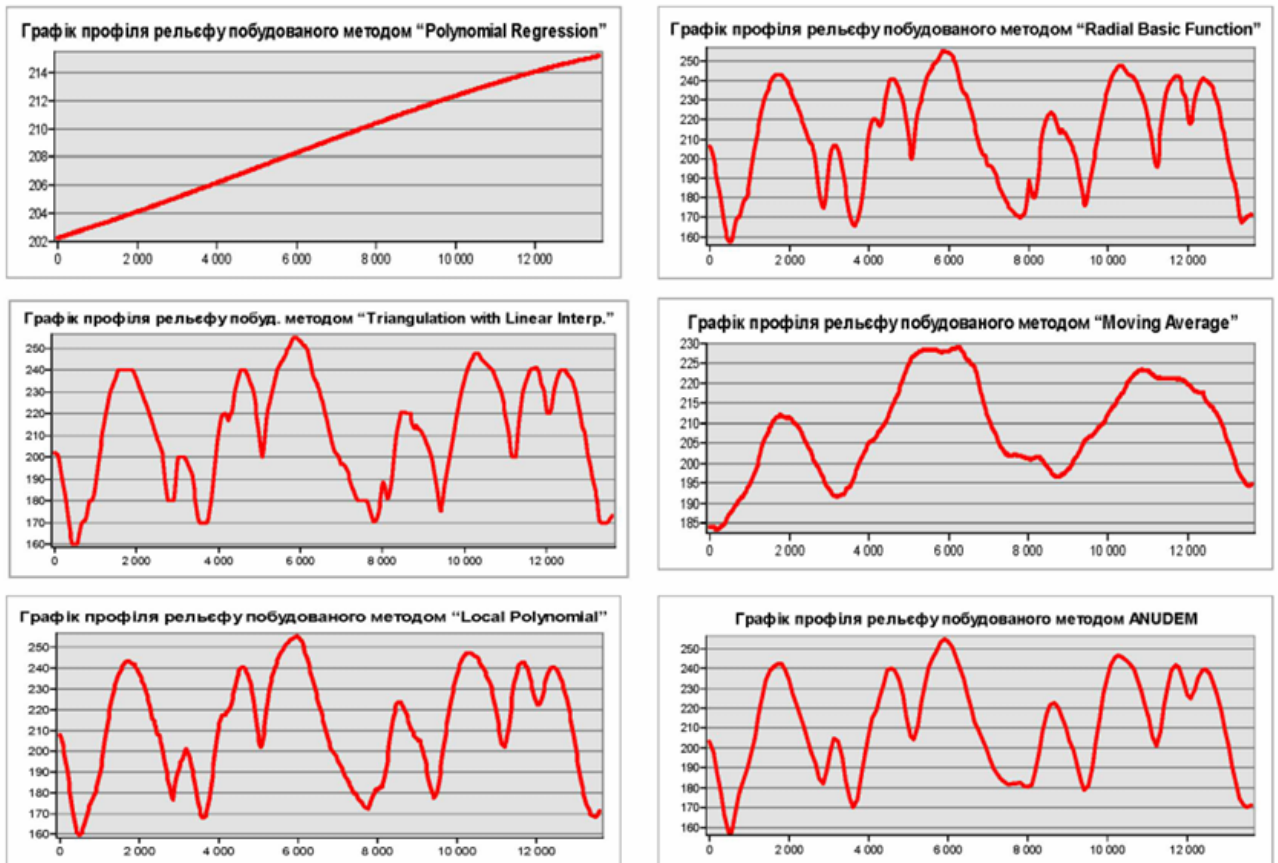


Рис. 3.16. Лінія вздовж якої будувався графік профіля рельєфу





Кожен метод інтерполяції має свої особливості та недоліки. Порівняння методів побудови та рекомендації для їх використання показано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняльна таблиця методів побудови ЦМР

Метод	Особливості	Швидкість
Метод зворотно-зважених відстаней (IDW)	Швидкий метод; схильний створювати структури навколо точок з високими значеннями; не виходить за межі мін/макс значень опорних точок; може погано відтворювати піки й западини; ефективний за щільного набору точок.	Швидкий
Метод Крігінгу	Гнучкий, базується на варіограмі; часто використовується; повільний при великих наборах точок; дозволяє оцінювати помилки; може бути точним або згладжувальним залежно від налаштувань.	Повільний / Середній
Метод мінімальної кривизни	Створює дуже гладкі поверхні; швидко працює з більшістю наборів даних; можливі хибні ізолінії; не є точним інтерполятором.	Середній
Метод поліноміальної регресії	Виділяє великі тренди; дуже швидкий для будь-якого обсягу даних; не є точним інтерполятором, оскільки поверхня не проходить через вихідні точки.	Швидкий
Метод радіальних базисних функцій (RBF)	Гнучкий, подібний до Крігінгу, але без статистичних припущень; часто дає найточніші та найгладші поверхні.	Повільний / Середній

Модифікований метод Шепарда	Подібний до IDW, але зазвичай не створює ефекту «олячого ока»; може бути точним або згладжувальним інтерполятором.	Швидкий
Метод тріангуляції з лінійною інтерполяцією (TIN)	Заснований на тріангуляції Делоне; найкраще працює при рівномірному розподілі даних; при малій кількості точок з'являються трикутні грані та прямолінійні ізолінії.	Середня / Велика потреба точок
Метод природної околиці	Локальний метод; використовує лише точки навколо вузла; значення завжди в межах діапазону вхідних даних; добрий для нерівномірних даних; не потребує параметрів.	Швидкий
Метод найближчого сусіда	Підходить для рівномірних даних; формує дискретні значення; дає зміщену та низьку якість оцінку.	Швидкий
Метод змінного середнього	Використовує середні значення в межах еліпса пошуку; потребує середньої/великої кількості даних.	Швидкий
Метод локальних поліномів	Застосовує зважені найменші квадрати в межах еліпса пошуку; добрий для локально згладжених даних.	Швидкий
Метод “Топо to Raster” (ANUDEM)	Морфологічний підхід; створює гідрологічно коректну поверхню; працює з точками, лініями та полігонами; потребує контурів; доступний в ArcGIS.	Повільний / Середній

Отже, в таблиці описано 12 методів побудови цифрових моделей рельєфу, що реалізовані в програмних засобах ArcGIS та Surfer. Також, узагальнено особливості та швидкість їх застосування для створення ЦМР. Тобто, методи, які мають найменшу середньоквадратичну похибку (“TIN”, “Тріангуляція з лінійною інтерполяцією”, “Природної околиці”, “ANUDEM”) працюють краще, коли точки вимірювань розподілені нерівномірно.

4 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Екологічна безпека в Україні забезпечується через реалізацію комплексу взаємопов'язаних політичних, економічних, технічних, організаційних, державно-правових та інших заходів. Державно-правові інструменти за своїм змістом є різнорідними та класифікуються за спрямованістю на організаційно-превентивні, регулятивно-стимулювальні, розпорядчо-виконавчі, охоронно-відновлювальні та забезпечувальні заходи. У сукупності вони формують правовий механізм забезпечення екологічної безпеки, який являє собою систему правових засобів державного впливу, спрямованих на регулювання діяльності, що здатна впливати на стан довкілля, запобігання погіршенню екологічної ситуації та локалізацію проявів екологічної небезпеки.

Організаційно-превентивні заходи орієнтовані на виявлення екологічно небезпечних територій, зон, об'єктів і видів діяльності, а також на попередження виникнення екологічних ризиків. До їх складу належать обліково-установчі, реєстраційні, експертно-оцінювальні та інформаційно-прогностичні інструменти. В Україні також розвиваються інститути екологічного аудиту та екологічного страхування як елементи системи попередження екологічних загроз. Обліково-установчі заходи передбачають виявлення, інвентаризацію та класифікацію потенційно небезпечних зон, територій, об'єктів і джерел впливу. Реєстраційні процедури охоплюють паспортизацію небезпечних об'єктів, сертифікацію, підтвердження відповідності продукції, ліцензування та реєстрацію джерел підвищеної екологічної небезпеки. Продукція, що становить потенційну небезпеку для довкілля, підлягає обов'язковій сертифікації із видачею відповідних підтвердних документів про її відповідність вимогам національних стандартів. Екологічно небезпечні види діяльності здійснюються на підставі ліцензій, що передбачають встановлення спеціальних умов та обмежень.

Експертно-оцінювальні заходи включають проведення екологічної експертизи об'єктів і комплексів, у тому числі військового та оборонного

призначення, які можуть становити загрозу для довкілля і здоров'я населення. Вони також передбачають здійснення попередньої оцінки впливу на навколишнє середовище, організацію громадських слухань і забезпечення участі громадськості в обговоренні проєктів екологічно небезпечної діяльності. Порядок проведення таких процедур регламентується законодавством України, зокрема законами «Про охорону навколишнього природного середовища» та «Про екологічну експертизу». Інформаційно-прогностичні заходи охоплюють прогнозування, планування, здійснення моніторингу та інформування населення і суб'єктів господарювання про стан навколишнього середовища як складові управлінських функцій у сфері екології.

Регулятивно-стимулювальні заходи становлять систему правових норм, спрямованих на встановлення та дотримання екологічних стандартів, нормативів, лімітів та інших обов'язкових вимог у сфері екологічної безпеки. Відповідно до положень чинного законодавства розробляються екологічні стандарти, нормативи, ліміти, а також правила проєктування, будівництва та експлуатації потенційно небезпечних об'єктів і поводження з небезпечними речовинами. Дотримання цих вимог забезпечується також шляхом застосування економічних стимулів, зокрема надання податкових, кредитних та інших пільг підприємствам, установам, організаціям і громадянам, які впроваджують ефективні природоохоронні заходи.

Розпорядчо-виконавчі заходи полягають у реалізації повноважень спеціально уповноважених органів державної влади у сфері забезпечення екологічної безпеки. Ключові засади такої діяльності закріплені в Конституції України, яка покладає на органи виконавчої влади, включаючи Президента України, обов'язок формування та реалізації державної політики у сфері національної та екологічної безпеки. Важливою складовою цієї діяльності є контрольно-наглядові функції, спрямовані на перевірку дотримання суб'єктами господарювання та громадянами вимог екологічного законодавства і застосування заходів щодо запобігання екологічним правопорушенням.

Охоронно-відновлювальні заходи спрямовані на локалізацію та ліквідацію наслідків екологічних загроз, проведення аварійно-рятувальних і відновлювальних робіт, а також на встановлення спеціального правового режиму територій відповідно до рівня екологічного ризику. Вони передбачають визначення статусу осіб, які постраждали внаслідок надзвичайних екологічних ситуацій, та встановлення правового режиму зон надзвичайної екологічної ситуації. Ліквідація надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру здійснюється шляхом проведення комплексу невідкладних робіт, спрямованих на усунення небезпечних факторів, рятування життя людей, збереження їхнього здоров'я та обмеження зон ураження.

Забезпечувальні заходи орієнтовані на запобігання екологічним правопорушенням, захист права людини на безпечне для життя і здоров'я довкілля та реалізацію інших екологічних прав. Вони також передбачають застосування заходів державно-правового примусу до осіб, винних у порушенні вимог екобезпеки. Законодавство України гарантує судовий захист порушених прав громадян, а також допускає правомірний самозахист у межах, що відповідають характеру правопорушення та вимогам закону. Судові органи розглядають справи щодо захисту права на безпечне довкілля, відшкодування шкоди, завданої порушенням екологічних вимог, а також справи, пов'язані з ненаданням або приховуванням інформації про стан навколишнього природного середовища та джерела його забруднення.

ВИСНОВКИ

У межах магістерської роботи проведено комплексне дослідження методів побудови цифрової моделі рельєфу засобами геоінформаційних систем, яке підтвердило ключову роль якості вихідних даних та вибору інтерполяційного методу для отримання достовірної цифрової репрезентації рельєфу. Проаналізовані підходи продемонстрували, що точність ЦМР безпосередньо залежить від щільності висотних точок, характеру їх просторового розподілу та використання додаткових джерел інформації, зокрема даних дистанційного зондування.

Практична частина роботи засвідчила ефективність застосування професійних ГІС-платформ ArcGIS та Surfer для моделювання рельєфу із використанням різноманітних інтерполяційних алгоритмів — від зворотно зважених відстаней та поліноміальних моделей до крігінгу, тріангуляції, природної околиці, радіальних базисних функцій та ANUDEM. Порівняльний аналіз точності цифрових моделей показав, що найменшу похибку забезпечують методи TIN, тріангуляція, природна околиця та ANUDEM, що підтверджує їх доцільність для задач, які потребують високої деталізації.

Особливу увагу приділено гідрологічно коректному моделюванню рельєфу. Результати роботи підтвердили, що використання додаткових шарів — річок, озер, ліній стоку та висотних позначок — у методі ANUDEM значно підвищує реалістичність моделі та її придатність для водогосподарських і природоохоронних проєктів. Найвищу точність забезпечили методи TIN (0.42 м), тріангуляція (0.93 м), природна околиця (0.96 м) та ANUDEM (1.07 м).

Проведене дослідження доводить, що цифрові технології моделювання рельєфу значно підвищують продуктивність і об'єктивність аналізу порівняно з традиційними картографічними методами. ЦМР залишаються важливим інструментом у картографії, геодезії, інженерії, будівництві, гідрології, лісовому та сільському господарстві, а також у вивченні природних процесів.

Узагальнюючи результати, можна дійти висновку, що оптимальний метод побудови ЦМР повинен визначатися з урахуванням особливостей вихідних даних, морфології місцевості та завдань просторового аналізу. Отримані у роботі результати підтверджують можливість ефективного застосування різних методів інтерполяції та ГІС-технологій для створення точних і функціональних цифрових моделей рельєфу.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. – Кн. 2 / В.І. Зацерковний, В.Г. Бурачек, О.О. Железняк, А.О. Терещенко. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2017. – 237 с.
2. Світличний О. О. Основи ГІС/ О. О. Світличний, С.В. Плотницький. – Суми : Університетська книга, 2006. – 296 с.
3. Геоінформаційний аналіз просторових даних: Монографія / В. Г. Бурачех, О. О. Железняк, В. І. Зацерковний. – Ніжин : ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2011. – 440 с.
4. Геоінформаційні системи і бази даних: Монографія / В. І. Зацерховний, В.Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2014. – 492 с.
5. Космічні та геоінформаційні системи: навч. посіб. / О.О. Железняк, В.І. Зацерховний, В.С. Кислюк, О.Є. Ніколаєнко. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2016. – 374 с.
6. Що таке SRTM? Данні SRTM, і де їх скачати [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm>.
7. SRTM (ЦМР) України SRTM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://mapgroup.com.ua/services/32-dem-ukraine/83-snmv4>.
8. Особливості відтворення гідрологічних об’єктів за матеріалами лазерного сканування місцевості \ Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва / Бурштинська Х., Бабушка А., Тарнавська О., Василюха І. – Львів: Ліга-прес, 2008, Вип. 1 (15). — С. 200-213.
9. Шипулін В.Д. Основи ГІС-аналізу: навч. посібник / В. Д. Шипулін ; Харк. Нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Х. : ХНУМГ, 2014. – 330 с.
10. Wood J. The geomorphologic characterization of Digital Elevation Models, 2001.
11. Podobnikar Tomaz. Methods for visual quality assessment of a digital terrain model, S.A.P.I.EN. S. 2.2 | 2009, URL: <http://sapiens.revues.org/738>.

12. Supporting GIS professionals with the most comprehensive 3D terrain data for more efficient analyses. URL: <https://www.intermap.com/en-us/databases/nextmap.aspx>.

13. Petrie, G. Introduction to terrain modeling: applications and terminology/ G. Petrie, T. Kennie. In: Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering: A Short Course. University of Glasgow. 1987.

14. Bishop T.F. A., Minasny B. Digital Soil-Terrain Modelling: The Predictive Potential and Uncertainty. In: Grunwald. S. (Ed.), Environmental Soil-Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005. – P. 185-213.

15. Mitsova H. Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS. International Journal of Geographical Information Systems 9(4)/ H. Mitsova, L. Mitsova, W.M. Brown, D.P. Gerdes, L. Kosinovsky, T. Baker. – 1995. – P. 433-446.

16. Bolstad, P.V., T.M. Lillesand. Improved landcover classification in nonhectic Wisconsin using Landsat thematic mapper, soils, and terrain data, Forest Science 38, 1992. – P. 5-20.

17. Guzzetti F. Landslide hazard and risk assessment. PIO dissemination. Bonn, Germany, - 2005.

18. Hernandez Encinas L., S. Hoya White, A. Martin del Rey and G. Rodriguez Sanchez. Modeling forest fire spread using hexagonal cellular automata. Applied Mathematical Modeling 31(60, 2006). – P. 1213-1227.

19. Riedmann M., Haynes M. Developments in Satellite Radar Interferometry for Monitoring Pipelines and Oil & Gas Infrastructure, ROGTEC journal (Russian Oil & Gas Technology), June 2005, 79 p.

20. Farr T.G., Hensley S., Rodriguez E. et al. The shuttle radar topography mission // CEOS SAR Workshop. Toulouse 26-29 Oct. 1999. Noordwijk, 2000. P. 361-363.

21. Shimada M. Advanced Land Observing Satellite (ALOS) and Monitoring Global Environmental Change / M. Shimada, T. Tadono, A. Rosenqvist. – Proc. the IEEE, 98(5). —2010. — pp. 780-799.

22. ALOS Global Digital Surface Model [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.

23. Barber C.P., Shonrudge A.M. Light Detection and Ranging (LiDAR) Derived Elevation Data for Surface Hydrology Applications, Institute of Water Research, Michigan State University, 2004.

24. An Elevation of LiDAR-Derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-off Conditions / Hodgson M.E., Jensen J., Raber G., Tullis J., Davis B.A. Thompson G. and Schuckman K. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71 (7), 2005. — P. 817

25. Ackermann F. Airborne Laser Scanning-present Statues and Future Expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3), 1999. — P. 64-67.

26. A White Paper in LiDAR Mapping, Mosaic Mapping Systems Inc. 2001.

27. Surfer Users Guide. Golden Software Inc. URL: http://downloads.goldensoftware.com/guides/Surfer12_Users_Guide_Preview.pdf

28. Sibson R. "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation" chapter 2 in Interpolating Multivariate Data/ R. Sibson. – New York: John Wiley & Sons. – 1981. – pp. 21-36.

29. ArcGIS Desktop Help [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/>

30. M. F. Hutchinson, Calculation of hydrologically sound digital elevation models, in Proceedings of the 3 rd International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Australia, 3, 1, 1989, pp. 120-127.

31. Curebal, I.; Efe, R.; Ozdemir, H.; Soykan, A.; Sönmez, S. Gis-based approach for flood analysis: Case study of keçidere flash flood event (Turkey). Geocarto Int. 2016, 31, 355-366.

32. Salari, A.; Zakaria, M.; Nielsen, C.C.; Boyce, M.S. Quantifying tropical wetlands using field surveys, spatial statistics and remote sensing. *Wetlands* 2014, 565-574.

33. Qulin Tan. Comparative Analysis of Spatial Interpolation Methods: an Experimental Study / Qulin Tan, Xiao Xu. *Sensors & Transducers*, Vol. 165, Issue 2, February 2014, pp. 155-163.

34. ANU Fenner School of Environment and Society and Geoscience Australia, 2008. GEODATA 9 Second DEM and D8 Digital Elevation Model and Flow Direction Grid, User Guide. Geoscience Australia, 43 pp.

35. Stein, J. L. 2006. A continental landscape framework for systematic conservation planning for Australian rivers and streams. PhD Thesis, Centre for Resource and Environmental Studies. Australian National University.

36. Terrain Analysis: Principles and Applications /Eds. J. P. Wilson, J. C. Gallant. N. Y.: John Wiley & Sons, 2000. 520 p. Ch. 2: Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape /M. F. Hutchinson, J. C. Gallant. P. 29-50.

37. Методичні рекомендації для написання кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти ОС «Магістр» за спеціальністю 193 Геодезія та землеустрій / Укл.: Колодій П., Таратула Р. – Львів, ЛНУП, 2023. – 33 с.