

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ, ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНОЇ ГЕОДЕЗІЇ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
д. ф. – м. н., професор
_____ Железняк О.О.
" ____ " _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»
ЗА ОПП «ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ»

Тема: «Аналіз методів побудови ЦМР засобами геоінформаційних систем»

Виконавець: студентка групи ГС – 208М Рупль Наталія Володимирівна

Керівник: к.ф.-м. н., доцент кафедри Беленок Вадим Юрійович

Нормоконтролер: _____ к.ф.-м. н., доцент Великодський Ю. І.

КИЇВ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій

Кафедра аерокосмічної геодезії

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Освітньо-професійна програма «Геоінформаційні системи і технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.ф.-м. н., професор

_____ Железняк О. О.

“ _____ ” _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

Руль Наталії Володимирівни

1. Тема дипломної роботи: «Аналіз методів побудови ЦМР засобами геоінформаційних систем» затверджена наказом ректора від «25» жовтня 2019 р. №2499/ст.
2. Термін виконання роботи: з 25.10.2019 по 06.02.2020.
3. Вихідні дані до роботи: літературні дані (монографії, наукові статті, матеріали конференцій), картографічні джерела.
4. Зміст пояснювальної записки: поняття цифрової моделі рельєфу, аналіз методів побудови цифрових моделей рельєфу, підвищення точності зображення рельєфу за допомогою методу ANUDEM, охорона праці.
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: _____

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Опрацювати спеціальну літературу за тематикою роботи	25.10.2019 30.10.2019	
2	Підготувати матеріали для 1-го розділу дипломної роботи	31.10.2019 10.11.2019	
3	Підготувати матеріали для 2-го розділу дипломної роботи	11.11.2019 16.11.2019	
4	Ознайомитись з можливостями програми Surfer для побудови ЦМР	17.11.2019 19.11.2019	
5	Оцифрувати горизонталі на топографічній карті масштабу 1:50 000 в програмному забезпеченні ArcGIS	20.11.2019 13.12.2019	
6	Підготувати матеріали для 3-го розділу дипломної роботи	14.12.2019 05.01.2019	
7	Підготувати матеріали для 4-го розділу дипломної роботи	06.01.2019 13.01.2020	
8	Оформлення висновків дипломної роботи	13.01.2020 25.01.2020	
9	Підготовка до захисту дипломної роботи	26.01.2020 05.02.2020	
10	Захист дипломної роботи	06.02.2020	

7. Дата видачі завдання: 25.10.2019.

Керівник дипломної роботи к.ф.-м. н., доцент _____ Беленок Вадим Юрійович

Завдання прийняла до виконання ст. _____ Руть Наталія Володимирівна

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Аналіз методів побудови ЦМР засобами геоінформаційних систем»: 95 сторінок тексту, 54 рисунки, 3 таблиці, 57 використаних джерел, 15 сторінок додатків.

Об'єктом дослідження є цифрові моделі рельєфу.

Предмет дослідження – методи побудови цифрових моделей рельєфу.

Метою дипломної роботи є аналіз точності побудови цифрових моделей рельєфу в ГІС і обґрунтування вибору оптимального методу для створення гідрологічно коректної ЦМР.

Методи дослідження: аналітичний, картографічний, статистичний, методи інтерполяції (зворотно-зважених відстаней, крігінгу, мінімальної кривизни, мофікований метод Шепарда, природної околиці, найближчого сусіда, поліноміальної регресії, радіальних базисних функцій, триангуляції з лінійною інтерполяцією, змінного середнього, локальних поліномів, TIN, ANUDEM). Для моделювання рельєфу в межах об'єкту дослідження використані програми ArcGIS та Surfer.

Результати магістерської роботи рекомендується використовувати при побудові цифрових моделей рельєфу з врахуванням цілей та особливостей рельєфу.

Апробація роботи здійснена на конференціях: «Політ XVIII» (2018), міжнародних конференціях «Геоінформатика 2017» та «Геоінформатика 2018», матеріали увійшли до переліку Scopus, «Політ XIX» (2019), XXI Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених". За результатами досліджень опубліковані статті у фахових виданнях, що входить до переліку ВАК: «Технічні науки та технології» (№1 (7), 2017) та «Вісник астрономічної школи» (№1-2, 2017).

ЦИФРОВІ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ, ІНТЕРПОЛЯЦІЯ, МОДЕЛЬ, SURFER, КАРТА, ANUDEM.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ПОНЯТТЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ	13
1.1 Цифрові моделі рельєфу	13
1.2 Джерела даних для створення ЦМР	19
1.2.1 Оцифрування топографічних карт.....	20
1.2.2 Матеріали польових знімачь та дані супутникового позиціонування.....	22
1.2.3 Дані радіолокаційного інтерферометричного знімання.....	25
1.2.4 Дані лазерного сканування.....	28
1.2.5 Побудова моделі місцевості по стереопарам аеро- та космічних знімків	32
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ .	38
2.1 Поняття інтерполяції поверхонь	38
2.1.1 Метод зворотно-зважених відстаней – “Inverse Distance to a Power”	41
2.1.2 Методи крігінгу – “Kriging”	43
2.1.3 Метод мінімальної кривизни – “Minimum Curvature”	45
2.1.4 Модифікований метод Шепарда – “Modified Shepard’s Method”	46
2.1.5 Метод природної околиці – “Natural Neighbor”	48
2.1.6 Метод найближчого сусіда – “Nearest Neighbor”	50
2.1.7 Поліноміальна регресія – “Polynomial Regression”	50
2.1.8 Метод радіальних базисних функцій – “Radial Basic Function”	51
2.1.9 Триангуляція з лінійною інтерполяцією – “Triangulation with Linear Interpolation”	53
2.1.10 Метод змінного середнього – “Moving Average”	54

2.1.11	Метод локальних поліномів – “Local Polynomial”	55
2.1.12	Розрахунок статистик – “Data Metrics”	56
2.2	Алгоритм побудови моделі рельєфу за стереопарами.....	57
РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ ЗА		
ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ANUDEM		
3.1	Загальні відомості про ANUDEM.....	62
3.2	Базовий алгоритм інтерполяції.....	66
3.3	Практичне використання методу ANUDEM для побудови ЦМР.....	67
3.4	Порівняльний аналіз методу ANUDEM з іншими методами інтерполяції цифрових моделей рельєфу.....	73
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ		
4.1	Загальні визначення.....	82
4.2	Організація робочого місця при роботі з ЕОМ	85
ВИСНОВКИ.....		
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		
Додаток А.....		96
Додаток Б.....		109
Додаток В		110

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – безпілотні літальні апарати.

ГІС – геоінформаційні системи.

ДДЗ – дані дистанційного зондування.

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі.

СКП – середньоквадратична похибка.

ЦМП – цифрова модель поверхні.

ЦМР – цифрова модель рельєфу.

ЦММ – цифрова модель місцевості.

GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування.

SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission.

LiDAR – Light Identification, Detection and Ranging.

ВСТУП

В даний час просторова інформація знаходить все більше застосування в різних галузях науки і виробництва, а ефективність рішення геопросторових завдань за допомогою геоінформатики значно підвищується. Цьому сприяє все більша доступність вихідних даних, створення різнорідних баз даних, поява більш потужних персональних комп'ютерів, а також глобальна інформаційна мережа Інтернет.

В останні роки особливе місце в світі інформаційних технологій відводиться географічним інформаційним системам.

Геоінформаційні системи – це інформаційна система, що забезпечує збір, зберігання, обробку, доступ, відображення і розповсюдження просторових даних [1].

Сучасні методи аналізу геопросторових даних застосовуються в ГІС можуть бути дуже простими, в ряді випадків треба лише створити аналітичну карту, або більш складними і комплексними, що включають багато розрахункових величин для моделювання реального світу і об'єднання великої кількості різних шарів.

Очевидно, що способи відображення і уявлення геопросторової інформації повинні удосконалюватися і розвиватися по шляху підвищення наочності, інформативності та естетичності.

Успіхи впровадження ГІС в практику географічних досліджень пов'язані з розвитком геоінформатики як науки, швидким розвитком автоматизації в картографії і математико–картографічного моделювання геосистем. Одна зі складових цього наукового напрямку – моделювання рельєфу, його картографічна візуалізація та аналіз на основі створених моделей.

Рельєф є одним з основних факторів, що визначають хід і спрямованість процесів, що протікають в при поверхневому шарі планети. Зокрема, рельєф є одним з факторів ґрунтоутворення (так як багато в чому визначає мікрокліматичні і метеорологічні характеристики), що впливають на гідрологічний і тепловий режим ґрунтів.

Рельєф – це підвищення і зниження земної поверхні і дна океанів. Він може бути представлений горизонталями, тоновим відмиванням, тіньовим способом або точковими висотами [1].

Одним із способів зображення рельєфу з застосуванням сучасних технологій є побудова цифрової моделі рельєфу (ЦМР). Перша цифрова модель рельєфу місцевості була виготовлена в 1961 році на кафедрі картографії Військово-інженерної академії. В даний час в деяких розвинених країнах створені національні ЦМР, наприклад, на територію США, Канади, Данії, Ізраїлю та інших країн. Одним з лідерів у сфері створення і використання цифрових моделей рельєфу є США.

Цифрові моделі рельєфу – це особливий вид тривимірних математичних моделей, що представляє відображення “рельєфу” як реального, так і абстрактних геополів (поверхонь). Цифрові моделі є основою представлення даних в автоматизованій картографії.

Подання цифрової моделі рельєфу в тривимірному вигляді в даний час вирішує наступні важливі завдання:

- визначення будь-яких геометричних параметрів рельєфу;
- побудова горизонталей рельєфу, профілів;
- оцінка безпеки будівництва технічних споруд;
- оцінка змін рельєфу і рослинності.

Цифрові моделі рельєфу відіграють фундаментальну роль в науках про землю і техніку та мають безліч застосувань. Вони можуть бути використані для розрахунку похідних величин, таких як об’єм, ухил, кривизна, затінення пагорбів, контури, видимість з заданих ділянок, дренаж і гравітаційне тяжіння.

Приклади застосування ЦМР включають їх використання в якості базового шару в геоінформаційних системах, наприклад, для планування інженерних споруд (автодороги, залізниці, каналів), гідрології (аналіз дренажних і водозбірних зон), берегової лінії (затоплення), масових переміщень в гірських районах, візуалізації і топографічних картах.

Важливим аспектом використання є створення гідрологічно коректних цифрових моделей рельєфу, які дозволяють коректно відображати особливості річкової мережі і забезпечують високу ефективність розрахунків.

На сучасному етапі розвитку науки та техніки людина використовує геть нові способи зображення рельєфу. Можемо бачити та будувати не тільки двовимірні (плоскі) поверхні, а й тривимірні, використовуючи різні методи. Робота з ЦМР значно скорочує витрати часу в порівнянні із традиційними технологіями отримання відміток з топографічних планів.

В даний час на ринку існує величезна кількість програмних продуктів для створення і аналізу цифрових моделей рельєфу, що відрізняються за можливостями та ціною. Їх можна об'єднати в декілька груп:

1. Потужні повнофункціональні модулі. Їх поширеність обумовлена відсутністю необхідності в додатковому програмному забезпеченні. Прикладами цієї групи є модулі: Autodesk Map3D системи AutoCAD; Spatial Analyst, 3D Analyst, Geostatistical Analyst програми ArcGIS (ESRI Inc.); Terrain пакета GeoMedia (Intergraph Corp.) та інші.

2. Програми із застосуванням ЦМР для створення систем віртуальної реальності (вузькоспеціалізовані). Прикладами є: програма Virtual GIS, що входить до складу повнофункціонального комплексу ERDAS Imagine (Leica Geosystems); комплекси MultiGen Creator Terrain Studio і MultiGen Vega Prime, програми ArcScene і ArcGlobe програми ArcGIS (ESRI Inc.).

3. Програмні пакети конкретно для роботи з цифровими моделями рельєфу (мають функції створення ЦМР різними методами). Найбільш відомі пакети програм: Surfer (Golden Software Inc.) і MicroDEM / Terra Base (U.S. Naval Academy).

При виконанні даної роботи використовувались такі програмні засоби: Surfer (Golden Software Inc.); Spatial Analyst, 3D Analyst, Geostatistical Analyst ГІС-пакета ArcGIS (ESRI Inc.).

В даній дипломній роботі буде описано використання та застосування алгоритму ANUDEM (реалізований як метод “Топо в растр” в програмному

забезпеченні ArcGIS) для побудови гідрологічно коректних цифрових моделей рельєфу, також відображення отриманих даних в ArcScene.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення точності зображення рельєфу земної поверхні. Розв'язок цієї задачі дозволить виділити методи, які доцільно використовувати при побудові цифрових моделей рельєфу.

Дана тема є актуальною, оскільки на сучасному етапі розвитку суспільства існує нагальна потреба досліджень морфології та рельєфу в цифровій формі для різних сфер та галузей господарства. Тому є необхідність підвищення якості та ефективності методів створення цифрових моделей рельєфу.

Мета і завдання дипломної роботи. Метою дипломної роботи є аналіз точності побудови цифрових моделей рельєфу в ГІС і обґрунтування вибору оптимального методу для створення гідрологічно коректної ЦМР.

Відповідно до визначеної мети було поставлено та вирішено наступні завдання:

1. Провести аналіз даних, що можуть бути використані для побудови ЦМР.
2. Дослідити методи створення ЦМР в ГІС.
3. Виконати збір висотної інформації з картографічних джерел на територію дослідження у вигляді відповідних шарів у ГІС.
4. Побудувати ЦМР за допомогою методів інтерполяції, реалізованих в ArcGIS і Surfer.
5. Виконати порівняльний аналіз створених ЦМР.
6. Визначити метод побудови ЦМР, який дає найменшу середньо квадратичну похибку у відтворенні рельєфу з використанням контрольних точок.

Об'єктом дослідження є цифрові моделі рельєфу.

Предметом дослідження методи побудови цифрових моделей рельєфу.

Методи дослідження. Застосовано аналітичний, картографічний, статистичний, методи інтерполяції (зворотно-зважених відстаней, крігінгу, мінімальної кривизни, мофікований метод Шепарда, природної околиці, найближчого сусіда, поліноміальної регресії, радіальних базисних функцій, триангуляції з лінійною інтерполяцією, змінного середнього, локальних поліномів, TIN, ANUDEM).

Для моделювання рельєфу в межах об'єкту дослідження використані програми ArcGIS та Surfer.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні найбільш оптимального методу побудови гідрологічно коректної ЦМР за висотними даними в ГІС в сенсі найменшої середньо квадратичної помилки (RMSE) відтворення рельєфу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розроблених рекомендаціях щодо використання того чи іншого методу побудови ЦМР у залежності від поставленої задачі та існуючих даних.

Апробація отриманих результатів. Апробація роботи здійснена на конференціях: «Політ XVIII» (2018), міжнародних конференціях «Геоінформатика 2017» та «Геоінформатика 2018», матеріали увійшли до переліку Scopus, «Політ XIX» (2019), XXI Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених". За результатами досліджень опубліковані статті у фахових виданнях, що входить до переліку ВАК: «Технічні науки та технології » (№1 (7), 2017) та «Вісник астрономічної школи» (№1-2, 2017).

РОЗДІЛ 1

ПОНЯТТЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ

1.1 Цифрові моделі рельєфу

Рельєф є головним елементом географічного середовища і враховується при веденні сільського господарства (дозволяє зрозуміти дренажні системи та характеристики, збереження ґрунту), в гідрології (дозволяє визначити межі вододілів, системи підземних вод, рух води та вплив на її якість), при веденні військових дій (визначає здатність збройних сил брати і утримувати райони, а також переміщати війська). Точне знання рельєфу є життєво важливим в авіації, особливо для маршрутів та маневрів з низьким рівнем польоту. Також варто відзначити, що рельєф є важливою складовою для визначення погодних умов та формування ландшафтів, враховується при освоєнні та заселенні територій.

Одним із способів зображення рельєфу, використовуючи сучасні технології є побудова цифрової моделі рельєфу (ЦМР).

Під цифровою моделлю будь-якого геооб'єкта розуміють певну форму подання вихідних даних і спосіб їх структурного опису, що дозволяє обчислити (відновити) об'єкт шляхом інтерполяції, апроксимації або екстраполяції [2]. У цифровій моделі всі операції проводяться з використанням комп'ютера.

У результаті дослідження теми стало зрозуміло, що на даний момент існує певна невідповідність між англійськими термінами подання цифрових моделей поверхні (ЦМП) та цифровими моделями місцевості (ЦММ). Англійськими аналогами даних понять ЦМП та ЦММ вважаються DSM (Digital Surface Model) та DTM (Digital Terrain Model) [2]. Перша модель включає в себе висоти всіх точок на земній поверхні, а друга – висоти рельєфу або, як доповнення, висоти окремих об'єктів місцевості (рис. 1.1.).

В науковому середовищі немає однієї думки відносно того, що називати цифровою моделлю рельєфу. Отже, нижче наведено визначення цифрової моделі

поверхні, цифрової моделі місцевості, цифрової моделі рельєфу, що наведені у різних літературних джерелах.

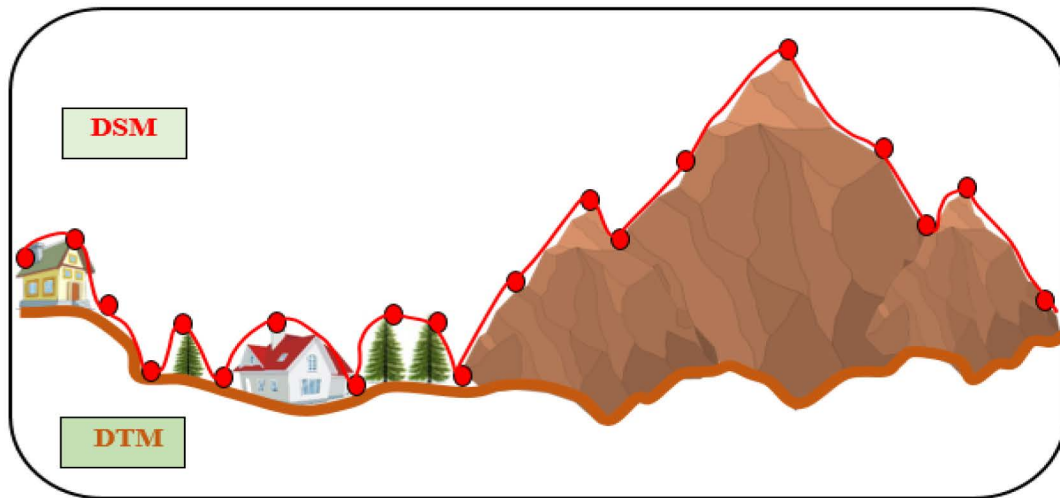


Рис. 1.1. Основні види висотної інформації

В закордонній літературі ЦМР часто визначають як регулярний масив висот, що відраховуються від будь-якої референцної поверхні [3].

Цифрова модель рельєфу – це певна форма представлення вихідних даних та спосіб їх структурного опису, що дозволяє відновити вихідну поверхню рельєфу території в цифровому вигляді [4].

Цифрова модель рельєфу – це файл значень висотних відміток, приурочених до вузлів досить дрібної регулярної мережі і організованих у вигляді прямокутної матриці, що представляє собою цифровий вираз висотних характеристик рельєфу на топографічній карті [5].

Залишається не врегульованим питання визначення та співвідношення між собою схожих по значенню термінів: цифрова модель рельєфу (DEM — digital elevation model), цифрова модель місцевості (DTM — digital terrain model) і цифрова модель поверхні (DSM — digital surface model) [2].

Цифрова модель місцевості – це отримувані на підставі існуючих результатів топографічних зйомок і космічних знімків набори даних, що використовуються для цілей візуалізації ділянок земної поверхні, а також вирішення різноманітних прикладних задач аналізу в ГІС [5].

Цифрова модель місцевості – це сукупність множин метричної, атрибутивної, семантичної, параметричної інформації та класу операцій перетворення над цими множинами [6].

ЦММ – цифрова форма подання земної поверхні у вигляді мережі (матриці) висот або списку тривимірних координат X, Y, Z [7].

На думку словенського картографа Podobnikar, цифрова модель місцевості – це неперервна поверхня, яка крім значень висот, що сформовані у вигляді сітки (відомої як цифрова модель рельєфу), також складається і з інших елементів, що описують топографічну поверхню, таких як схил або каркас місцевості [8].

Цифрова модель поверхні – висота видимої поверхні, цифрова модель місцевості, що відображає природний рельєф місцевості з рослинністю та різноманітними штучними перешкодами [2].

ЦМП – це цифрова модель місцевості, яка вміщує висоти земної поверхні об'єктів натурального (наприклад, рослинність) та штучного походження (наприклад, будівель та споруд) [9]. Таке визначення використовують американські розробники бази даних NEXТMap.

В різних країнах світу автори пропонують ще інші терміни: цифрова модель висот (DНМ — digital height model) – поширений в Німеччині, цифрова модель землі (DGM — digital ground model) – Великобританія, цифрова модель висот місцевості (DTEM — digital terrain elevation model) – введений термін Геологічною службою та Картографічним агентством міністерства оборони США [10].

Головною метою ЦМР є при мінімальній кількості точок моделі забезпечити максимально можливу точність побудови рельєфу місцевості. В простому випадку ЦМР є набором трьохвимірних координат точок та інформації про зв'язки між ними і способами відновлення поверхні по даних точках.

Взагалі ЦМР є дуже розповсюдженими та ефективними для представлення рельєфу. Найбільш поширеним видом цифрової моделі рельєфу, що широко використовується в ГІС, є цифрове подання топографічної поверхні у вигляді растра. Побудова ЦМР у цьому випадку полягає в застосуванні наявного

обмеженого набору точкових даних про позначки топографічної поверхні у суміжні комірки растра з використанням методів просторової інтерполяції [11].

Цифрові моделі поверхонь містять різні типи інформації (рис. 1.2.) [12][13].



Рис. 1.2. Основні типи інформації в цифровій моделі

Метрична інформація визначає вимірювальні характеристики об'єктів. Дана інформація в ГІС вміщує координатні дані і деякі атрибутивні дані.

Атрибутивна інформація – інформація про властивості і зв'язки об'єктів. В ній містяться атрибутивні дані та метадані. Даний тип інформації визначає приналежність точок або об'єктів до певного класу чи об'єкту, описує властивості об'єктів та їх частин, задає взаємозв'язки та умови обробки, умови відтворення [2].

Семантична складова інформації визначає її змістовну сторону, вона пов'язана з кодуванням даних.

Синтаксична частина інформація визначає набір правил і відношень роботи з цифровою моделлю, як зі звичайною інформаційною моделлю. Вона пов'язана з класифікацією і правилами побудови моделей. Ця інформація є дуже типізованою.

За способом розміщення вихідної інформації і правил її обробки на комп'ютері, ЦМР поділяються на три типи [14]:

- з регулярним розташуванням точок на прямокутних, трикутних і гексагональних сітках (GRID);
- з нерегулярним поданням точок по структурних лініях, профілях, центрах майданчиків, локальних точках, випадкових сітках тощо (TIN);
- з ізолінійним поданням точок, що розташовані рівномірно на ізолініях, або з урахуванням їх кривизни горизонталей (TGRID).

Суть моделі TIN в її найменуванні (Triangulation – вказує спосіб побудови набору трикутників; Irregular – точки можуть бути взяті зі змінною щільністю для моделювання ділянок поверхні, де рельєф змінюється занадто різко; Network – відбиває топологічну структуру даної моделі). В просторовому визначенні – це мережа трикутників – з висотними відмітками в її вузлах, що дозволяє представити поверхню, що моделюється як багатогранну (рис. 1.3.).

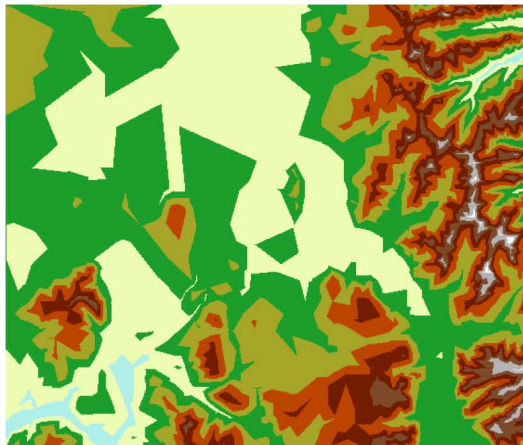


Рис. 1.3. Лінійна нерегулярна мережа системи нерівнокутних трикутників

Цифрові моделі рельєфу дозволяють виконувати такі операції [1]:

1. Швидке отримання інформації про морфометричні показники (висота, кут нахилу, експозиція схилу) в будь-якій точці моделі.
2. Аналіз крутизни та експозицій схилів, побудова «на льоту» відповідних карт.
3. Генерація горизонталей.
4. Побудова профілів поперечного перерізу рельєфу по напрямку прямої або ламаної лінії.

5. Аналіз поверхневого стоку.

6. Розрахунок площ поверхні, рівнів і площ затоплення.

7. Побудова тривимірних моделей рельєфу з можливостями рендерінгу і драпірування поверхні як векторними об'єктами, так і растровими шарами.

8. Створення відеозображення «прольоту» над поверхнею моделі по заданому маршруту (системи віртуальної реальності).

9. Аналіз зон видимості з заданої точки або точок огляду і побудова відповідних карт або тривимірних моделей.

Аналітична обробка ЦМР слугує для отримання похідних морфометричних або інших даних, що включає обчислення кутів нахилу та експозиції; аналіз видимості/невидимості; побудова ЦММ і профілів поперечного перерізу; оцінку форми схилів через кривизну поперечного та поздовжнього перетину; обчислення позитивних та від'ємних об'ємів; генерацію ліній мережі тальвегів та вододілів, що утворюють каркасну мережу рельєфу; інтерполяцію висот; побудову ізоліній; цифрове ортотрасформування зображень, розрахунку різних редуцій аномалій сили тяжіння в гравіметрії та інші обчислювальні операції.

На основі ЦМР стає можливим створення серії тематичних карт важливих морфометричних показників: гіпсометричної карти, карт крутизни та експозиції схилів (рис. 1.4., 1.5.), а на їх основі карт ерозійної небезпеки, напрямків поверхневого стоку, стійкості ландшафтів та інші.

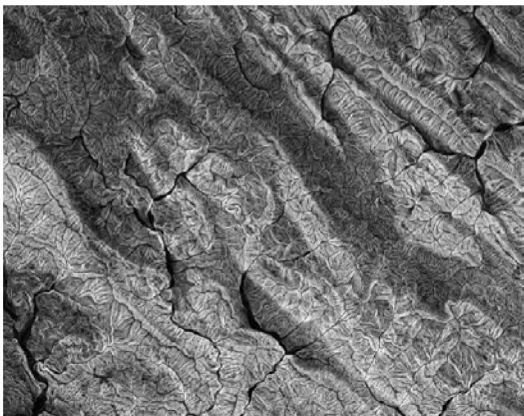


Рис. 1.4. ЦМР, представлена у вигляді карти крутизни схилів



Рис. 1.5. ЦМР, представлена у вигляді карти експозиції схилів

Властивості рельєфу, що визначаються по ЦМР можуть бути успішно використані в багатьох дослідженнях, що орієнтовані на вивчення землі та дослідження її ресурсів, в тому числі – в цілях прогнозування розподілу властивостей ґрунту [15], моделювання ерозійних процесів [16], картографування рослинності [17], оцінка ймовірності схилів [18], аналіз біорізноманіття і репродуктивних особливостей диких тварин [19].

1.2 Джерела даних для створення ЦМР

На сьогодні основними джерелами даних для побудови цифрових моделей рельєфу виступають [9]:

- геодезичні (польові) вишукування, які в сучасних умовах здійснюються переважно за допомогою електронних тахеометрів;
- картометричні методи (використання картографічних матеріалів (карт, планів), з яких методом цифрування (вручну, напівавтоматично або в автоматичному режимі) отримують дискретні дані про об'єкт);
 - дані наземного лазерного сканування;
 - дані лазерного сканування з повітряного носія;
 - інтерферометричні дані, що отримані за допомогою радара, встановленого на літаку чи супутнику;
 - фотограмметричні методи передбачають стереовимірювання просторової моделі об'єкта, побудованої зі стереопари зображень.

Кожне з джерел даних має свої переваги і недоліки, але в цілому слід зазначити тенденцію зростання ролі ДДЗ і фотограмметричних методів створення ЦМР. Дані методи постійно вдосконалюються (це має відношення до швидкодії, оперативності, ефективності, точності, інформативності).

1.2.1 Оцифровування топографічних карт

Оцифровування топографічних карт – це результат переведення в цифрову форму аналогових даних по рельєфу, що зберігаються на паперових носіях у вигляді горизонталей та відміток висот [20]. Іншими словами, при оцифровуванні карт, в електронний варіант переносяться всі дані з зображення (фотографії, скан-копії або книги). Після оцифровування, в креслення можна буде вносити зміни за допомогою спеціалізованих векторних програм.

Головне завдання оцифровування – не просто скопіювати зміст карти, а максимально точно змоделювати рельєф поверхні.

Карта – математично визначене, зменшене, генералізоване зображення поверхні Землі, іншого небесного тіла або космічного простору, що показує розташовані або спроектовані на них об'єкти в прийнятій системі умовних позначень [5].

До картографічних джерел належать [11] (рис. 1.6.):

- топографічні карти і плани, які використовуються для створення ЦМР суші;
- морські навігаційні або топоватиметричні карти для ЦМР акваторій.

Рельєф на топографічних картах позначається системою горизонтальних і висотних відміток. При цьому висота перетину рельєфу горизонталями залежить від типу території і суттєво різниться на топографічних картах різного масштабу [21].

Горизонталі – лінії, що з'єднують на плані й карті точки з однаковою абсолютною висотою.

Топографічні карти або інші карти суші масштаба 1:500 000 і дрібніше практично не придатні для створення точних ЦМР. Це обумовлено певними причинами. По-перше, особливістю вітчизняної гіпсометричної школи. Великий акцент при створенні карт рельєфу зосереджується не стільки на точне місце розташування горизонталей, а скільки на “географічну правдивість, точність зображення і пластичну виразність малюнка місцевості” [22]. Крім того, дуже грубими для створення ЦМР рахуються допуски на зміщення горизонталей для створення карт того чи іншого масштабу.

На топографічних картах прийняті висоти перетину для зображення ділянок рельєфу місцевості, які наведені далі:

- 2,5 м – для карт масштабу 1:10 000;
- 5,0 м – для карт М 1:25 000;
- 10,0 м – для карт М 1:50 000;
- 20,0 м – для карт М 1: 100 000;
- 40,0 м – для карт М 1: 200 000;
- 50,0 м – для карт М 1: 500 000 і дрібніше.

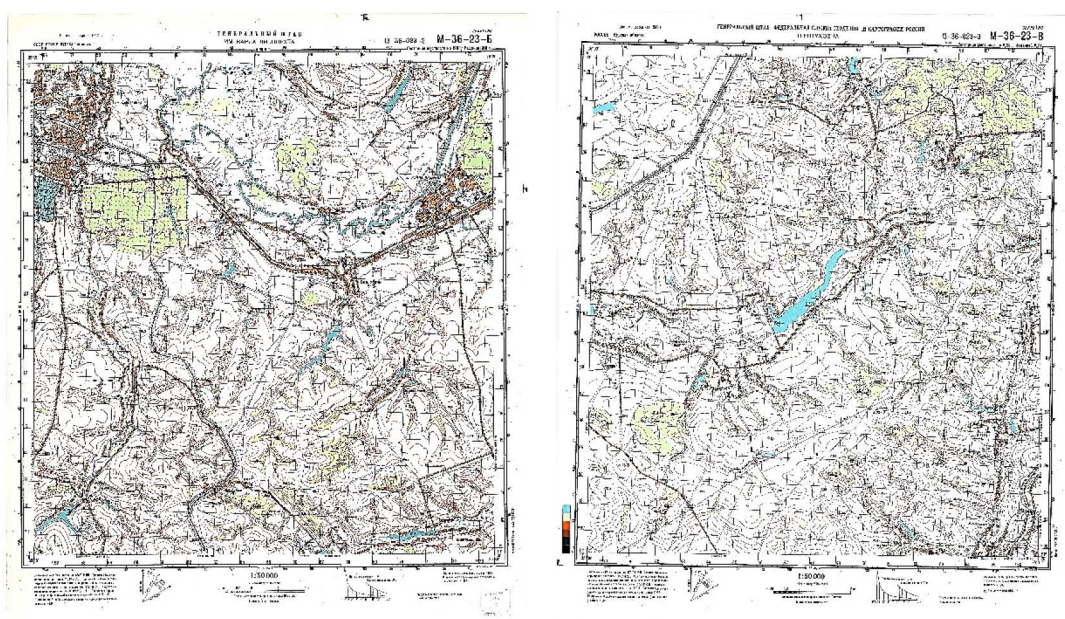


Рис. 1.6. Топографічні карти масштабу 1: 50 000

Прийнято виділяти п'ять основних способів оцифрування топографічних карт:

1. Оцифрування по точках (найбільш трудомісткий процес, що повністю контролюється користувачем).

2. Автоматичне оцифрування (перетворення растрового зображення у векторний формат без втручання людини).

3. Інтерактивне оцифрування (дозволяє об'єднати переваги кожного з вище описаних методів, відповідаючи на вибірку векторизацію матеріалів в залежності від вимог користувача).

4. Сканування.

5. Векторизація за допомогою дигітайзера.

Топографічні карти на територію України в основному виготовлено у паперовому вигляді, а для деяких територій також у вигляді сканованих растрових електронних зображень. Однією з найважливіших завдань є переведення наявної топографічної інформації із аналогової (паперової) форми цифрову [23].

1.2.2 Матеріали польових знімачь та дані супутникового позиціонування

Незважаючи на швидкий прогрес систем дистанційного зондування Землі, матеріали польових зйомок як і раніше залишаються одним з найбільш точних джерел даних для ЦМР. Останнім часом їх інструментарій зазнав серйозних змін. Стандартний набір сучасних інструментів для вимірювання кутів і відстаней на місцевості включає в себе далекоміри, оптичні та лазерні нівеліри, теодоліти, лазерні сканери і тахеометри. Досвід свідчить, що використання зазначених приладів при досить великих обсягах робіт дозволяє суттєво знизити вартість знімачь порівняно з традиційними технологіями у 3–4 рази. Істотним також є збільшення швидкості проведення знімачь (у 3–5 разів).

У процесі геодезичних вимірів (рис. 1.7.) початкова інформація для ГІС утворюється або у цифровому вигляді, або в аналоговому. Однак після камеральної обробки аналогові дані також перетворюються в цифровий вид. Ці результати можуть бути представлені з тією або іншою детальністю і точністю [24].

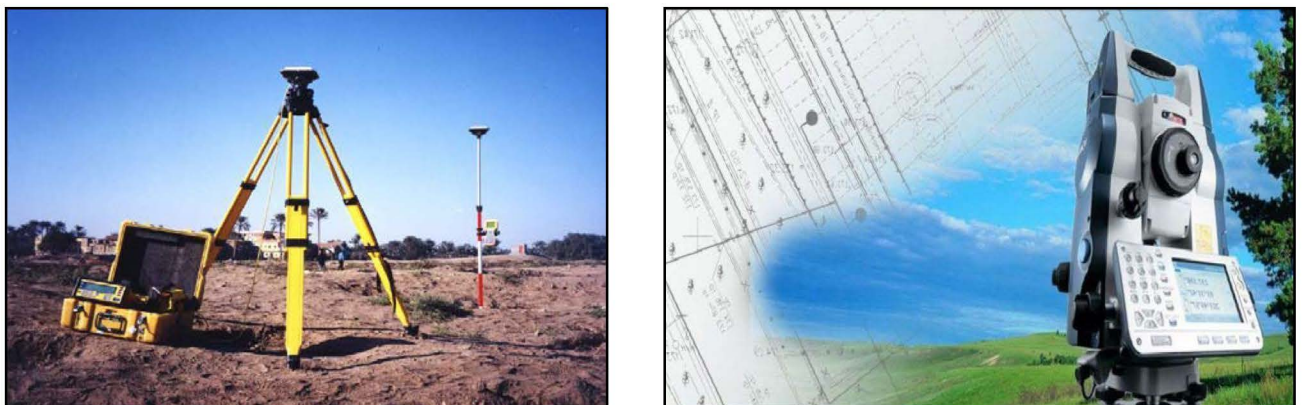


Рис. 1.7. Геодезичне знімачь місцевості

Тахеометричні зйомки. Тахеометром називають теодоліт, поєднаний з далекоміром.

Виконуються для створення планів невеликих ділянок місцевості у великих масштабах або у поєднанні з іншими видами робіт. Результатом знімання є план і території з нанесенням рельєфу та інших особливостей.

Дана зйомка є ефективною, якщо виконуються з використанням електронних тахеометрів або комп'ютерних геодезичних станцій, мікропроцесор дозволяє зберігати дані вимірів у внутрішній пам'яті і робити обробку й аналіз результатів вимірів безпосередньо в полі (рис. 1.8.).

Фототеодолітні зйомки. Виконуються фототеодолітом – це прилад, в якому поєднані теодоліт з фотокамерою (рис. 1.9.). Вони застосовуються головним чином при складному рельєфі – в ущелинах гірських річок, долинах річок з крутими схилами тощо.

Обробку результатів фототеодолітних зйомок доцільно виконувати на універсальних стереофотограмметричних приладах з автоматичною реєстрацією вимірюваних координат точок місцевості або виконувати системну комп'ютерну обробку, використовуючи для цієї мети автоматизовані системи типу “Fotomod”.

Наземно-космічні зйомки з використанням систем супутникової навігації GPS найкраще чином підходять для створення ЦМР (рис. 1.10.). Системи супутникової навігації використовуються, як правило, для визначення координат. При цьому точність визначення координат залежить від кількості та типів приймачів.

В якості елементів інформаційного забезпечення створення ЦМР поступово набувають популярності і дані, отримані за допомогою приймачів систем супутникового позиціонування. В системі GPS і роль геодезичних пунктів виконують космічні апарати [25].

В даний час широко використовуються дані з американської системи GPS. В інших країнах також ведуться розробки: Galileo (Європейська спільнота), COMPASS (Китай), IRNS(Indian Regional Navigation System) (Індія).

GPS (система глобального позиціонування) – супутникова система навігації, яка забезпечує вимірювання відстані, часу і визначає місцезонашування. Дозволяє в

будь-якому місці Землі (виключаючи приполярні області), практично при будь-якій погоді, а також в космічному просторі поблизу планети визначити місце розташування і швидкість об'єктів [5].

Вимоги до GPS такі:

- система повинна забезпечувати визначення вектора стану користувача в будь-який час;
- в будь-якій точці земної поверхні;
- з необхідною точністю.



1.8. Електронний тахеометр [26]



1.9. Фототеодоліт [27]



1.10. GPS – приймач [28]

ГЛОНАСС – це аналог системи GPS, що розроблений у Росії, який розвивався паралельно із розробками США. Хоча у деяких аспектах вони суттєво відрізняються, загалом обидві системи дуже схожі [29].

В даний час як джерела даних для створення ЦМР оцифровані топографічні карти і матеріали польових зйомок поступово відходять на другий план, поступаючись місцем більш прогресивним і ефективним методам отримання даних про рельєф – обробці матеріалів ДЗЗ.

1.2.3 Дані радіолокаційного інтерферометричного знімання

Радіолокаційна інтерферометрія – багатоступінчастий метод обробки комплексних радіолокаційних даних, що передбачає використання набору (двох і більше) радіолокаційних зображень досліджуваної території, отриманих при близьких умовах спостереження, які визначаються інтерферометричною базою.

Інтерферометрична радіолокаційна зйомка з синтезованою апертурою (InSAR) – особливий метод обробки фазового компонента радіолокаційних сигналів, які повертаються від об'єктів земної поверхні [30].

Радіолокаційна інтерферометрія використовує ефект інтерференції електромагнітних хвиль. Технологія інтерферометричної обробки радіолокаційних даних передбачає отримання декількох когерентних вимірів одного і того ж району земної поверхні зі зрушенням в просторі прийомної антени радіолокатора.

Успішною спробою реалізації інтерферометричної радіолокаційної зйомки з метою отримання висотних даних про рельєф землі високої просторової розрізненості стала місія SRTM.

Shuttle radar topographic mission (SRTM) – проект радіолокаційної інтерферометричної зйомки поверхні земної кулі, здійсненої в лютому 2000 р. з борту космічного корабля багаторазового використання (рис. 1.11.) [31].



Рис. 1.11. Цифрова модель рельєфу території України за даними SRTM (в хмарній платформі Google Earth Engine)

Це міжнародна науково-дослідницька робота, в результаті якої були отримані цифрові моделі рельєфу у майже глобальному масштабі від 56° південної широти до 60° північної широти, щоб створити найбільш повну цифрову топографічну базу даних Землі. Зйомка місцевості була зроблена за 11 днів з борту космічного корабля багаторазового використання "Шаттл" за допомогою радарної інтерферометричної камери і двох радіолокаційних сенсорів, встановлених на борту корабля.

Щоб отримати тривимірні дані про поверхню Землі, інженери обладнали космічний корабель двома радарними антенами, що використовують сигнали в С- і Х-діапазонах (довжина хвилі 5,6 і 3,1 см відповідно), додавши висувну 60-метрову щоглу (рис. 1.12.).

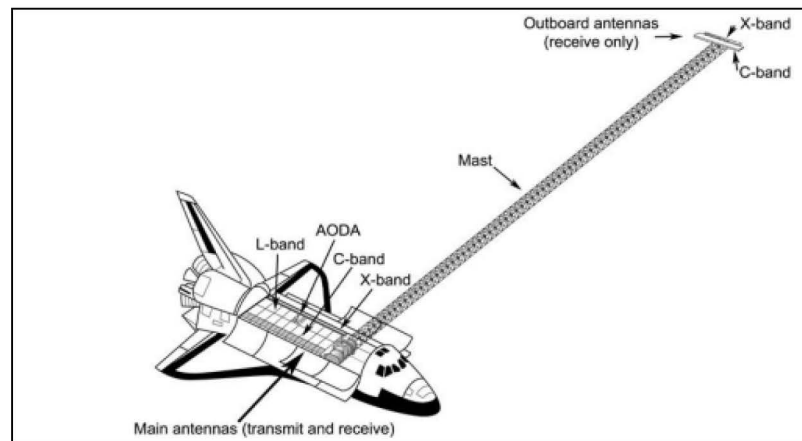


Рис. 1.12. Устаткування SRTM для виконання радарної інтерферометричної зйомки поверхні Землі космічним кораблем "Endeavour".

Main antennas (transmit and receive) – головна антена (передача і прийом сигналів); *L-band* – L-смуга; *C-band* – C-смуга; *X-band* – X-смуга; *Mast* – щогла; *AODA* – авіакосмічна електроніка визначення просторового і орбітального положення; *Outboard antennas (receive only)* – зовнішня (допоміжна) антена (тільки прийом сигналів)

У свій час продуктом SRTM багато хто зацікавився, не один колектив учених почав роботи про аналізі точності висот даних SRTM. Так, за оцінками А.К. Корвеула і І. Евіака матриця SRTM має помилку, яка в середньому становить для рівнинної території -2,9 м і 5,4 м – для горбкуватої місцевості, значна частина цих даних включає систематичну помилку. Відповідно до їхніх висновків, матриця SRTM

підходить для створення контурних ліній горизонталей на топографічних картах масштаба 1: 50 000 і дрібніше [32].

Відкриті дані SRTM:

- мають просторову розрізненність 3 сек (≈ 90 м);
- вертикальна помилка < 20 м;
- розподіляються вільно через Інтернет;
- широко використовуються в ГІС.

Обробка даних радіолокаційної інтерферометричної зйомки має низку особливостей. Інтерферометрична обробка даних ДЗЗ являє собою процес відновлення даних про рельєф по інтерферометричній парі знімків, отриманих за допомогою сигналів різної фази. Радіолокаційне зображення містить інформацію про амплітуду, що характеризує відбивні властивості об'єкта, а також про фазу сигналу, яка визначається віддаленістю до об'єкта.

Оскільки дані SRTM знаходяться у вільному доступі в Інтернеті, то не складає тяжкості їх скачати і отримати ЦМР [33]. Ці дані можна отримати, як для країни в цілому, так і для окремих областей або отримати дані для певного квадрату, що цікавить.

Нещодавно стала доступна ще одна безкоштовна глобальна ЦМР AW3D30 DSM, створена на основі стереознімків у видимому діапазоні спектра, отриманих сенсором PRISM з борта КА ALOS. Дану ЦМР розглядають як альтернативу SRTM1 DEM і ASTER GDEM.

ALOS (Advanced Land Observing Satellite) був одним із найбільших в світі супутників спостереження Землі та був створений компанією Mitsubishi Electric.

Операційна система була запущена 24 січня 2006 року і працювала дуже добре протягом усього терміну виконання місії – життя п'яти років [34]. Супутниковий датчик ALOS (перейменований на "Daichi") мав три інструменти дистанційного зондування:

1. Камера Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) – 2,5 м. Дає можливість отримання триплетів зображень за допомогою трьох камер, які ведуть зйомку в надир, вперед і назад.

2. Багатоспектральна камера (AVNIR-2) для точного спостереження за сушею – 10 м.

3. Синхронний радіолокатор (PALSAR) L-діапазону для спостереження за дощами та нічними погодними спостереженнями на суші. Він дозволяє отримувати радіолокаційні знімки з просторовим розрізненням від 10 до 100 м.

Особливістю застосування місії ALOS є:

1) Картографування земельних ділянок (без необхідності наземних контрольних точок) для картографічних застосувань;

2) моніторинг катастроф у глобальному масштабі (як доповнення до можливостей інших космічних апаратів);

3) ресурсознавство.

Агентство Японської аерокосмічної розвідки (JAXA) випустило "ALOS World 3D – 30 м (AW3D30)" – глобальний набір цифрових поверхневих моделей. Безкоштовне використання даних стало можливим з травня 2015 року [35].

Завданнями ALOS є:

1. Надавати карти для Японії та інших країн, включаючи країни Азіатсько-Тихоокеанського регіону (картографія).

2. Здійснювати регіональні спостереження за "сталим розвитком", гармонізацією навколишнього середовища та розвитком Землі (регіональне спостереження).

3. Проводити моніторинг надзвичайних ситуацій у всьому світі (моніторинг катастроф).

4. Обстежувати природні ресурси (ресурси геодезії).

5. Розробити технологію, необхідну для майбутнього супутника спостереження Землі (технологія розвитку).

1.2.4 Дані лазерного сканування

В останні десятиліття в практиці використовуються методи побудови цифрової моделі рельєфу на підставі лазерного сканування місцевості, яке базується на

лазерному вимірюванні відстані від приладу, встановленому на літаку, до точки місцевості [36].

Лазерне сканування – це метод створення за допомогою лазера (скануванням) цифрової моделі об'єкта у вигляді густої мережі точок з визначеними просторовими координатами.

Суть цієї сучасної технології полягає в визначенні просторових координат точок поверхні об'єкта за допомогою лазерного випромінювання – реєструється напрямок лазерного променя та час його проходження.

Основні параметри лазерного сканера – дальність, точність, швидкість, кут огляду.

Переваги застосування сканера [11]:

- висока швидкість сканування поверхні, що лежить у діапазоні від 5000 до 100 000 вимірів за секунду;
- високий ступінь автоматизації польових робіт, практично за мінімальної участі оператора;
- безконтактність з об'єктом досліджень, який може бути важкодоступним для людини, висока щільність точок на поверхні об'єкта (тисячі або сотні тисяч точок).

Лазерне сканування поділяються на наземне та повітряне (LIDAR).

Сканери геодезичного призначення виготовляють компанії: Riegl (Австрія), Callidus (Німеччина – США), Cyrax (США – Швейцарія), ILRIS (Німеччина), MENSIS (Франція) (рис. 1.13. – 1.17. відповідно).

На точність отримання координат сканерними системами впливають [2]:

- точність визначення віддалі;
- характеристика розрізненості;
- граничні ефекти (розмитість сигналів);
- відбивна здатність поверхонь;
- фізичний стан середовища, в якому поширюється лазерний промінь.

Під час вибору лазерної системи користувач повинен орієнтуватись і на точність роботи системи та на інші чинники. Зокрема, на вартість системи, умови і частоту необхідного калібрування системи, сервісне обслуговування, гарантійні умови й терміни, кадрову підготовку, програмне супроводження системи.



Рис. 1.13 Лазерний сканер RIEGL VQ-250



Рис. 1.14 Універсальний лазерний 3D-сканер Callidus



Рис. 1.15 Наземний лазерний сканер CyraX 2500



Рис. 1.16 Лазерний сканер Ortech ILRIS-HD



Рис. 1.17 3D система лазерного сканування MENSI GS100

LiDAR (Light Identification, Detection and Ranging) – технологія отримання інформації про земну поверхню за допомогою активних оптичних систем, що

використовують явища відбиття світла і його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах [37].

З метою картографування земної поверхні лідари, що розміщуються на повітряних носіях, оснащуються активними лазерними випромінювачами, інерційних навігаційними системами (INS) і GPS-приймачами [38]. Об'єднання технологій INS і GPS направлено на точне визначення в просторі положення лідара, напрямки його руху і відстані до об'єктів місцевості. Кожну секунду лідар здатний випускати до 10 000 імпульсів, одночасно приймаючи і обробляючи ті з них, що вже відбилися від земної поверхні (рис. 1.18.).

Точність даних лідарної зйомки залежить від висоти і швидкості польоту, а також від кута сканування. Кут лідарної зйомки з літака, як правило, не перевищує 20° , в той час як рекомендована для сканування висота польоту становить 1000 м [39]. Щільність покриття поверхні точками сканування безпосередньо залежить від швидкості польоту і розміру комірки лазерного сигналу на місцевості. У більшості випадків цей параметр для первинних даних лідарної зйомки варіюється в межах 2-4 м [40].

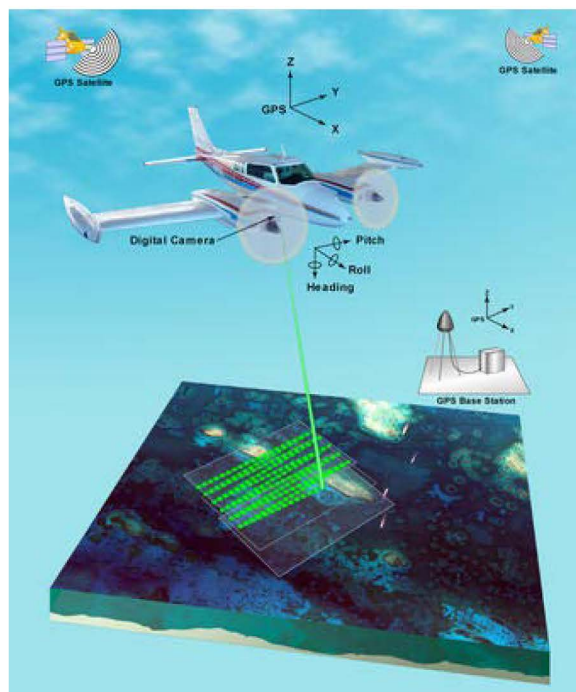


Рис. 1.18. Схема лазерного сканування з літака

Коли йдеться про картографування території, то з технологічного погляду побудова ЦМР системами ЛІДАР вимагає так званого "очищення", тобто

усуваються імпульси, що не пов'язані з поверхнею Землі. Частково це робиться апаратно-програмно, але повністю цей процес автоматизувати не вдається й тому потрібне втручання оператора-фотограмметриста.

Програмне забезпечення по обробці даних повітряного лазерного сканування постійно вдосконалюється. Крім інструментів автоматичної класифікації вони володіють можливостями напівавтоматичної фільтрації точок та їх ручного редагування.

Порівняно з аерофотозніманням, лазерне сканування має низку переваг. Оскільки така система є активною з позицій випромінювання, то отриманий образ не залежить від натурального освітлення території. Тому можна виконувати знімання з малих висот з-під хмар, здійснювати знімання вночі, а в цей період доби Земля закрита хмарами значно менше. На таких зображеннях немає тіней, а для всієї території отримуємо фактично одну стереомодель [11].

1.2.5 Побудова моделі місцевості по стереопарам аеро- та космічних знімків

На даному етапі розвитку фотограмметрична обробка є найбільш ефективним способом отримання даних про рельєф з фотографічних та сканерних знімків.

Фотограмметрія – це наука і технологія отримання правдивої інформації про предмети реального світу і навколишнього середовища шляхом реєстрації, вимірювання та інтерпретації знімків та їх електромагнітного випромінювання, що надходить від системи датчиків [41]. При цьому серії знімків мають бути сформовані таким чином, щоб сусідні зображення створювали стереопари. Обов'язковою умовою створення стереомоделі є наявність отриманих в процесі побудови та врівноваження фототріангуляційної мережі елементів взаємного та внутрішнього орієнтування знімків.

ДДЗ поєднують усі типи даних, що отримані з носіїв космічного й авіаційного базування (літаки, гелікоптери, радіокеровані апарати), та становлять значну частину дистанційних даних, на відміну від знімків, отриманих в умовах фізичного контакту з об'єктами знімання.

Розрізняють аеро- та космічні знімання. Але якщо їх детально проаналізувати, то принципової різниці між ними не існує. Так, це дійсно знімання з різних літальних апаратів і з різних висот. Уявлення про різкі відмінності космічних і аерознімків з'явилося тоді, коли вперше з'явилися доступні знімки з космосу.

Основна відмінність між аеро- й космічними зніманнями полягає у висоті, з якої відбувається знімання, що впливає на масштаб отриманого зображення. Це призводить до відмінностей у розрізненості і в площині, що покривається одним кадром: на аерознімках можна побачити об'єкти розміром в одиниці сантиметрів, для космічних знімків – 0,51-метрові об'єкти – дуже добрий показник. Зате площі, які покриваються одним кадром космічного знімка, можуть бути надзвичайно великими: тисячі, десятки тисяч квадратних кілометрів і навіть більше [29].

Типові масштаби зображень, отримуваних під час аерознімання – 1:5 000 – 1:50 000, а для космічних знімків у різних випадках – це 1:20000 і дрібніші.

Космічні знімання здійснюються із висоти більше 100 км. Останнім часом матеріали космічних знімків стали більш доступними для користувачів, і ці матеріали дешевші, ніж матеріали аерознімків, хоча мають при цьому добру якість (рис. 1.19.).

Аерознімання (рис. 1.20.) може здійснюватися майже з будь-яких висот польоту (враховуючи можливості літального апарата).



Рис. 1.19. Знімок території м. Київ, отриманий із супутника Landsat

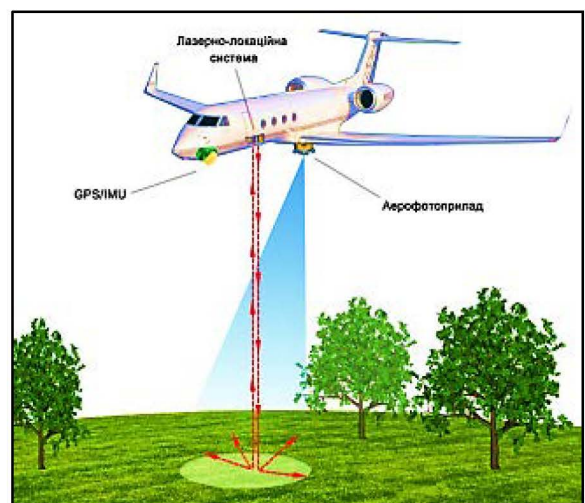


Рис. 1.20. Аерофотознімання

На даному етапі розвитку систем ДЗЗ успішно використовуються декілька комерційних систем, дані яких активно поширюються. Сьогодні Україна забезпечена даними ДЗЗ, отриманими з космічних апаратів NOAA, "Meteosat", "Метеор-3М", "Terra", а також знімками з комерційних космічних апаратів LANDSAT, IRS, "Ikonos", "QuickBird", SPOT, "Ресурс" та іншими.

Одним з важливих фотограмметричних процесів, які виконуються при створенні карт, є створення цифрових моделей рельєфу. Для визначення координат точок місцевості по стереопарі знімків методом прямої фотограмметричної засічки необхідно, щоб були відомі елементи зовнішнього орієнтування знімків. На практиці в більшості випадків їх значення невідомі.

Дані з WorldView, GeoEye, Pleiades-1A, Cartosat-1, QuickBird, Ikonos, SPOT, ALOS/PRISM, Kompsat-3, LANDSAT, Quickbird, OrbView-3, RapidEye, EROS, IRS можна використовувати для побудови цифрових моделей рельєфу по стереопарах.

Практичне використання властивостей стереозору має місце при обробці аерокосмічних знімків з метою визначення рельєфу зображеної місцевості при організації зору для робототехнічних систем.

Два суміжних знімки, що перетинаються, утворюють стереопару, стереоскопічне спостереження та вимір якої дозволяє побудувати стереоскопічну геометричну модель.

У цьому випадку визначення координат точок місцевості по стереопарі знімків виконують методом подвійної зворотної фотограмметричної засічки. Рішення завдання за цим методом виконується в послідовності, що подана нижче:

1. Визначають п'ять елементів взаємного орієнтування знімків, які визначають взаємну кутову орієнтацію стереопари знімків і базису фотографування, для цього необхідно виміряти не менше п'яти відповідних точок на стереопарі знімків.

2. Будують фотограмметричну модель об'єкта по виміряним на стереопарі координатам відповідних точок і значень елементів взаємного орієнтування знімків. Побудована модель подібна сфотографованому об'єкту, але має довільний масштаб і довільно розташована, також орієнтована щодо системи координат об'єкту.

3. Визначають сім елементів зовнішнього орієнтування фотограмметричної моделі по опорних точках, що визначають масштаб моделі, її положення й орієнтацію щодо системи координат об'єкту. Для цього достатньо трьох опорних точок, які не лежать на одній прямій. За значеннями елементів зовнішнього орієнтування фотограмметричної моделі і елементів взаємного орієнтування можна визначити елементи зовнішнього орієнтування стереопари знімків.

4. За координатами точок, визначених у системі координат моделі, і елементам зовнішнього орієнтування моделі знаходять координати точок в системі координат об'єкту.

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:

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

Основні переваги створення ЦМР фотограмметричним методом:

- оперативність отримання актуальних та ретроспективних матеріалів дистанційного зондування Землі, що лежать в основі моделювання;
- автоматизація процесу моделювання засобами сучасних цифрових фотограмметричних систем;
- висока точність моделювання.

На сучасному етапі розвитку науки та техніки для отримання знімків місцевості використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА).

Безпілотний літальний апарат – літальний апарат без екіпажу на його борту, призначений для керованих або некерованих польотів (рис. 1.21.). Управління ними здійснюється за допомогою бортових програмних пристроїв або дистанційно по радіо – дискретно або безперервно [5].

Методика фотограмметричної обробки матеріалів аерозйомки з БПЛА в цілому аналогічна методиці обробки класичних даних аерозйомки. Однак є ряд істотних відмінностей, зумовлених специфікою конструкції БПЛА і особливостями камери на його борту.

В силу своїх розмірів і маси, вони значно поступаються габаритам літаків, БПЛА більшою мірою схильні до впливу метеорологічних умов – вітру та опадів. Це негативно відбивається на керованості БПЛА і точності елементів зовнішнього орієнтування знімків. Другий момент – використання некаліброваних камер. Відсутність калібрування у малоформатних камер, що входять в стандартну поставку БПЛА, знижує фактичну точність елементів внутрішнього орієнтування знімків [20].



Рис. 1.21. Безпілотні літальні апарати

Залежно від принципів керування, розрізняють такі різновиди безпілотних літальних систем:

- безпілотні некеровані;
- безпілотні автоматичні;
- безпілотні дистанційно-пілотовані літальні апарати.

БПЛА масово застосовуються у військовій справі, в першу чергу для ведення повітряної розвідки – як тактичної, так і стратегічної. Крім того, невійськові дрони застосовуються для розв'язання великого кола завдань, виконання яких пілотованими літальними апаратами з різних причин недоцільно або неможливо. Такими завданнями є: моніторинг повітряного простору, земної й водної поверхонь, екологічний контроль, керування повітряним рухом, контроль морського судноплавства, розвиток систем зв'язку, польова логістика, художня фотографія.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ

В даному розділі описано методи для побудови цифрових моделей рельєфу в програмному забезпеченні Surfer. В основі методів побудови безперервних поверхонь на основі дискретних масивів просторово-координованих даних лежать процедури просторової інтерполяції.

Програма Surfer досить поширена, відносно дешева, проста в освоєнні. Склалося так, що ця програма набула широкого поширення і по суті стала стандартом програм подібного типу, про що говорить включення формату файлів Surfer в програми інших виробників.

Кожен метод інтерполяції має свій власний набір параметрів. Деякі з параметрів є однаковими для різних методів. У програмі Surfer-16 представлено 12 методів просторової інтерполяції. Ці методи і їх параметри, а також рекомендації по використанню описані нижче.

Перевага Surfer – можливість вибору методу інтерполювання точок сітки, який даватиме найкращі результати для певних форм рельєфу. Кожен метод інтерполяції має свій власний набір параметрів. Деякі з параметрів є однаковими для різних методів.

Також, описані алгоритми побудови моделі рельєфу за стереопарами.

2.1 Поняття інтерполяції поверхонь

Інтерполяція – це відновлення функції на заданому інтервалі по відомим її значенням в кінцевій множині точок, що належать цьому інтервалу. Якщо допустити, що збільшення функції пропорційне приросту аргументу (лінійна інтерполяція), то функція замінюється ломаною, що складається з відрізків прямих, що з'єднують пари сусідніх значень [5].

Для опису поведінки просторово розподілених явищ використовується поняття просторова змінна – це числова змінна $Z = Z(X, Y)$, яка приймає значення в довільній точці області дослідження; X, Y – координати точки в просторі (на площині).

Суть інтерполяції полягає в використанні наявних даних для отримання очікуваних значень в невідомих точках.

Щоб створити модель безперервної поверхні, необхідна безліч регулярно розташованих точок, але зробити вимірювання в кожній неможливо. Замість цього береться вибірка точок, для яких визначаються значення (висота, концентрація і т.п.):

1. Випадкова вибірка – коли кожне місце однаково ймовірно, щоб бути обраним.
2. Регулярна - проводиться згідно з правилом (наприклад, через кожен 1 км).
3. Упорядкована - коли відомо, що генеральна сукупність містить істотно різні підсукупності.

Поняття вибіркової та регулярної вибірки можна відобразити візуально, як це показано на рис. 2.1.

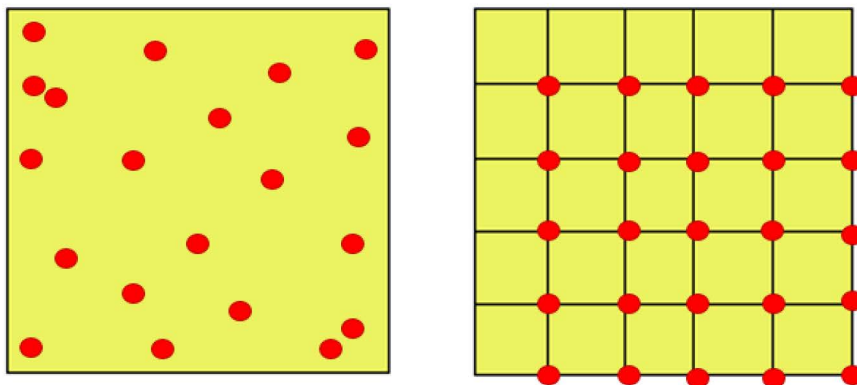


Рис. 2.1. Випадкова та регулярна вибірки відповідно

Задача інтерполяції може бути сформульована так: відомі значення функції при деяких значеннях аргументів, необхідно представити функцію формулою для всього діапазона значень аргументів. Таке формулювання не є строгим, оскільки може існувати велика кількість різних формул, які задовольняють дискретним значенням вихідних даних. Для коректної постановки задачі інтерполяції додатково повинен бути вказаний вид функції.

Існують дві категорії методів інтерполяції:

1. Детерміновані методи інтерполяції поверхонь використовують для інтерполяції математичні функції і не мають випадкової компоненти.

До детермінованих методів належить:

- інтерполяція за методом глобального полінома;
- інтерполяція за методом локального полінома;
- метод обернено зважених відстаней;
- радіальні базисні функції;
- інтерполяція з бар'єрами;
- ядро дифузії;
- згладжування ядра.

2. Геостатистичні методи інтерполяції ґрунтуються на математичних і статистичних моделях, що враховують просторову автокореляцію між опорними точками.

Існує кілька видів крігінга, які підходять для різних типів даних і мають різні базові припущення. Серед них:

- ординарний крігінг;
- простий крігінг;
- універсальний крігінг;
- індикаторний крігінг;
- імовірнісний крігінг;
- диз'юнктивний крігінг;
- полігонна інтерполяція;
- емпіричний байесовський крігінг.

Методи інтерполяції можуть також бути класифіковані як точні або неточні. Використовуючи точну інтерполяцію, прогнозовані значення в точках, для яких значення відомі, будуть відомими значеннями. Неточні методи інтерполяції не пов'язані цим обмеженням, тобто значення спостережуваних даних й інтерпольовані значення для цієї точки не обов'язково ті ж самі [42].

Інструменти інтерполяції поверхні створюють безперервну (або прогнозовану) поверхню за значеннями, виміряними в опорних точках.

Характеристики інтерпольованої поверхні можна контролювати шляхом обмеження вхідних точок, використовуваних для розрахунку значень вихідної комірки. Це може бути зроблено за рахунок обмеження кількості точок замірів або області, з якої беруться точки вимірів. Зазначення максимальної кількості точок вибірки використовуватиме точки, найближчі до місця вихідної комірки, поки буде досягнуто максимальну кількість комірок [2].

Ефективність програми інтерполяції визначається:

1. Набором методів інтерполяції.
2. Можливістю дослідника керувати параметрами методів інтерполяції.
3. Наявністю засобів оцінки точності та достовірності побудованої поверхні.
4. Можливістю уточнювати отриманий результат на основі особистого досвіду експерта з урахуванням різноманітних додаткових факторів, які не могли бути відображені у вигляді вихідних даних.

2.1.1 Метод зворотно-зважених відстаней – “Inverse Distance to a Power”

Зворотно-зважені відстані – алгоритм просторової інтерполяції, в якому інтерпольовані значення обчислюються у вигляді зваженої суми відомих значень, причому їх ваги обернено пропорційні відстані до інтерпольованої точки [5].

Розраховує значення кожного осередку растра, усереднюючи значення опорних точок в заданій околиці даного осередку, за умови, що чим ближче точка знаходиться до центру розрахункового осередку, тим більше її внесок (вага) в інтерпольоване значення в порівнянні з більш віддаленими. Метод зворотно-зважених відстаней однозначно передбачає, що об'єкти, які знаходяться поблизу, більш подібні, ніж об'єкти, віддалені один від одного.

В якості оцінки змінної Z в деякій точці досліджуваної області цей метод використовує середнє зважене значень змінної Z в вибіркових точках, як показано у формулі 2.1:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_{0i} Z_i}{\sum_{i=1}^n w_{0i}}, \quad (2.1)$$

де Z_0 – розраховане середньозважене значення комірки, що обробляється;

Z_i – значення опорних точок, що потрапили в задану околицю;

w_{0i} (вага j -ої точки) – деяка зворотна функція відстані.

Метод зворотних відстаней працює в припущенні, що експериментальні значення, виміряні близько від інтерпольованого розташування, надають більший вплив на результат оцінки, ніж віддалені від нього на значну відстань.

Звідси випливає:

- точки вибірки, розташовані ближче до точки, де робиться оцінка, повинні мати більшу вагу;
- вага вибірових точок повинна зменшуватися зі збільшенням відстані від інтерпольованого розташування. В результаті поверхня стає більш детальною і менш згладженою.

Вага вибірових точок для методу Зворотно зважені відстані задається наступним чином (формула 2.2):

$$w_{0j} = \frac{1}{(\sqrt{d_{i0}^2 + \delta^2})^\beta}, \quad (2.2)$$

де d_{i0} – відстань між точкою (X_0, Y_0) , де розраховується оцінка та j -тою точкою вимірювання;

δ – параметр згладжування;

β – степеневий параметр.

Степеневий параметр β визначає, як швидко буде зменшуватися вага зі збільшенням відстані. Якщо значення β занадто високе, то на інтерполяцію вплинуть тільки вибірові точки, розташовані в безпосередній близькості. По мірі збільшення β оцінка наблизатиметься до оцінки, що дається методом найближчого сусіда. Для менших β ваги будуть розподілені більш рівномірно між сусідніми точками даних.

Якщо значення β наближається до нуля, то ваги всіх точок вибірки стають однаковими (рівними 1), а оцінка вироджується в просте середнє значення [43].

Параметр згладжування δ дозволяє враховувати фактор «неточності» даних. Якщо $\delta = 0$, то метод працює як точний інтерполятор. Тобто в будь-якій вибірковій точці обчислена оцінка буде дорівнювати вимірним значенням. Якщо $\delta > 0$, то метод працює як інтерполятор згладжування, і чим більше параметр згладжування, тим менше вплив будь-якого конкретного спостереження при обчисленні оцінки в довільній точці.

Зауважимо, що на картах ізоліній, побудованих за розрахованою цим методом растровою моделлю, часто спостерігається ефект, так званих, “волових очей” – малюнок з концентричних контурних ліній навколо точок вибірки. Зменшити цей ефект можна збільшивши значення параметра згладжування δ . Проте якщо цей параметр більше нуля, то при розрахунку значення поверхні в жодному вузлі ґрида не буде співпадати зі значеннями у вихідних точках, навіть коли вихідна точка збігається з вузлом. Чим більший параметр, що згладжує, тим менший вплив має вихідна точка на розрахункове значення.

Метод зворотно-зважені відстані з достатньою точністю інтерполірує поверхню, якщо точки випробування розподілені відносно рівномірно і поверхня однорідна. Цей метод, як правило, застосовується, коли вплив змінної зменшується зі збільшенням відстані від точки виміру. Даний метод є гнучким і малоємним з точки зору використання обчислювальних ресурсів.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Зворотно-зважених відстаней” наведена в Додатку А рис. А.1.

2.1.2 Методи крігінгу – “Kriging”

Крігінг (Kriging) – це метод інтерполяції, що дозволяє по набору точок поверхні з відомими значеннями визначити значення в проміжних точках [5]. При крігінгу розподіл об'єктів в просторі аналізується статистичними методами, в основі яких

лежить варіограмний аналіз, дозволяє визначити залежність між передбачуваним становищем проміжної точки і відстанями між точками з відомими значеннями.

Крігінг – метод інтерполяції, розроблений в 70-х роках Д. Дж. Крігом (D.J. Krige), що враховує не тільки далекість вихідних точок від тих, що інтерполюються, але і їх взаємне розташування. При цьому близькі одна від одної вихідні точки вважаються більше корельованими і тому одержують меншу вагу.

Реалізовані в різних додатках методи крігінга вирішують задачу інтерполяції із застосуванням лінійних оцінок. Це три основні форми крігінга:

- простий крігінг (використовується, якщо відоме математичне сподівання випадкової функції Z);

Простий крігінг може використовувати або варіограми, або коваріаційні функції, він може використовувати перетворення, і він може допустити наявність помилок у вимірах.

- ординарний крігінг (математичне очікування випадкової функції Z невідоме, але постійне);

Ординарний крігінг може використовувати або варіограму, або коваріаційні функції, він може використовувати перетворення і віднімання тренда, і він може також допустити наявність помилок у вимірах.

- універсальний крігінг (математичне очікування випадкової функції Z невідоме і не постійне).

Крім того, окремо виділяється кокрігінг. Кригінг та кокрігінг найбільш широко використовуються в геології та сейсмології, а також в гідрогеології, екології, дистанційному зондуванні.

Формула (2.3) крігінгу [43]:

$$Z(s_0) = \sum_{i=0}^N \lambda_i Z(s_i), \quad (2.3)$$

де $Z(s_i)$ – вимірюване значення в місці розташуванні i

λ_i – невідома вага для вимірюваного значення в місцерозташуванні i ;

s_0 – місце розташування прогнозу

N – кількість виміряних значень.

Для застосування методу крігінга попередньо повинна бути отримана модель варіограми – міри просторової кореляції даних, яка і є основним параметром методу.

Варіограма – це функція, яка пов'язує відмінність в значеннях опорних точок і відстань, на якій вони стоять один від одного.

Основні етапи створення геостатичної моделі включають:

1) аналіз і попередню обробку даних (декластерізація, виявлення трендів і областей просторової неоднорідності, аналіз розподілу значень, що випадають, анізотропії),

2) розрахунок значень емпіричної варіограми або коваріації,

3) побудова моделі варіограми або коваріації,

4) рішення системи рівнянь крігінга для визначення ваги,

5) отримання прогнозного значення і помилки (невизначеності) оцінки в довільній точці області дослідження (наприклад, у вузлах регулярної сітки).

Крігінг є дуже гнучким методом, він може бути або точним, або згладжуючим інтерполятором в залежності від значень параметрів. Він дозволяє ефективним і природним чином включати в модель анізотропію і тренди.

Метод крігінга дає хороші результати для більшості наборів даних, в силу чого є рекомендованим і обраним за замовчуванням в Surfer.

Крігінг за свідченнями [44] є найбільш підходящим методом відновлення полів океанологічних даних. Це – метод, який використовує статистичні параметри для більш точної побудови поверхонь.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Крігінг” наведена в Додатку А рис. А.2.

2.1.3 Метод мінімальної кривизни – “Minimum Curvature”

Метод “Мінімальної кривизни” широко використовується в науках про землю. “Minimum Curvature” розраховує значення з використанням математичної функції, яка мінімізує загальну кривизну поверхні і буде згладжену поверхню, що проходить через опорні точки:

- проходить точно через вихідні опорні точки – сплайн натягу;
- виходить за межі діапазону значень з опорних точок – регуляризований сплайн.

Однак, даний метод не є точним. Він генерує найбільш гладку поверхню, яка проходить настільки близько до експериментальних точок, наскільки це можливо. Метод є неточним, оскільки на схемі можуть з'являтися “хибні” ізолінії, тобто функція екстраполює на площі, де немає вхідних даних.

Робота методу Minimum Curvature поділена на два етапи: локальна інтерполяція і глобальна екстраполяція. Під час локальної інтерполяції значення отримують вузли сітки, що знаходяться в заданій околиці точок вхідних даних. Під час глобальної екстраполяції значення присвоюються всім осередкам сітки.

Оскільки, для побудови цифрової моделі рельєфу в даній роботі використовується програма Surfer, то вікно Parameters дозволяє задати критерій збіжності.

Параметр Max Residuals (Максимальна нев'язка) вимірюється в тих же одиницях, що і експериментальні дані. Отже, найбільш підходяще значення цього параметра дорівнює, приблизно, 10% від точності вхідних даних. Якщо вихідні експериментальні дані виміряні з точністю 1,0 одиниць виміру, то значення Max Residuals рекомендується покласти рівним 0,1. Ітерації тривають до тих пір, поки максимальна нев'язка для всієї ітерації не стане менше значення параметра Max Residuals [43].

Метод підходить для поверхонь, що повільно змінюються: рельєф (сильно не розчленований), концентрація небезпечних речовин у повітрі.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Мінімальної кривизни” наведена в Додатку А рис. А.3.

2.1.4 Модифікований метод Шепарда – “Modified Shepard's Method”

Однією з модифікацій методу зворотних відстаней (Inverse Distance to a Power) є метод Шепарда, який використовує зворотні відстані для розрахунку вагових коефіцієнтів. Але при побудові інтерполяційної функції використовується метод

найменших квадратів, що зменшує ймовірність появи ізоліній типу “волового ока” (це є відмінною рисою двох методів).

В якості оцінки змінної Z в довільній точці (X_0, Y_0) області дослідження використовується середнє зважене значень апроксимуючих функцій в цій точці, що показано у формулі 2.4:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i \in N_0} w_{0i} Q_i(X_0, Y_0)}{\sum_{i \in N_0} w_{0i}} \quad (2.4)$$

Підсумовування ведеться не по всім n вибірковим точкам, а лише по n_w найближчим сусідам тієї точки, де виконується оцінка. Тут N_0 – набір номерів таких найближчих вибіркових точок ($|N_0| = n_w$). Число n_w – параметр метода, що контролює його локальність.

На відміну від методу зворотних відстаней замість значень самої змінної Z , виміряних в вибіркових точках, усереднюють значення n_w апроксимуючих функцій, побудованих навколо кожного з n_w спостережень. В якості таких функцій програма Surfer використовує квадратичні функції (формула 2.5) [43]:

$$Q_i(X, Y) = a + b \cdot X + c \cdot Y + d \cdot X \cdot Y + e \cdot X^2 + f \cdot Y^2 \quad (2.5)$$

Коефіцієнти i -ої функції визначаються методом зважених найменших квадратів по n_q вибірковим точкам – найближчих сусідів i -ої точки вибірки; ваги визначаються за формулою. Параметр n_q відповідає за інший аспект локальності методу. Застосування такого підходу дозволяє позбавлятися від появи ефекту “волових очей”.

Модифікований метод Шепарда по визначенням є точним інтерполятором. В програмі Surfer реалізація даного методу дозволяє використовувати ще один параметр – параметр згладжування δ , що змушує метод працювати як інтерполятор згладжування. Найбільш прийнятні значення цього параметра – від 0 до 1.

Метод Шепарда некоректно відображає характер забруднення і аналогічно методу “Minimum Curvature” утворює помилкові ізолінії.

Цифрова модель рельєфу побудована методом Шепарда наведена в Додатку А рис. А.4.

2.1.5 Метод природної околиці – “Natural Neighbor”

Метод інтерполяції “Природної околиці” (Natural Neighbor) використовує середньозважене значення локальних даних, яке засноване на концепції координат природного околу, обумовленого полігонами Тиссена [42].

У цьому методі оцінка змінної Z в деякій точці області дослідження визначається як середнє зважене значень цієї змінної в вибіркових точках (фактично в найближчих вибіркових точках):

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n w_{i0} \cdot Z_i, \quad (2.6)$$

де ваги w_{i0} визначаються з використанням діаграм Вороного. Діаграми Вороного також називають полігонами Тиссена або комірками Діріхле.

Полігонами Тиссена називаються багатокутники, побудовані навколо мережі точкових об’єктів таким чином, що для будь-якої позиції в межах полігонів відстань до центрального точкового об’єкта завжди менша, ніж до будь-якого іншого об’єкта мережі, що розглядається [2]. Полігони Тиссена є зручним інструментом для здійснення просторового аналізу на сусідство, близькість і досяжність (рис. 2.2.).

Однією з головних властивостей діаграми Вороного є її взаємна відповідність з триангуляцією Делоне. А саме, якщо з’єднати ребрами вихідні точки, чий полігони Тиссена межують один з одним, то отримаємо триангуляцію Делоне (рис. 2.3.).

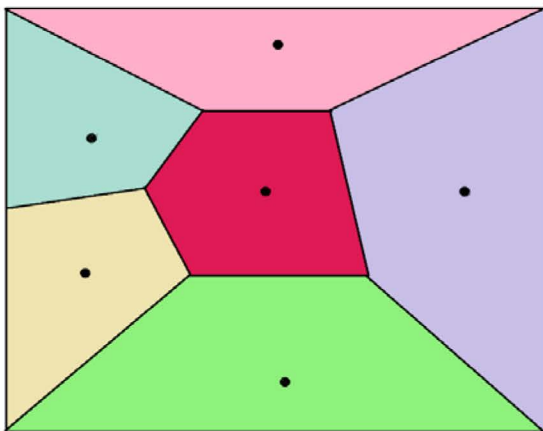


Рис. 2.2. Полігони Тиссена

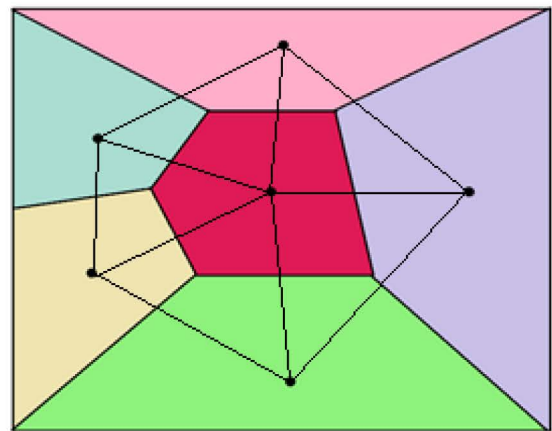


Рис. 2.3. Полігони Тиссена та триангуляція Делоне

Алгоритм, який використовується інструментом інтерполяції “Природна околиця”, знаходить найближчу до потрібної точки підмножину вхідних зразків і застосовує до них ваги, засновані на пропорційних областях, щоб інтерполювати значення [45].

Прикладом використання полігонів Тиссена може слугувати вибір місця розташування нової автозаправної станції (АЗС) в місті Житомир (рис.2.4.). На рис. 2.5. показано розбиття простору на полігони Тиссена. Із врахуванням розташування АЗС та економічних, політичних та географічних факторів можна вибрати доцільне місце для побудови, як це показано на рис. 2.6.

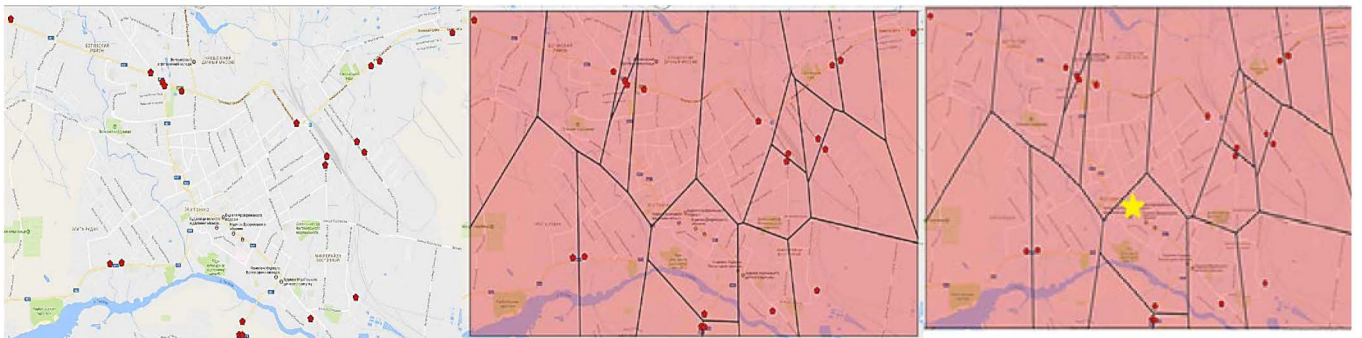


Рис. 2.4. Існуючі АЗС в м. Житомир

Рис. 2.5. Полігони Тиссена

Рис. 2.6 Вибране місце положення АЗС

Метод дозволяє отримувати хороші ізолінійні карти за наборами даних, що містить скупчення вибірових точок в одних підгалузях досліджуваної території і розріджені вибірові точки в інших підгалузях. Отримана в довільній точці оцінка Z завжди буде знаходитись в межах діапазону значень в найближчих точках. У побудованій моделі не буде “піків”, “ям”, “хребтів”, “долин”, які не були б представлені вихідними даними. Метод є точним інтерполятором.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Природної околиці” наведена в Додатку А рис. А.5.

2.1.6 Метод найближчого сусіда – “Nearest Neighbor”

Інтерполяція з найближчим сусідом (також відома як проксимальна інтерполяція або точкова вибірка) – простий метод багатоваріантної інтерполяції в одному або декількох вимірах. Алгоритм методу найближчих сусідів ґрунтується на порівнянні відомих статистичних даних з новими елементами.

В якості оцінки змінної Z в деякій точці досліджуваної області береться значення, яке має найближча (по Евклідовій відстані) вибіркова точка (формула 2.7) [43]:

$$Z_0 = Z_i, \quad (2.7)$$

де Z_i – значення у вибірковій точці, розташованій ближче інших до місця розташування (X_0, Y_0) .

Всім найближчим сусідам присвоюється певна вага, для всіх інших точок вага дорівнює 0. Даний метод дуже простий, дає зміщену (незадовільну) оцінку і в результаті завжди виходять дискретні величини.

Цей метод рекомендується використовувати в тому випадку, якщо вихідні вибіркові точки розташовані регулярно (у вузлах деякої регулярної сітки, що покриває досліджувану область) або майже регулярно (незначно зміщені). Вихідна растрова модель повинна мати крок рівний або близький до кроку вибіркової сітки.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Найближчого сусіда” наведена в Додатку А рис. А.6.

2.1.7 Поліноміальна регресія – “Polynomial Regression”

Метод Polynomial Regression використовується для оцінки просторового тренда в даних, тобто залежності досліджуваної просторової змінної Z від координат X, Y . Цей метод не є інтерполяційним методом, оскільки отримана поверхня не проходить через експериментальні точки. Він призначений для виявлення глобальних просторових трендів і втрачає детальну локальну інформацію, що міститься в даних.

У програмі Surfer при виборі поліноміальної регресії можна задати її тип. У діалоговому вікні, яке з'являється після натискання на кнопку “Advance Options”, задається вид полінома, з використанням якого будується поліноміальна модель тренда.

У Surfer реалізовані наступні типи рівнянь регресії [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 задати поліноміальне рівняння регресії за допомогою параметрів групового вікна Parameters.

Рівняння поліноміальної регресії Z на X , Y будується з використанням методу найменших квадратів на основі всіх вхідних даних і метод можна вважати глобальним і згладжуючим інтерполятором. Оцінкою змінної Z в довільній точці досліджуваної області буде значення, обчислене по отриманому рівнянню регресії (формула 2.8) [43]:

$$Z_0 = Q(X_0, Y_0), \quad (2.8)$$

де $Q(X, Y)$ – побудований поліном.

Мета поліноміальної регресії полягає в тому, щоб моделювати нелінійні відносини між незалежними і залежними змінними (технічно, між незалежною змінною і умовною середньою із залежною змінною).

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Поліноміальної регресії” наведена в Додатку А рис. А.7.

2.1.8 Метод радіальних базисних функцій – “Radial Basic Function”

Радіальна базисна функція (РБФ) – це група різноманітних методів інтерполяції даних. Метод радіальних базисних функцій вважається точним інтерполяційним методом, але для отримання більш гладкої поверхні зазвичай застосовують відповідний параметр (параметр, що згладжує).

В даному методі оцінка змінної Z в довільній точці області дослідження знаходиться як лінійна комбінація значень радіальних базисних функцій (формула 2.9):

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i B(d_{i0}), \quad (2.9)$$

де d_{i0} – відстань між точкою, де обчислюється оцінка та i -ою точкою вимірювання;

λ_i – коефіцієнт i -ої вибіркової точки;

$B()$ – радіальна базисна функція, аргументом якої є відстань d_{i0} .

Радіальна базисна функція є ядерною функцією, яка визначає оптимальні ваги, що застосовуються до точок даних під час інтерполяції. В Surfer такі види РБФ:

- мультіквадратична функція (Multiquadric);
- обернена мультіквадратична функція (Inverse Multiquadric);
- мультілогарифмічна функція (Multilog);
- плоский сплайн (Thin-Plate Spline);
- кубічний сплайн (Natural Cubic Spline).

Всі методи РБФ-функції є методами точної інтерполяції. Підхід, заснований на розбитті простору колами або гіперсферами. Гіперсфера задається своїм центром і радіусом.

Кожна базова функція має різну форму і дозволяє отримувати різні інтерпольовані поверхні. Найбільш часто використовується мультіквадратична функція, яка є найкращою з точки зору побудови гладкої поверхні, що проходить через експериментальні точки.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Радіальних базисних функцій” наведена в Додатку А рис. А.8.

2.1.9 Триангуляція з лінійною інтерполяцією – “Triangulation with Linear Interpolation”

Триангуляція – один з методів створення мережі опорних геодезичних пунктів і сама мережа, створена цим методом. Полягає в побудові рядів або мереж, трикутники примикають один до одного і визначають положення їх вершин в обраній системі координат.

Триангуляція з лінійною інтерполяцією використовує алгоритм побудови триангуляції Делоне – розбиття області дослідження на сукупність трикутників.

В триангуляції Делоне для того, щоб уникнути зламів ізоліній на ребрах полігонів для кожної вихідної точки будується локальний поліном першого або другого степеня, і по триангуляції ці локальні поліноми “склеюються” в одну гладку поверхню. При цьому повинна виконуватися умова Делоне – всередину кола, описаного навколо будь-якого побудованого трикутника, не повинна потрапляти жодна з заданих точок триангуляції. Якщо точка знаходиться поза трикутником, алгоритм використовує значення найближчої точки або значення NODATA.

Для оцінки змінної Z в деякій точці (X_0, Y_0) області дослідження спочатку визначається, в який трикутник вона потрапила.

Нехай інтерпольована точка потрапила в трикутник, утворений вибірковими точками з координатами (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) і (X_3, Y_3) . Тоді в тривимірному (X, Y, Z) просторі будується площину, що проходить через точки з координатами (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) і (X_3, Y_3, Z_3) . Рівняння площини (формула 2.10) [43]:

$$a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z + d = 0 \quad (2.10)$$

Оцінкою змінної Z в точці (X_0, Y_0) буде відповідне значення на цій площині (формула 2.11):

$$Z_0 = \frac{-a \cdot X_0 - b \cdot Y_0 - d}{c} \quad (2.11)$$

Використання цього методу при невеликому числі точок вибірки призводить до появи видимих трикутних граней на модельній растровій поверхні, або великих прямолінійних сегментів на карті ізоліній. Триангуляція з лінійною інтерполяцією працює краще, якщо дані рівномірно розподілені по досліджуваній території.

Метод точно відтворює значення в вибіркових точках, тобто є точним інтерполятором. Метод може враховувати анізотропію досліджуваної змінної. Недолік цього методу – можливі розриви на кордонах, що знижує наочність полів, побудованих за відновленими даними.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Триангуляція з лінійною інтерполяцією” наведена в Додатку А рис. А.9.

2.1.10 Метод змінного середнього – “Moving Average”

Оцінкою змінної Z в деякій точці досліджуваної області, отриманої за цим методом, буде середнє арифметичне значень у вибіркових точках, які потрапили в пошуковий еліпс з центром в цій точці (формула 2.12):

$$Z_0 = \frac{\sum_{i \in N_0} Z_i}{n_0} \quad (2.12)$$

Підсумовування ведеться по n_0 найближчим сусідам точки інтерполяції, що потрапили в околицю пошуку. Тут N_0 – набір номерів таких вибіркових точок ($|N_0| = n_0$).

Алгоритм змінного середнього в Surfer має наступні параметри [43]:

1. radius1: перший радіус (вісь X, якщо кут нахилу дорівнює 0) еліпса пошуку. Для використання усіх точок цей параметр повинен бути рівним 0.
2. radius2: другий радіус (вісь Y, якщо кут нахилу дорівнює 0) еліпса пошуку. Для використання усіх точок цей параметр повинен бути рівним 0.
3. angle: кут радіуса пошуку в градусах (рахується проти годинникової стрілки). За замовчуванням 0.
4. Minimum number of data points to use: мінімальне значення кількості точок. Якщо знайдено точок менш заданого параметра, вузол ґріда вважається порожнім і буде заповнений значенням NODATA.
5. NODATA marker to fill empty points: Значення, яке присвоюється порожнім вузлам ґріда. За замовчуванням 0.

Метод змінного середнього не рекомендується використовувати, якщо обсяг вибірових даних невеликий або середній. Однак в разі великих і дуже великих наборів просторових даних, він є корисним інструментом дослідження. Цей метод дозволяє виявляти різномасштабні тренди в даних і швидко працює навіть на дуже великих вибірках.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Змінного середнього” наведена в Додатку А рис. А.10.

2.1.11 Метод локальних поліномів – “Local Polynomial”

Метод локальних поліномів (Local Polynomial Interpolation, LPI) – це помірно швидкий інтерполятор, який є плавним (неточним). Він більш гнучкий, ніж метод глобальних поліномів, але вимагає прийняття більшої кількості рішень.

Цей метод також оцінює залежність просторової змінної Z від координат X , Y . Будує поліноміальну регресію Z на X , Y за даними, що потрапили в пошуковий еліпс з центром в заданій точці області дослідження, отримуючи, таким чином, поліноміальне наближення в локальній околиці цієї точки. Реалізація методу в Surfer використовує локальні поліноми ступеня 1, 2 або 3 [43].

Метод локальних поліномів найбільш підходить для моделювання локально гладких поверхонь. Глобальний поліном першого порядку відповідає площині; глобальний поліном другого порядку відповідає поверхні з вигином, що дозволяє відображати долини; глобальний поліном третього порядку може характеризувати два вигини. Але для поверхні з мінливою формою, наприклад ландшафту з чергуванням схилів і рівних поверхонь, глобальний поліном не підходить. Локальні поліноми представляють таку поверхню більш точно.

Інтерполяція по методу глобального полінома погоджує поліном з усією поверхнею, інтерполяція по методу локальних поліномів підбирає безліч поліномів, кожен з яких підбирається до певної околиці, що перекривається. Околиця пошуку може бути визначена розміром і формою, числом сусідів і конфігурацією сектора [46].

Метод локальних поліномів підходить для заданого порядку (нульовий, перший, другий, третій і т. д.) полінома, що використовує тільки точки в певній околиці. Околиці перекриваються, а значення, яке використовується для кожного проінтерполірованого значення, є значенням підібраного полінома в центрі міста.

Інтерполяція за методом локальних поліномів буде точнішою, якщо у даних є наступні властивості: зразки були відібрані по регулярній сітці (через рівні відстані) та значення даних в околиці пошуку нормально розподілені. Практично, більшість наборів даних не мають таких властивостей. У таких випадках це вплине на інтерпольовані значення, але не в такій мірі, як на стандартні помилки інтерполяції.

Переваги методу локальних поліномів:

- Можливість створювати рівні поверхні і розпізнавати тенденції дальньої дії в наборі даних;
- Використовується, коли набір даних містить дані короткого діапазону.

Недоліки методу локальних поліномів:

- Не досить точні розрахунки;
- Чуттєві до сусідніх точок, тому завжди потрібно попередньо переглянути поверхню перед створенням шару.

Інтерполяція за методом локального полінома використовується в тих випадках, коли в наборі даних є варіація для малих діапазонів і її можна виявити лише використовуючи даний метод.

Цифрова модель рельєфу побудована методом “Локальних поліномів” наведена в Додатку А рис. А.11.

2.1.12 Розрахунок статистик – “Data Metrics”

Вибір цього методу дозволяє розраховувати в вузлах заданої сітки різні показники (основному статистичні) на основі значень в вибіркових точках, які потрапили в пошуковий еліпс.

Даний метод, в загальному випадку, не є інтерполяційним. Він призначений для попереднього аналізу вихідних даних.

При підрахунку статистик в Surfer може бути задана околиця пошуку вибіркового даних, а також задані і враховані відомі лінії порушення просторової безперервності і лінії розломів.

2.2 Алгоритм побудови моделі рельєфу за стереопарами

Обробка космічних і аерознімків пов'язана з певними особливостями. На відміну від аерознімка (фотографічного або цифрового), побудованого в центральній проекції, зображення космічного сканерного знімка у напрямку польоту і напрямку сканування будується в різних проекціях. Це слід враховувати при фотограмметричній обробки даних ДЗЗ. Спектральний діапазон зйомки важливий при створенні 3D-моделей і дешифруванні об'єктів місцевості.

Відповідно до теорії фотограмметрії, для отримання стереомоделі потрібно щонайменше два зображення, що мають перекриття. В результаті проведення ряду обов'язкових фотограмметричних операцій, що реалізуються засобами цифрової фотограмметричної системи (ЦФС): внутрішнього, взаємного, зовнішнього орієнтування знімків і їх подальшого зрівняння, зі знімків формуються стереопари.

Стереопара – це пара плоских зображень одного і того ж об'єкта, що має відмінності між зображеннями (отримані з різних точок простору), покликані створити ефект об'єму.

Фотограмметричний блок методики (рис. 2.7.) включає в процеси фотограмметричної обробки матеріалів ДЗЗ – класичних стереопар аеро- і космічних знімків, а також специфічних даних (аерознімків з БПЛА). Сформована зі знімків стереомодель – необхідна основа побудови цифрових моделей рельєфу.

Були сформульовані основні дії з фізичними величинами, які потрібно виконати, щоб визначити рельєф місцевості, який зображений на знімках стереопари:

- на ділянці стереопари задають наближене уявлення рельєфу місцевості;
- деформують згідно з ним відповідні ділянки зображень стереопари;
- формують по ним критерій точності визначення рельєфу;

- знаходять значення параметрів, при яких критерій точності приймає екстремальне значення;
- за отриманими значеннями параметрів визначають рельєф місцевості на даній ділянці стереопари.

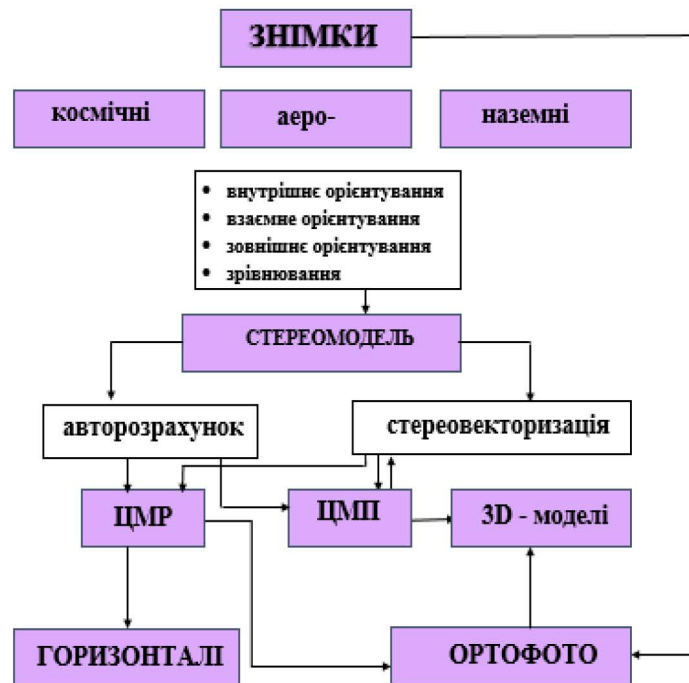


Рис 2.7. Фотограмметричний блок методики комплексного геоінформаційно-фотограмметричного моделювання рельєфу

Можна виділити наступні кроки у процесі оброблення стереопари аеро- та космічних знімків:

1. Орієнтування зображення. Мета орієнтування – обчислення невідомих кутових і лінійних величин, що визначають взаємне положення знімків в просторі на момент зйомки.

Елементи орієнтування знімків прийнято розділяти на елементи внутрішнього, взаємного та зовнішнього орієнтування. Для наземних і аерознімків елементи внутрішнього і зовнішнього орієнтування задаються вручну або напівавтоматично з урахуванням даних камери.

Для космічних знімків – автоматично, на основі метаданих зображень і супровідних файлів до них. В залежності від сенсора космічні зображення можуть

поставлятися з різним набором таких файлів, що обумовлює використання тих чи інших алгоритмів фотограмметричної обробки знімків [20]:

- строгий (дозволяє обробляти космічні знімки, які містять файли метаданих з елементами внутрішнього і зовнішнього орієнтування);
- універсальний (дозволяє обробляти будь-які космічні зображення, проте, вимагає при цьому більше, у порівнянні із строгим алгоритмом, число опорних точок на стереопару (мінімум 6));
- RPC-алгоритм (rational polynomial, коефіцієнтів дозволяє використовувати невелику кількість опорних точок).

До елементів внутрішнього орієнтування аерознімків відносяться фокусна відстань фотокамери і координати головної точки. В залежності від типу камери додатково можуть задаватися параметри: коефіцієнт дисторсії об'єктива, розмір пікселя або розмір сенсора (для цифрових камер), координати міток (для аналогових).

Елементи взаємного орієнтування – величини, що визначають взаємне положення знімків, які утворюють стереопару під час фотографування. Для їх розрахунку на знімках виконують вимір відповідних сполучних точок.

Наступним завданням є зовнішнє орієнтування моделі, яке полягає у приведенні її до заданого масштабу щодо геодезичної системи координат. До елементів зовнішнього орієнтування відносяться координати центрів проекції і кути нахилу знімків в момент експозиції.

2. Зрівнювання зображень. Необхідною і достатньою вимогою для зрівнювання блоку є наявність елементів внутрішнього і взаємного орієнтування. Це означає, що зрівняти блок фототріангуляції можна і у вільній моделі – без даних про геоприв'язку знімків (елементів зовнішнього орієнтування).

Для сканерних космічних зображень попередній вибір параметрів зрівнювання залежить від використання певного алгоритму обробки даних: строгий, універсальний, RPC-алгоритм.

3. Отримання даних про висоти. Під отриманням висотної інформації слід розуміти ручну і автоматизовану побудову ЦМП і ЦМР у векторній та растровій формі.

4. Стереовекторизація. Здійснюється в режимі стерео з використанням спеціального обладнання: дзеркальних або височастотних моніторів, анагліфічних, поляризаційних окулярів. Суть стереовекторизації – ручне оцифрування в режимі стерео елементів загальногеографічного змісту карт: структурних ліній рельєфу, гідрографічної мережі, рослинності, будівель і споруд – у формі точкових, лінійних або полігональних об'єктів.

5. Автоматизована побудова ЦМР і ЦМР. Принцип дії даного алгоритму базується на аналізі коефіцієнта кореляції між відповідними точками знімків стереопари.

Для побудови ЦМР і ЦМР по пікетах накладаються різні обмеження на склад вихідних даних. ЦМР доцільно створювати на основі відфільтрованих пікетів і проведених в режимі стерео структурних ліній рельєфу та об'єктів гідрографії. А ЦМР – на основі невідфільтрованих пікетів, контурів будівель і рослинності.

Методика фотограмметричної обробки матеріалів аерозйомки з БПЛА в цілому аналогічна методиці обробки класичних даних аерознімання. Все ж є ряд істотних відмінностей, зумовлених специфікою конструкції БПЛА і особливостями камери на його борту (рис. 2.8.).

БПЛА набагато більшою мірою схильні до впливу метеорологічних умов – вітру та опадів. Це негативно відбивається на керованості БПЛА і точності елементів зовнішнього орієнтування знімків. Другий момент – використання некаліброваних камер (знижує фактичну точність елементів внутрішнього орієнтування знімків).

Низька точність елементів внутрішнього орієнтування може бути усунена шляхом самокалібрування камери на етапі зрівнювання знімків. Обов'язковим в цьому випадку є наявність вимірювань достатнього числа опорних точок.

Після закінчення процедури самокалібрування створюється файл з новими параметрами камери – уточненими значеннями фокусної відстані, координат головної точки і коефіцієнтів дисторсії. Виконавши внутрішнє орієнтування знімків з урахуванням скоригованих параметрів, можна переходити до усунення помилок взаємного орієнтування і зрівнювання знімків відповідно з допусками [47].

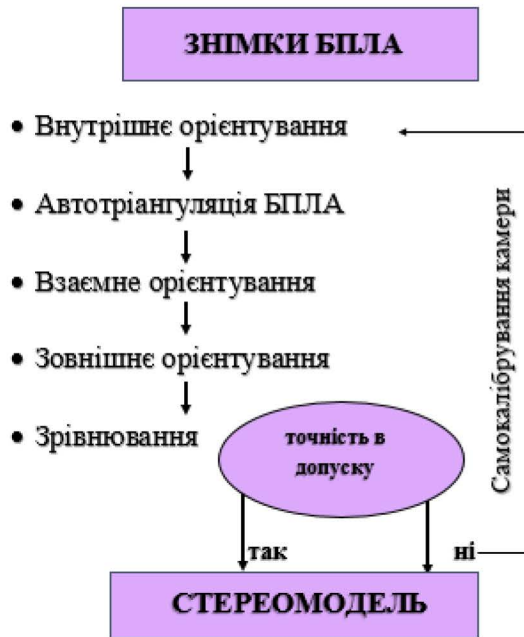


Рис. 2.8. Схема фотограмметричної обробки знімків з БПЛА

Зрівняний блок знімків підготований до побудови ЦМР відповідно до стандартної методики.

РОЗДІЛ 3

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ANUDEM

3.1 Загальні відомості про ANUDEM

Алгоритм ANUDEM – це локально-адаптивний інтерполяційний підхід, який запропонований Майклом Хатчинсоном в Австралійському Національному Університеті [48]. Даний алгоритм використовує метод інтерполяції, що спеціально розроблений для створення поверхні, яка більш точно представляє природну поверхню дренажу і зберігає як лінії хребта, так і мережі потоків.

Метод використовує ітеративний метод інтерполяції кінцевих різниць, який оптимізує обчислювальні ефективності локальної інтерполяції без утрати безперервності поверхні глобальної інтерполяції. Така модель рельєфу може використовуватися для визначення гідрографічних характеристик річок і їх басейнів, а також для гідрологічного моделювання (рис. 3.1.).

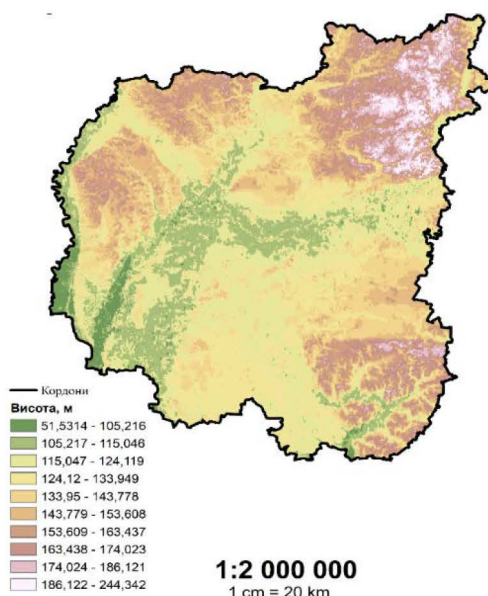


Рис. 3.1. ЦМР побудована методом “Топо в растр” за даними ALOS

ANUDEM враховує особливий характер поверхонь рельєфу, а також специфічні точки поверхні, які можуть бути використані для зображення рельєфу. Топо-растрова

модель розглядається багатьма дослідженнями для отримання гідрологічно коректних ЦМР (наприклад, [49][50]).

Поняття гідрологічної коректності ЦМР включає два основних положення [51]:

- в ЦМР мають бути відсутні фіктивні точки стоку (фіктивні депресії);
- потокові лінії (талвеги) на ЦМР повинні збігатися з вихідними відрізками річкової мережі.

Програма ANUDEM відрізняється можливістю швидко обробляти різні типи даних у вигляді точок, ліній і коректно відображати поверхню з висотами, що плавно змінюються по ділянці і ділянками з різким перепадом висот.

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.). 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. Немає обмежень у кількості вхідних висотних позначок, прочитаних з файлів даних, які надані користувачем.

2. Дані точок знижень (рис. 3.3.). 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).

3. Дані гідрографічної мережі (рис. 3.4.). 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. 3.5.). 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.

5. Ізолінії (рис. 3.6.). 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. 3.7.). 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

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.

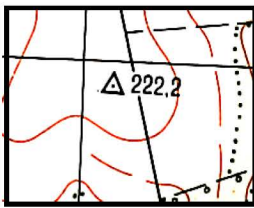


Рис. 3.2. Висотні позначки

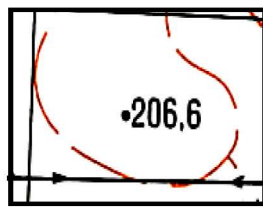


Рис. 3.3. Точки знижень

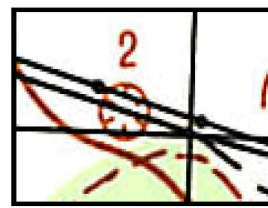


Рис. 3.4. Гідрографічна мережа

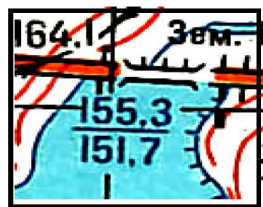


Рис. 3.5. Обриси берегової лінії

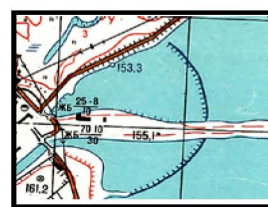


Рис. 3.6. Ізолінії



Рис. 3.7. Кордони озер

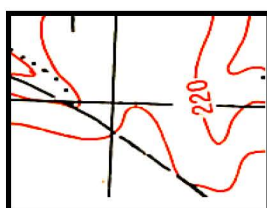


Рис. 3.8. Обриви

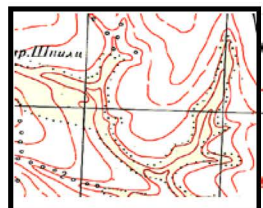
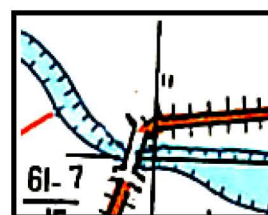
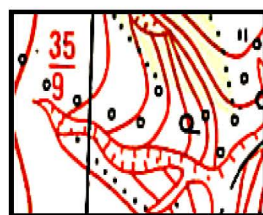


Рис. 3.9. Винятки



Якість отриманих ЦМР може сильно відрізнятись залежно від джерела даних та техніки інтерполяції. Поточна версія ANUDEM, яка використовується в ArcGIS – 5.3.

Автори статті [52] провели оцінку цифрової моделі рельєфу, яка побудована методом ANUDEM. В результаті, було отримано такі значення для горбистої місцевості:

- середня абсолютна похибка – 2.704 м;
- середньоквадратична похибка – 5.864 м.

А для гірської місцевості:

- середня абсолютна похибка – 5.918 м;
- середньоквадратична похибка – 7.083 м.

Отримані похибки є найменшими серед методів інтерполяції, що досліджувались: крігінг, зворотно-зважених відстаней, інтерполяція сплайнами, природної околиці, полігони Тиссена (TIN).

ANUDEM була використана для розробки дев'ятисекундної цифрової моделі рельєфу Австралії [53], яка в свою чергу, була використана для отримання водозборів та підземних водойм для австралійського континенту [54].

Перевагами використання методу ANUDEM:

- швидко обробляє різні типи даних у вигляді точок, ліній;
- можливість використання для визначення гідрографічних характеристик річок і їх басейнів;
- кількість вхідних даних може бути на порядок менше, ніж зазвичай потрібно для адекватного опису поверхні з оцифрованими ізолініями;
- отримані ЦМР мають відносно інших методів малі похибки.

Протягом останніх двох десятиліть процедура ANUDEM постійно вдосконалюється для обробки широкого спектру топографічних даних та підвищення якості її алгоритмів. Використовуючи даний алгоритм можна більш точно відображати важливі гідрологічні особливості і забезпечити високу ефективність розрахунків, проте вибір вхідного набору даних може вплинути на результати, отримані за допомогою цього методу.

3.2 Базовий алгоритм інтерполяції

Процедура інтерполяції була розроблена таким чином, щоб в максимальному ступені скористатися перевагами використовуваних вхідних даних, а також відомими характеристиками поверхонь висот.

Вода є первинною ерозійною силою, яка визначає форму багатьох ландшафтів. З цієї причини більшість ландшафтів мають багато вершин (локальних максимумів) і кілька локальних знижень (локальних мінімумів), що призводить до пов'язаної дренажної моделі. ANUDEM використовує ці знання про поверхні і накладає обмеження на процес інтерполяції, що призводить до пов'язаної структури річкового басейну.

Загальна дренажна умова практично виключає необхідність редагування або повторної обробки для видалення помилкових локальних знижень в створеній поверхні. При видаленні помилкових знижень програма діє консервативно, вона не буде накладати умови дренажу на ті місця розташування, де існують суперечності з вхідними даними по висот. Такі місця розташування зазвичай виникають в файлі діагностики як локальні зниження.

Метод дозволяє створювати ЦМР шляхом пов'язаної мережі водотоків на основі горизонталей рельєфу. В ході інтерполяції на кожній ітерації алгоритму відшукуються знижені ділянки рельєфу на вододілах, сідловинах, лощинах і прив'язуються до ліній поверхневого стоку. Метод заснований на обчисленні значень інтерпольованої функції через вираз [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):

$$\sum_{i=1,n} [(z_i - (x_i, y_i))/w_i]^2 + \lambda J(f), \quad (3.3)$$

де $J(f)$ – міра шорсткості функції f з точки зору першої та другої похідних, λ – додатне число, яке називається 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

Цифрова модель рельєфу, створена за допомогою інструменту “Топо в растр”, може бути використана при розрахунку основних характеристик поверхневого стоку території (напрямок стоку, сумарний стік, довжина лінії стоку), автоматичної ідентифікації постійних і тимчасових водотоків і визначенні їх порядку.

Вхідними даними для побудови ЦМР методом ANUDEM є топографічні карти 1: 50 000 (а саме 3 аркуші карти, що покривають територію інтересу), які були відскановані та оцифровані для отримання висотних даних території (ізолінії були проведені через 10 м) (рис. 3.10.).

Ізолінії були спочатку найбільш поширеним методом зберігання та подання інформації про висоти. Але метод також є найбільш важким для правильного використання загальними методами інтерполяції. Недолік полягає в відсутності повної інформації про рельєф між ізолініями.

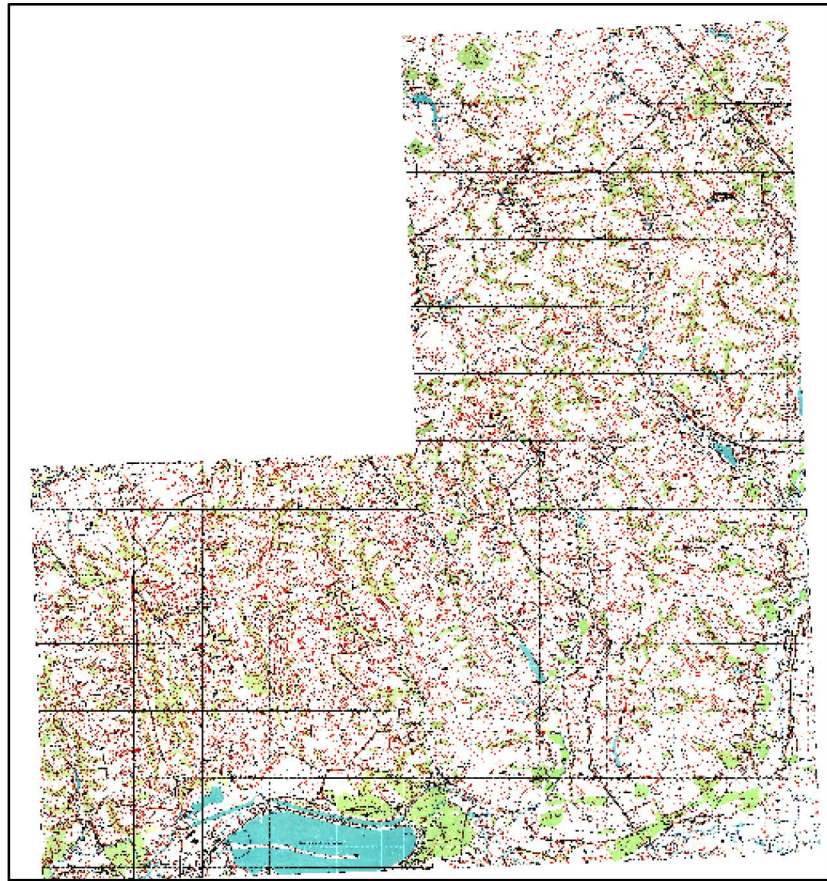


Рис. 3.10. Вхідна топографічна карта 1:50 000

При створенні грид-моделі рельєфу враховується не тільки просторове положення горизонталей, позначок висот і урізу води, але і розташування гідрографічної мережі, водойм (озер, водосховищ, ставків), локальних знижень рельєфу (рис. 3.11.).

На початку процесу інтерполяції інструмент “Топо в растр” використовує інформацію, яка задана ізолініями. Для цього визначаються точки локального максимуму кривизни кожної ізолінії. Далі за допомогою початкового растра висот розраховується мережа криволінійних водотоків і гірських хребтів, що проходять через ці точки [48]. Ця інформація використовується для забезпечення належних гідрогеометричних властивостей вихідної ЦМР.

Алгоритм кордонів озера включає автоматичне визначення висоти озера, що пов'язана з лініями водотоків та сусідніми значеннями висот.

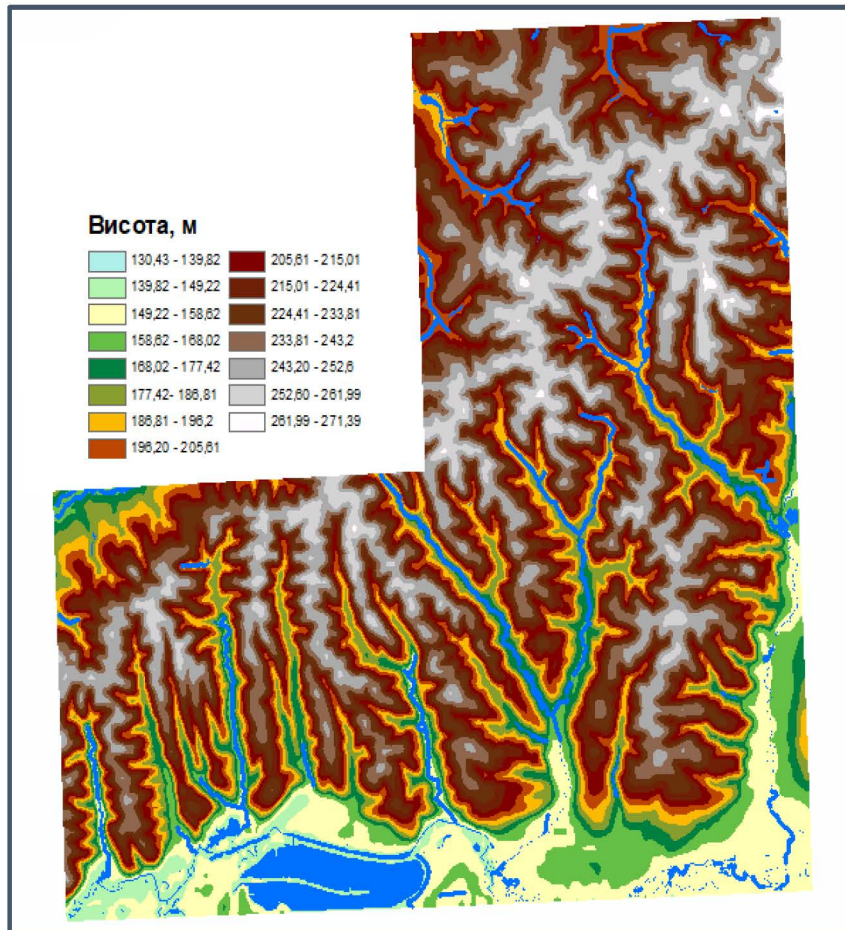


Рис. 3.11. ЦМР побудована методом “Топо в растр” із накладенням гідрологічної мережі та озер

Метод сприймає кожен кордон за ізолінію з невідомою висотою та ітеративно визначає її висоту виходячи з значень осередків уздовж неї. У той же час при розрахунку висоти кордону кожного озера беруться до уваги висоти інших озер. В результаті роботи алгоритму значення комірок, розташованих відразу за межами озера, перевищують висоту кордону озера, тоді як значення осередків в межах озера мають менші значення.

Для побудови ЦМР на задану територію за алгоритмом ANUDEM, який реалізовано в програмному забезпеченні ArcGIS, були використані вхідні дані, які було оцифровано на топографічній карті (рис. 3.12.):

- ізолінії (рис. 3.13.);
- дані гідрографічної мережі (рис. 3.14.);

- висотні позначки (рис. 3.15.);
- дані точок знижень (рис. 3.16.);
- дані кордонів озер (рис. 3.17.).

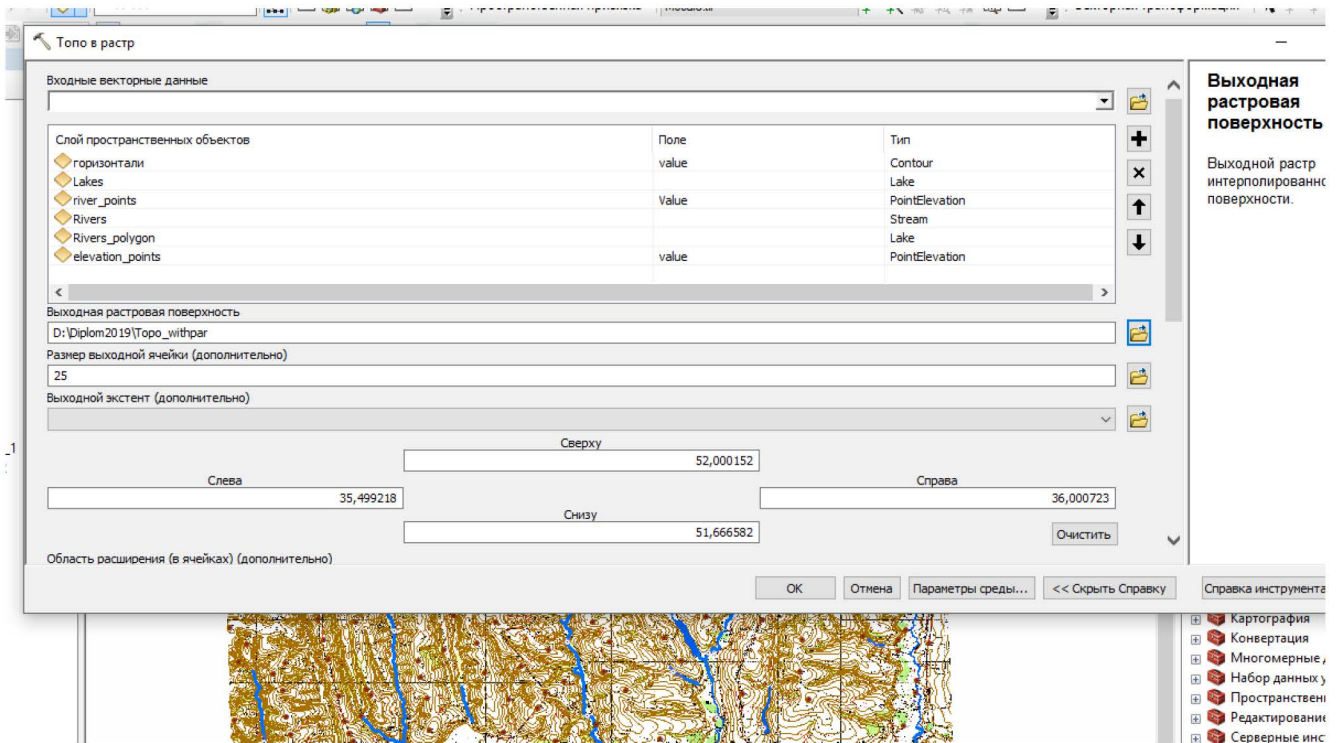


Рис. 3.12. Вхідні дані для побудови ЦМР у програмному забезпеченні ArcGIS

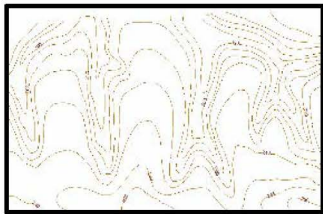


Рис. 3.13. Ізолінії

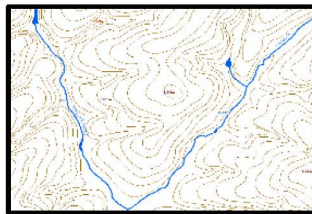


Рис. 3.14. Дані
гідрографічної мережі

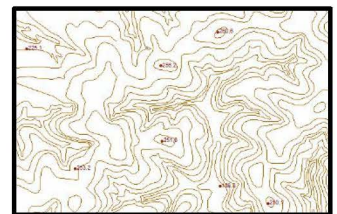


Рис. 3.15. Висотні
позначки

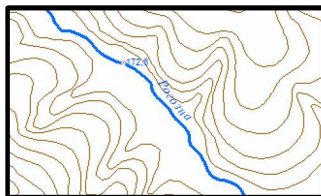


Рис. 3.16. Дані точок знижень

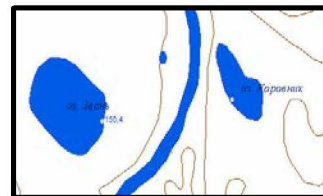


Рис. 3.17. Дані кордонів озер

Розмір пікселя ЦМР зазвичай задається рівним приблизно 0,5 мм в масштабі карти (в даному джерелі [6] вказується 0,2 мм). При цьому необхідно враховувати, що

метод інтерполяції “Топо в Растр” досить вимогливий до обсягу пам'яті, що не дозволяє побудувати високодетальну ЦМР для великої території. Розмір сітки DEM було встановлено 25 м. Оскільки, використовується карта 1:50 000, то:

1 см – 500 м

1 мм – 50 м

0,5 мм – 25 м.

Тобто, 25 м це максимальне значення розміру пікселя. Якщо будемо використовувати значення більше, то цифрова модель рельєфу втратить свою якість по відношенню до векторних даних. Проте варто враховувати те, що чим менше значення тим більший розмір буде мати вихідна ЦМР. Також, при виборі розміру пікселя варто враховувати можливості персонального комп'ютера.

Цифрова модель рельєфу побудована методом ANUDEM наведена в Додатку А рис. А.12.

Для порівняння отриманих результатів, для побудови цифрової моделі рельєфу було використано ще один метод – TIN, що реалізований у програмному забезпеченні ArcGIS.

Вихідними даними для побудови TIN є набір точок з координатами X, Y, Z. Задача полягає в тому, щоб по набору точок створити мережу суміжних трикутників, що не перетинаються між собою.

Модель TIN застосовується як спосіб зберігання вхідних даних про поверхні і модель для вирішення завдань на поверхнях в ГІС, що допускають роботу з 3D-моделями. Так як триангуляційна мережа дозволяє більш точно, ніж растр, моделювати неоднорідні поверхні, які можуть різко змінювати форму на одних ділянках і в незначній мірі – на інших. Це пов'язано з тим, що можна помістити більше точок там, де значення змінюються різко, і менше точок там, де поверхня змінюється плавно.

Цифрова модель рельєфу побудована методом TIN наведена в Додатку А рис. А.13.

Цифрові моделі рельєфу, які побудовані різними методами можна відобразити в програмному забезпеченні ArcScene від Esri (додаток для роботи з даними в

тривимірному вигляді, що є частиною додаткового модуля 3D Analyst). ArcScene дозволяє переглядати ГІС дані в тривимірному вигляді. На рис. 3.18 показано ЦМР, яка побудована методом ANUDEM, в тривимірному вигляді.

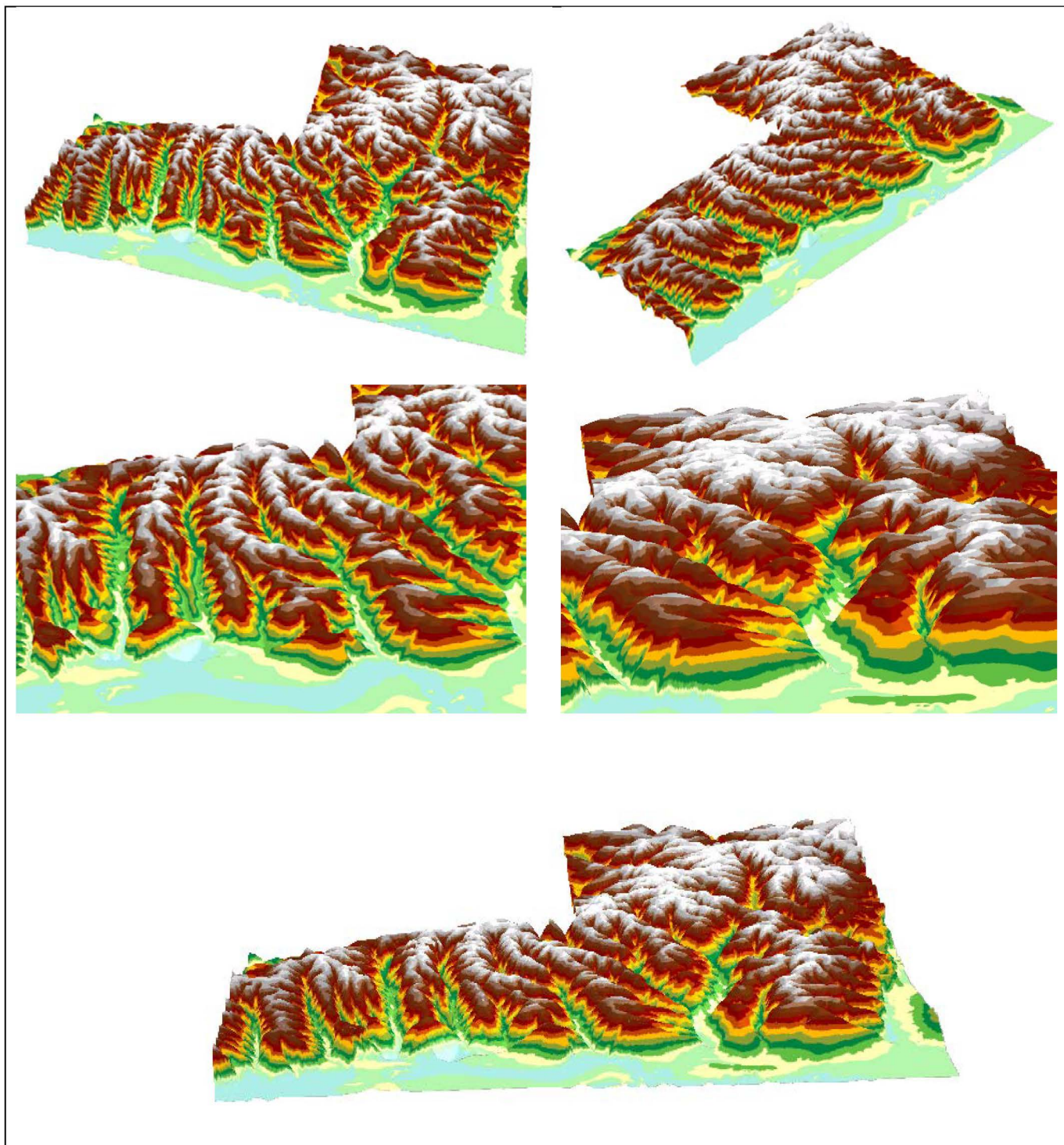


Рис. 3.18. ЦМР відображена в ArcScene

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

Точність є однією з найважливіших характеристик якості моделі, яка може бути оцінена її відповідністю оригіналу. Це відповідність або точність ЦМР визначається за вибірковими оцінками середньоквадратичних похибок значень висот. Точність ЦМР зумовлюють такі чинники – характер джерела і точність вихідних даних, технологія перетворення даних, точність відновлення функції висоти при перетворенні множини вихідних даних, отриманих оцифровуванням горизонталей в їх регулярний набір, тип і параметри моделі даних, використовуваної при створенні.

Вибір методу залежить від вимог користувача і ресурсів системи. Крім того, навіть найточніша процедура інтерполяції дає досить умовну картину реального розподілу характеристики, що картографується у просторі.

З характеристики методів побудови цифрових моделей рельєфу випливає, що кожний з них має свої переваги і недоліки, які мають бути враховані при виборі того чи іншого методу при розв'язанні конкретних завдань. Але вибір методу залежить також від кількості вихідних точок даних і рівномірності їх розподілу в області інтерполяції.

В даній роботі представлено 13 методів побудови цифрових моделей рельєфу за картографічними даними в програмних забезпеченнях Surfer та ArcGIS:

- метод зворотно – зважених відстаней;
- крігінгу;
- мінімальної кривизни;
- поліноміальної регресії;
- радіальних базисних функцій;
- модифікований метод Шепарда;
- триангуляції з лінійною інтерполяцією;
- природної околиці;
- найближчого сусіда;

- змінного середнього;
- локальних поліномів;
- TIN;
- “Топо в растр” (ANUDEM).

Для того, щоб проаналізувати кожний з методів інтерполяції будемо використовувати контрольні точки з розрахованими для них висотами на топографічній карті, а також порівняння графіків профілів рельєфу на однакову територію.

На топографічній карті було обрано 20 контрольних точок з врахуванням особливостей рельєфу та гідрографічної мережі (рис. 3.19.).

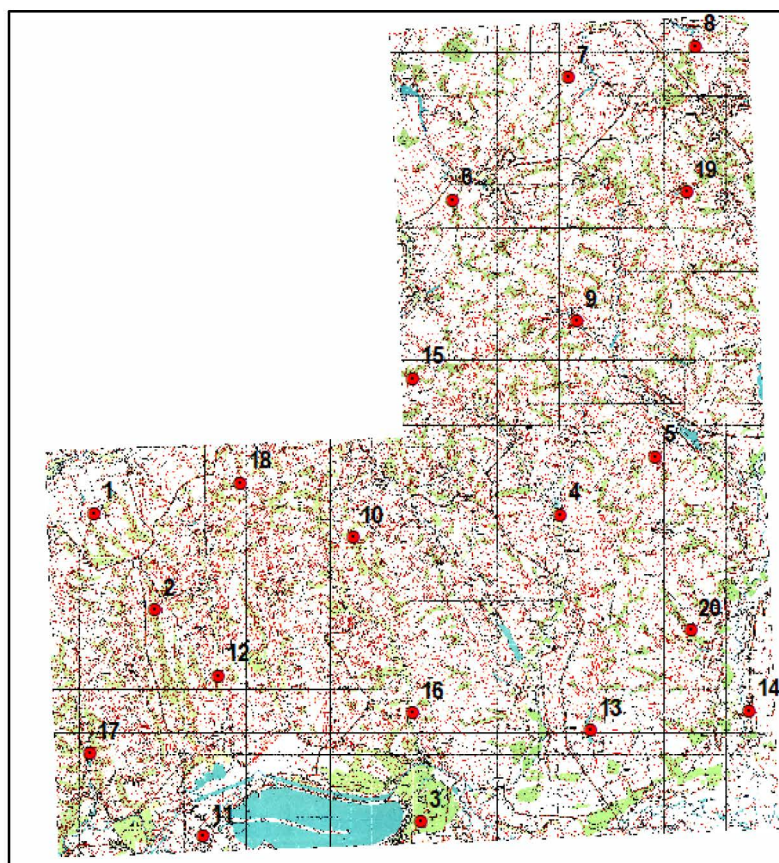


Рис. 3.19. Контрольні точки та їх нумерація

Для кожної точки пораховано її висоту на топографічній карті, алгоритм показано на рис. 3.20.

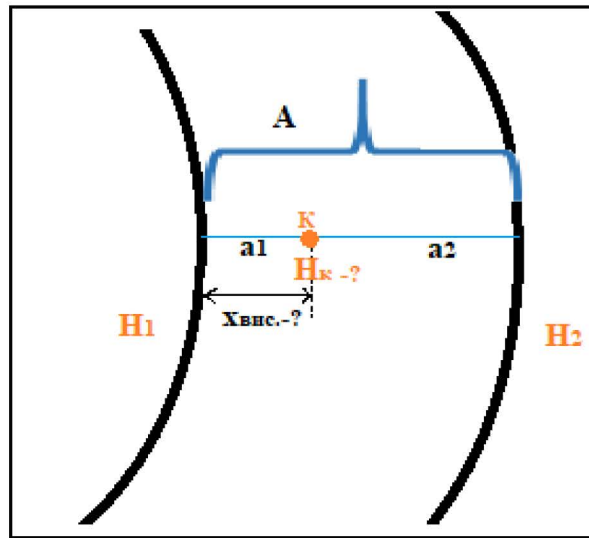


Рис. 3.20. Алгоритм визначення висотних відміток контрольних точок

На рис. 3.20. показано схему за якою визначається висота контрольної точки К. Для цього потрібно з точки К провести лінію, яка буде перпендикулярною до обох горизонталей H_1 та H_2 . Однією з умов є $H_1 > H_2$. Отже, отримаємо співвідношення (формула 3.4):

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

де A – відстань між двома горизонталями;

a_1 – відстань від H_1 та контрольною точкою;

$X_{\text{вис.}}$ – різниця у висоті між H_1 та к.

Спочатку потрібно визначити на скільки відрізняться висота точки від H_1 – висоти горизонталі (формула 3.5).

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

Наступним кроком є визначення висоти контрольної точки H_K (за умови $H_1 > H_2$) за формулою 3.6:

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

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):

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

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 Б.

Точність отриманих ЦМР наведена на рис. 3.21. у вигляді гістограми.

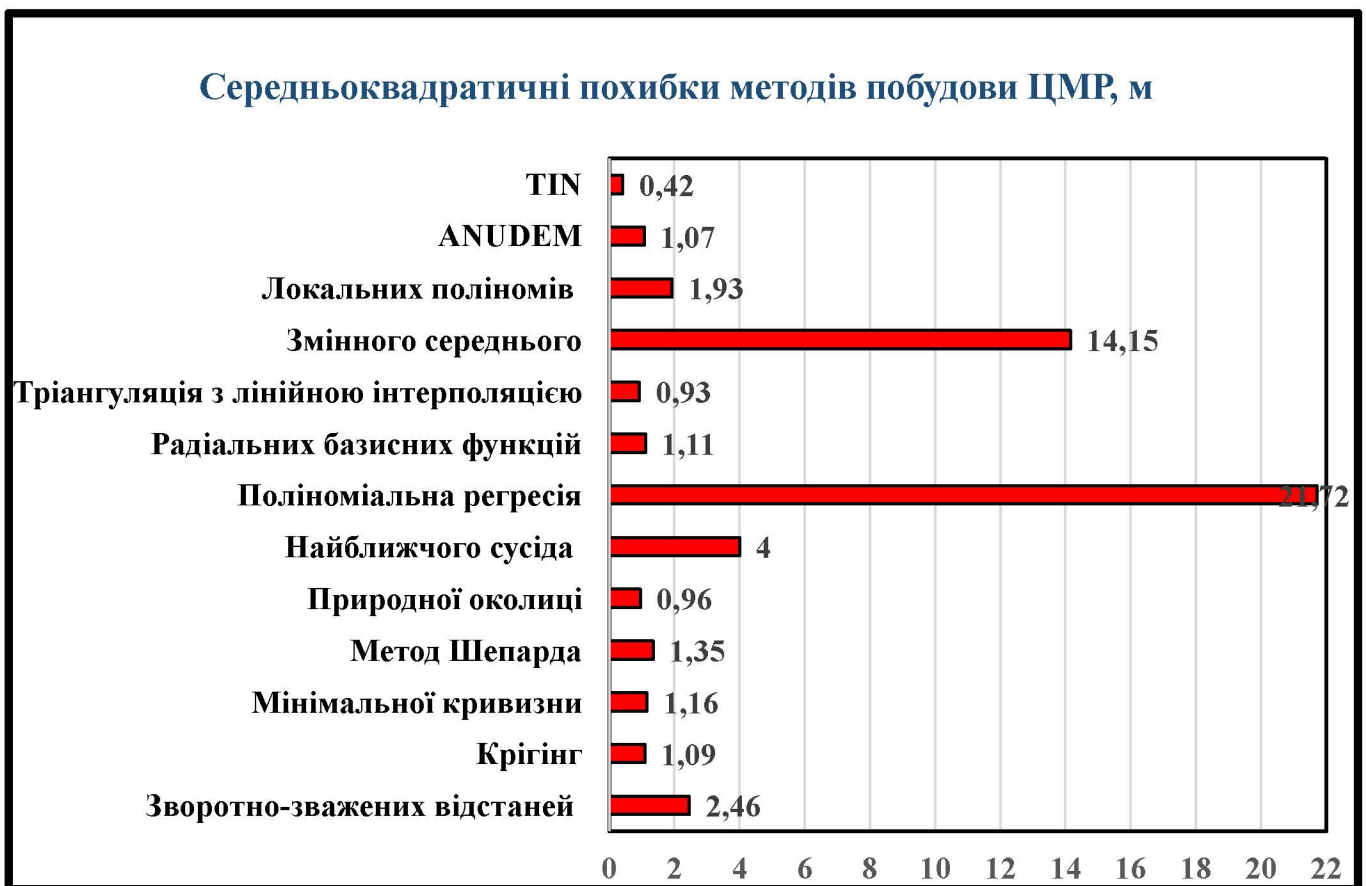


Рис. 3.21. Середньоквадратичні похибки методів побудови ЦМР

Для того щоб оцінити середньоквадратичну похибку було використано побудову довірчих інтервалів. Довірчим називається такий випадковий інтервал для параметра a , щодо якого можна з близькою до одиниці імовірністю β можна стверджувати, що він містить невідоме значення параметра a .

Ймовірність, пов'язану з довірчим інтервалом, називають довірчою ймовірністю. Якщо довірчий інтервал будується за рівнем 95%, то відповідна довірна ймовірність буде 5% або 0,05, для інтервалу за рівнем 98% – 2% або 0,02 і т.д.

Довірчі кордони для істинного значення вимірюваної величини і її середньоквадратичної помилки встановлюють також в залежності від заданої довірчої ймовірності і закону розподілу помилок.

Довірчий інтервал для середньоквадратичної похибки в разі нормальної вибірки будується в вигляді (формула 3.8):

$$\gamma_1 m \leq \sigma \leq \gamma_2 m \quad (3.8)$$

Значення γ_1 та γ_2 можна отримати із готових таблиць або виконати розрахунки за формулами (3.9).

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_1^2}}; \quad \gamma_2 = \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_2^2}} \quad (3.9)$$

якщо оцінка m (середньоквадратична помилка) отримана за формулою Бесселя або Гаусса (в даній роботі обчислення виконані за формулою Гаусса), а величини χ_1^2 , і χ_2^2 вибирають з таблиці так званого розподілу χ^2 з числом ступенів свободи $n - 1$ або n відповідно за ймовірністю $p_1 = (1 - \beta)/2$ і $p_2 = 1 - p_1$.

Побудувавши інтервал (3.8), легко отримати довірчий інтервал для СКП σ_x простої арифметичної середини, розділивши всі члени нерівності (3.8) на \sqrt{n} . З огляду на те, що $\frac{m}{\sqrt{n}} = m_{\bar{x}}$ отримаємо (формула 3.10):

$$\gamma_1 m_{\bar{x}} \leq \sigma \leq \gamma_2 m_{\bar{x}} \quad (3.10)$$

Розрахунок довірчих інтервалів для σ та СКП σ_x кожного методу побудови цифрової моделі рельєфу при довірчій ймовірності $\beta = 95\%$, $n = 20$.

Результати розрахунків наведено в Додатку В.

Враховуючи результати розрахунків, то методи “TIN”, “Триангуляція з лінійною інтерполяцією”, “Природної околиці”, “ANUDEM” дають найменші середньоквадратичні похибки 0,42 м, 0,93 м, 0,96 м та 1,07 м відповідно.

Але якщо порівнювати ЦМР, то ANUDEM краще відображає гідрографічну мережу та озера (це видно на картах, оскільки можна побачити кордони озера тільки

на ЦМР, що побудована методом “Топо в растр”). Тому використовувати карти, які побудовані даним методом можна для визначення особливостей річкової мережі та стоку.

Одним із методів для аналізу методів побудови цифрових моделей рельєфу було обрано побудову профілів рельєфу по кожній ЦМР. На рис. 3.22. показано лінію вздовж якої будувався профіль рельєфу. Використання даного методу дає візуальну оцінку плавності зміни рельєфу, порівняння мінімальних та максимальних відміток на заданій лінії.

Для побудови профілів рельєфу (рис. 3.23.) було використано програмне забезпечення ArcGIS, а саме модуль 3D Analyst (дозволяє виконувати тривимірний перегляд, побудову і аналіз поверхонь — містить набори 3D символів і більше 40 інструментів геообробки) [46].

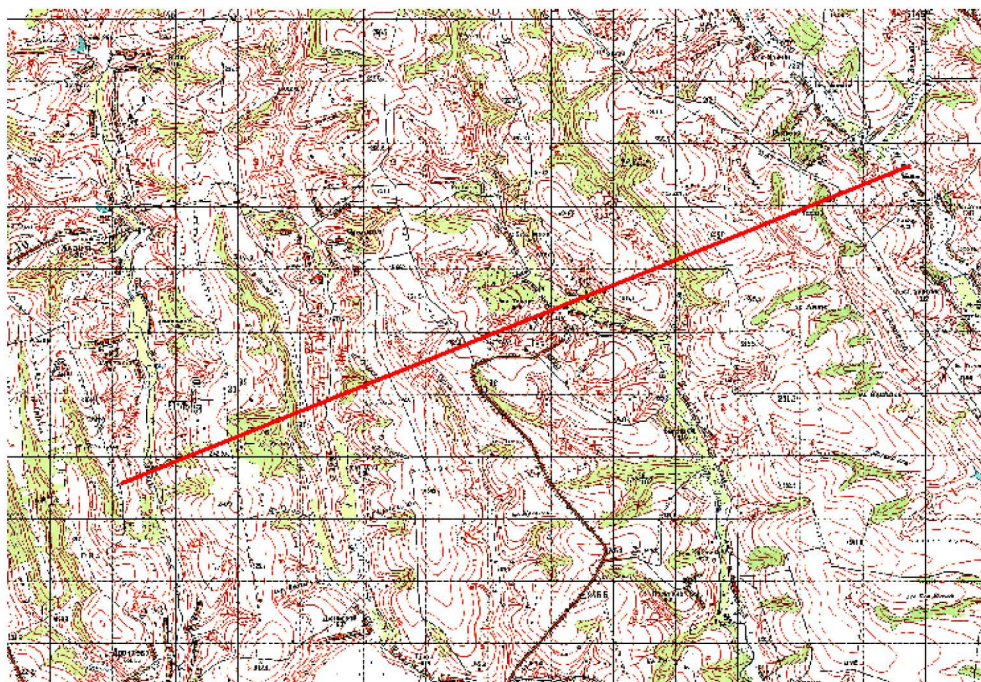


Рис. 3.22. Лінія вздовж якої будувався графік профіля рельєфу

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.

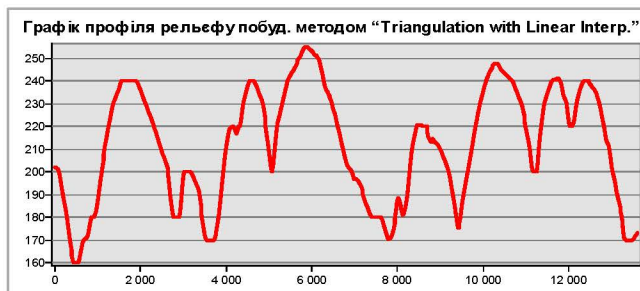
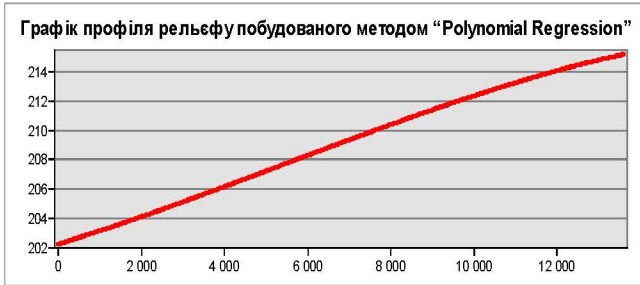
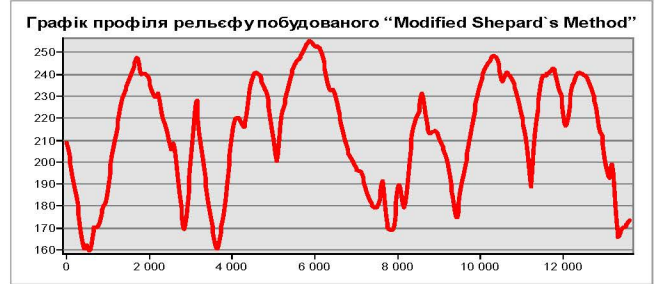


Рис. 3.23. Графіки профіля рельєфу, побудованого різними методами

Кожен метод інтерполяції має свої особливості та недоліки. Порівняння методів побудови та рекомендації для їх використання показано в табл. 3.4.1.

Таблиця 3.4.1

Порівняльна таблиця методів побудови ЦМР

Метод	Швидкість	Особливості
<i>Метод зворотно-зважених відстаней</i>	Швидкий	<p>Є досить швидким, але має тенденцію генерувати структури навколо точок спостережень з високими значеннями.</p> <p>Метод ніколи не дасть значень, які будуть вище максимальних або нижче мінімальних значень опорних точок, і тому може погано апроксимувати западини і піки.</p> <p>Функція IDW повинна використовуватися, коли набір точок досить щільний.</p>
<i>Метод Крігінгу</i>	Повільний / Середній	<p>Найбільш гнучкий, заснований на моделюванні варіограми, і часто використовується, задається за замовчуванням. При великих наборах точок він працює досить повільно.</p> <p>Може забезпечити екстраполяцію та оцінку помилок прогнозування.</p> <p>Може бути або точним, або згладжуючим інтерполятором, в залежності від параметрів, заданих користувачем.</p>
<i>Метод мінімальної кривизни</i>	Середній	<p>Створює дуже гладкі поверхні, які відповідають набору даних і для більшості множин експериментальних даних працює досить швидко. Можуть з'являтися хибні ізолінії.</p> <p>Метод не є точним інтерполятором.</p>
<i>Метод поліноміальної регресії</i>	Швидкий	<p>Використовується для виділення великих трендів і структур. Працює дуже швидко для множин будь-якого розміру, але не є точним інтерполяційним методом, оскільки згенерована поверхня не проходить через експериментальні точки.</p>
<i>Метод радіальних базисних функцій</i>	Повільний / Середній	<p>Гнучкий, схожий за результатами на Крігінг, але без додаткових припущень щодо статистичних властивостей точок вхідних даних.</p> <p>Деякі дослідники вважають метод радіальних базисних функцій є найкращим для точної побудови гладких поверхонь.</p>
<i>Модифікований метод Шепарда</i>	Швидкий	<p>Подібний до методу зворотних відстаней, але як правило, не генерує структури типу "волове око".</p> <p>Метод Шепарда може бути або точним, або згладжуючим інтерполятором.</p>
<i>Метод триангуляції з лінійною інтерполяцією</i>	Швидкий	<p>Процедура, заснована на триангуляції Делоне. Потрібна середня/велика кількість точок даних для отримання прийнятних результатів. Працює найкраще коли дані рівномірно розподілені по сітці області.</p> <p>Використання цього методу при невеликому числі точок виміру призводить до появи явних трикутних граней на поверхні і великих прямолінійних сегментів на карті ізоліній.</p>

Метод природної околиці	Швидкий	<p>Основна його властивість полягає у тому, що він локальний, і використовує лише підмножину зразків, які оточують точку запиту, та інтерпольовані висоти гарантовано знаходяться в межах діапазону використаних зразків.</p> <p>Цей метод найбільш придатний, коли точки вимірювань розподілені нерівномірно.</p> <p>Його перевага в тому, що не потрібно задавати такі параметри, як радіус, кількість точок або вагу.</p>
Метод найближчого сусіда	Швидкий	<p>Цей метод корисний, коли дані вже рівномірно розташовані, але потребують для перетворення файл сітки SURFER.</p> <p>Даний метод дуже простий, дає зміщену (незадовільну) оцінку і в результаті завжди виходять дискретні величини.</p>
Метод змінного середнього	Швидкий	<p>Використовує середні значення, засновані на заданому користувачем еліпсі пошуку. Потрібно середня/велика кількість точок даних для отримання прийнятних результатів.</p>
Метод локальних поліномів	Швидкий	<p>Метод присвоює значення сітці вузлів, використовуючи найменші зважені квадрати, з даними в межах еліпса пошуку вузла сітки.</p> <p>Найбільш застосовується до локально згладжених наборів даних.</p>
Метод “Топо в растр” (ANUDEM)	Повільний / Середній	<p>Він являє собою морфологічний підхід до інтерполяції цифрових моделей висот.</p> <p>Інтерполуює гідрологічно "правильну" сітку з набору точкових, лінійних і полігональних даних на основі процедур, розроблених Хатчинсоном. Вимагає введення векторних даних контурів.</p> <p>Доступно в ArcGIS на основі програми ANUDEM Хатчинсона.</p>

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”, “Триангуляція з лінійною інтерполяцією”, “Природної околиці”, “ANUDEM”) працюють краще, коли точки вимірювань розподілені нерівномірно.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні визначення

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці [56].

Основними принципами охорони праці, відповідно до законів та нормативно-правової бази по охороні праці є [56]:

- пріоритет життя і здоров'я працівників відповідно до результатів виробничої діяльності підприємства, повна відповідальність керівника за створення нешкідливих умов праці;
- соціальний захист працівників;
- повне відшкодування збитків, у тому числі і моральних, особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві й професійних захворювань;
- встановлення єдиних нормативів з охорони праці для усіх підприємств, незалежно від форм власності і видів їх діяльності;
- навчання населення, професійна підготовка і підвищення кваліфікації працівників з питань охорони праці;
- участь держави у фінансуванні заходів з охорони праці, використання світового досвіду організації роботи щодо поліпшення умов і безпеки праці.

Робота з ГІС передбачена в офісних приміщеннях з використанням ЕОМ. Характерними особливостями є: невелика площа приміщень, система кондиціонування повітря для відводу теплоти від ЕОМ, наявність електромережі живлення обчислювальної техніки та зовнішніх пристроїв. Враховуючи вище написане, можна виділити шкідливі (таблиця 4.1.1) та небезпечні фактори (табл. 4.1.2), які можуть виникнути в промисловому процесі.

Повітря в приміщеннях з обчислювальною технікою насичений позитивно зарядженими іонами кисню, що призводить до погіршення здоров'я, гіпоксії, підвищення ймовірності серцево-судинних захворювань.

Таблиця 4.1.1

Шкідливі фактори

№ з/п	Шкідливий фактор	Характеристика фактору	Джерело	Нормативні документи
1	Несприятливий мікроклімат приміщення	Невідповідність температури допустимому діапазону температур ($t=18-22\text{ }^{\circ}\text{C}$), недостатня вентиляція та освітлення, невідповідна вологість	Тепловиділяюча апаратура	ДСТУ 12.1.005 – 88
2	Випромінювання ЕОМ в оптичному діапазоні	Інтенсивність та частота випромінювання	ЕОМ	ДСТУ 12.1.003-74
3	Електромагнітне поле	Напруженість поля 100 Вт/м^2	ЕОМ	ДСТУ 12.1.002
4	Іонізуюче випромінювання	Рівень альфа-, бета частинок, гама випромінювання, рентгенівське випромінювання 5 бер/рік 1 група, категорія А	ЕОМ	НРБ – 76/87
5	Недостатня освітленість	Природне бокове освітлення (2%), комбіноване (1.5%), штучне освітлення $E_H=500$ (лк)	Освітлювальні пристрої	БНіП II.4 – 79

6	Промисловий шум	Невідповідність нормам частот, рівня звукового тиску, сили звуку (≤ 50 дБА).	Зовнішні пристрої	ДСТУ 27818
---	-----------------	--	-------------------	------------

Таблиця 4.1.2

Небезпечні фактори

№ з/п	Небезпечний фактор	Характеристика фактору	Нормативні документи
1	Ураження електричним струмом	Напруга (220 V), Сила струму (0.6 A), Частота(50(60) Гц)	ДСТУ 12.1.038 – 82
		Напруга (100-240 V), Потужність (85 W), Частота (50(60) Гц)	
		Напруга (220 V), Сила струму (0.3 A), Частота (50(60) Гц)	
2	Загорання обладнання	Підвищення температури	ДСТУ 12.1.033 – 81

Для підтримання допустимих значень мікроклімату необхідно передбачити прилади для зволоження і/або штучної іонізації, кондиціонування повітря.

Перед початком роботи необхідно:

- організувати робоче місце;
- очистити комп'ютер від пилу та інших забруднень;
- відрегулювати освітленість на робочому місці, упевнитись в відсутності відбиття на екрані;
- увімкнути комп'ютер.

Після закінчення роботи необхідно:

- вимкнути живлення ПК у порядку, який встановлений Інструкцією користувача ЕОМ, від'єднати шнури електроживлення та кабелів від електромережі;
- вимкнути вилку силового кабелю з розетки;
- прибрати робоче місце.

4.2 Організація робочого місця при роботі з ЕОМ

Організація робочого місця передбачає правильне планування, оснащення і розстановку обладнання. Інструменти і пристосування, які застосовуються в процесі робіт, повинні виключати травматизм і бути зручними.

Робоче місце користувачів комп'ютерів складається зі стола, крісла і підніжки, які створюють можливість збереження раціональної робочої пози протягом робочого дня (рис. 4.1.).

В даний час вже готуються робочі місця цільового призначення для користувачів (рис. 4.2.).

Конструкція робочого столу має відповідати сучасним вимогам ерго-номіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання (дисплея, клавіатури, принтера) і документів. Висота робочої поверхні робочого столу з дисплеєм має регулюватися у межах 680 — 800 мм, а ширина і глибина — забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (ре-комендовані розміри: 600 — 1000 мм, глибина — 800 — 1000 мм) [57].

Робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, для протягнутої ноги — не менше ніж 650 мм [57].

Робочий стілець має бути підйомно-поворотним, регульованим за висотою, кутом і нахилом сидіння та спинки і за відстанню від спинки до переднього краю стільця; поверхня сидіння має бути плоскою, передній край — заокругленим.

Регулювання кожного із параметрів має здійснюватися незалежно, легко і надійно фіксуватися [57][57].

Неувага до робочого крісла або економія на ньому приречуть користувачів комп'ютерів на деформацію хребта та негативну дію на нервові шляхи, на больові відчуття в поперековій ділянці, дискомфорт і нерідко на знижену працездатність. При цьому слід використовувати крісла, які обертаються і які можуть змінювати свою висоту.



Рис 4.1. Робочий стіл

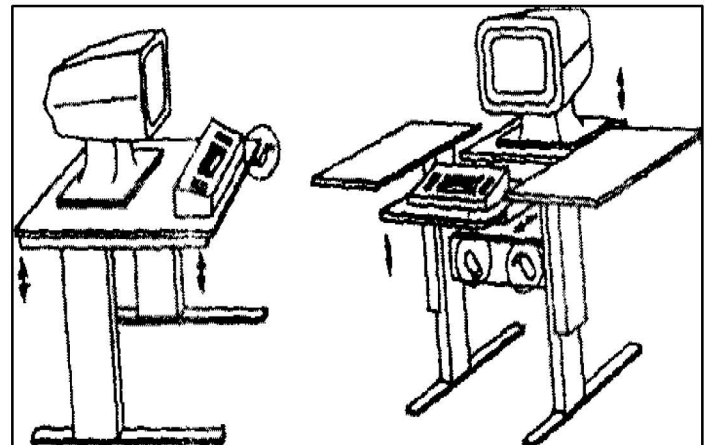


Рис. 4.2. Робочий стіл спеціального виготовлення

ВИСНОВКИ

Цифрова модель рельєфу – засіб цифрового уявлення поверхонь (рельєфів) у вигляді сукупності відміток висот або глибин та інших значень аплікату (координати Z) у вузлах регулярної мережі з утворенням матриці висот, нерегулярної трикутної мережі в моделі TIN або сукупності записів горизонталей (ізогіпс, ізобат) або інших ізоліній.

Такі моделі використовуються для цифрового подання географічної інформації, визначення просторового положення точок, обчислення і візуалізації зон видимості, розрахунків об'ємів певних об'єктів чи явищ щодо заданого висотного рівня, побудови профілів, виділення структурних ліній рельєфу, у тому числі ліній ерозійної мережі, вододілів, похідних моделей.

Науковцями проведено багато досліджень, які порівнюють ефективність альтернативних методів інтерполяції, використовуючи широкий спектр різних наборів даних та умов тестування. В цілому було встановлено, що низка чітко визначених факторів має великий вплив на якість інтерполяції:

- точність вимірювання даних;
- щільність даних;
- розподіл даних;
- просторова розрізненність;
- методи побудови;
- також варто врахувати людський чинник при оцифруванні горизонталей, що також може містити похибки.

Це досить передбачувані висновки, але попереднє вивчення кожного з цих елементів може допомогти у виборі найбільш підходящого методу для існуючої проблеми. Якість інтерполяції часто може бути істотно поліпшена за рахунок використання допоміжної інформації, наприклад даних дистанційного зондування або додаткової інформації про навколишнє середовище.

Актуальність теми дипломної роботи обумовлена необхідністю підвищення точності зображення рельєфу земної поверхні, оскільки існує широка потреба географічних досліджень даних про рельєф в цифровій формі.

В даний час існує декілька основних джерел даних для побудови цифрових моделей рельєфу – геодезичні вишукування, картометричні методи, дані лазерного сканування, інтерферометричні дані, дані знімання БПЛА, побудова моделі місцевості по стереопарам аеро- та космічних знімків. В дослідженні були використані дані з топографічних карт масштабу 1:50 000. Оскільки на карті відображені не тільки ізолінії, а й такі важливі об'єкти, як річки, озера, кордони берегової лінії, окремі висотні точки, обриви, кар'єри та інші.

У нашому дослідженні ми використовували ArcGIS (саме модулі Spatial Analyst, 3D Analyst) та Surfer для створення ЦМР. Вхідними даними для побудови цифрових моделей рельєфу були ізолінії, отримані з топографічної карти. Об'єкти даного шару мали лінійну форму і були перетворені в сукупність точок для подальшої побудови цифрових моделей рельєфу у програмі Surfer.

Результатом стало отримання ЦМР різними методами побудови засобами геоінформаційних систем:

- Метод зворотно – зважених відстаней;
- крігінгу;
- мінімальної кривизни;
- поліноміальної регресії;
- радіальних базисних функцій;
- модифікований метод Шепарда;
- тріангуляції з лінійною інтерполяцією;
- природної околиці;
- найближчого сусіда;
- змінного середнього;
- локальних поліномів;
- TIN;

– “Топо в растр” (ANUDEM).

Також, після побудови ЦМР була виконана оцінка їх точності по отриманих даних, що дало змогу зробити висновки щодо методів інтерполяції та їх використання.

Для кожного методу було проаналізовано його ефективність, швидкість, особливості застосування, алгоритм та переваги. Було побудовано графіки профіля рельєфу для ЦМР, що побудовані вище описаними методами.

Для побудови ЦМР методом ANUDEM, як вхідні шари об'єктів використовувались не тільки ізолінії, а й дані гідрографічної мережі, озера, висотні позначки та дані точок знижень. Тому використовувати карти, які побудовані даним методом можна для визначення особливостей річкової мережі та стоку.

Для візуалізації отриманих результатів дані було відображено в ArcScene, що дає можливість переглядати дані в тривимірному зображенні.

Цифрові моделі рельєфу побудовані методом ANUDEM використовуються в проектах з водних ресурсів для ідентифікації пов'язаних з дренажем об'єктів, таких як хребти, днища долин, мережі каналів і моделі поверхневого стоку. Точність цієї топографічної інформації залежить як від якості і розрізненості ЦМР, так і від алгоритмів обробки, використовуваних для отримання цієї інформації.

За результатами дипломної роботи:

1. Обґрунтовано, що використання цифрових моделей суттєво скорочує витрати часу та праці порівняно з традиційними технологіями одержання позначок з топографічних планів та карт, визначення напрямків. ЦМР застосовуються для картографування, будівництва, видобувної промисловості, моделювання військових дій та інженерних вишукувань, моделювання гідрографічної мережі і повеней, моделювання ерозійних процесів, аналізу біорізноманіття.

2. Проаналізовано різні математичні методи відтворення рельєфу. Побудовано цифрові моделі рельєфу у програмному забезпеченні Surfer та ArcGIS 13 різними методами інтерполяції.

3. Проведено оцінку точності цифрових моделей рельєфу, що побудовані різними методами. Встановлено, що найкращу точність відтворення рельєфу можна

отримати при використанні: “TIN” (0,42 м), “Триангуляція з лінійною інтерполяцією” (0,93 м), “Природної околиці” (0,96 м), “ANUDEM” (1,07 м).

4. Обґрунтовано переваги використання алгоритму ANUDEM для побудови гідрологічно коректних ЦМР, в порівнянні з іншими методами інтерполяції.

5. Розроблено рекомендації щодо використання того чи іншого методу побудови ЦМР у залежності від існуючих даних.

Отже, отримавши результати дослідження можна сказати, що для побудови цифрових моделей потрібно враховувати не тільки метод, яким будемо виконано моделювання, а й інформаційні джерела. Не менш важливо для побудови ЦМР проводити попередню оцінку щільності покриття поверхні об'єкта моделювання висотними відмітками, а також форму рельєфу (перепади висот).

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Хромых В.В. Цифровые модели рельефа: учебное пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых. – Томск: Изд-во “ТМЛ-Пресс”, 2007. – 178 с.
- [2] 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.
- [3] Wood J. The geomorphologic characterization of Digital Elevation Models, 2001.
- [4] Дементьев Ю. В. " Построение планетарной цифровой модели рельефа и ее приложения" / Ю. В. Дементьев, Е. Н. Кулик, Е. В. Дергачева. – Новосибирск: Интерэкспо Гео-Сибирь – 2010.
- [5] Англо-русско-украинский словарь по ГИС и ДЗЗ: учеб. пособие / Г.Г. Пивняк, Б.С. Бусыгин, Г.М. Коротенко, Л.М. Коротенко; М-во образования и науки Украины; Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 378 с.
- [6] Самардак А. С. Геоинформационные системы. – Владивосток: ТИДОИТ, 2005. – 123 с.
- [7] Світличний О. О. Основи ГІС/ О. О. Світличний, С. В. Плотницький. – Суми : Університетська книга, 2006. – 296 с.
- [8] Podobnikar Tomaz. Methods for visual quality assessment of a digital terrain model, S.A.P.I.E.N.S. 2.2 | 2009, URL: <http://sapiens.revues.org/738>.
- [9] Supporting GIS professionals with the most comprehensive 3D terrain data for more efficient analyses. URL: <https://www.intermap.com/en-us/databases/nextmap.aspx>.
- [10] 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.

- [11] Геоінформаційний аналіз просторових даних: монографія / В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, В. І. Зацерковний. – Ніжин : ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2011. – 440 с.
- [12] Цветков В. Я. Цифровые карты и цифровые модели / В. Я. Цветков; Изв. вузов "Геодезия и аэрофотосъемка". – 2000. – № 2. – С. 147–155.
- [13] Прикладная геоинформатика / А. Д. Иванников, В. П. Кулагин, А. Н. Тихонов, В. Я. Цветков. – М.: МаксПресс, 2005. – 360 с.
- [14] Сербенюк С. Н. Картография и геоинформатика – их взаимодействие / С. Н. Сербенюк. – М. : МГУ, 1990. – 153 с.
- [15] 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.
- [16] Mitasova H. Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS. International Journal of Geographical Information Systems 9(4)/ H. Mitasova, L. Mitas , W.M. Brown, D.P. Gerdes, L. Kosinovsky , T. Baker. – 1995. – P. 433–446.
- [17] Bolstad, P.V., T.M. Lillesand. Improved landcover classification in northern Wisconsin using Landsat thematic mapper, soils, and terrain data, Forest Science 38, 1992. –P. 5–20.
- [18] Guzzetti F. Landslide hazard and risk assessment. PhD dissertation. Bonn, Germany, - 2005.
- [19] 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.
- [20] Новаковский Б. А. Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа/ Б. А. Новаковский , Р. В. Пермяков; учебное пособие. – М.: Изд-во МИИГаик. 2019. – 175 с., ил.
- [21] Берлянт А. М. Картоведение / А.М. Берлянт. – М.: Аспект Пресс, 2003. – 477 с.

[22] Верещака Т.В. Топографические карты: научные основы содержания. – М.: МаИк «Наука/Интерпериодика», 2002. – 319 с.

[23] Василькова И. Ф. Анализ работ по картосоставлению и обновлению топографических карт и их соответствие нормативным документам // Геодезия и картография. 2006. - №5. – С.8 – 12.

[24] Геоінформаційні системи і бази даних: монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. – 492 с.

[25] Серапинас Б.Б. Основы спутникового позиционирования. М.: Географический факультет МГУ, 2012. –75 с.

[26] Тахеометр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Тахеометр> – Назва з екрана.

[27] Fototeodolite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://it.wikipedia.org/wiki/Fototeodolite> – Назва з екрана.

[28] Leica GPS GS10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geocad.com.mx/producto/leica-gps-gs10/> – Назва з екрана.

[29] Космічні та геоінформаційні системи : навч. посіб. / О. О. Железняк, В. І. Зацерковний, В. С. Кислюк, О. Є. Ніколаєнко. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. – 374 с.

[30] 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.

[31] 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.

[32] Что такое SRTM? Данные SRTM, и где скачать SRTM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh> – Назва з екрана.

[33] SRTM (ЦМР) Украины SRTM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mapgroup.com.ua/services/32-dem-ukraine/83-srtmv4> – Назва з екрана.

[34] 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.

[35] ALOS Global Digital Surface Model [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm> – Назва з екрана.

[36] 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.

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

[38] 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

[39] Ackermann F. Airborne Laser Scanning-present Statuses and Future Expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3), 1999. – P. 64–67.

[40] A White Paper in LiDAR Mapping, Mosaic Mapping Systems Inc. 2001.

[41] Новаковский Б.А. Фотограмметрия и дистанционные методы изучения земли/ Б.А. Новаковский/ – М.: Издательство МГУ, 1997. –208 с.

[42] 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.

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

[44] Архипкин В.С., Баулин А.В. Об интерполяции океанологических полей// Вестн. МГУ, сер. География. –1994. - №3. – С. 64-70.

[45] 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.

[46] ArcGIS Desktop Help [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/> – Назва з екрана.

[47] Інструкція по фотограмметричним роботам при створенні цифрових карт і планів. М.: ЦНІІГаик, 2002. – 49 с.

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

[49] 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.

[50] 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.

[51] Яковченко С.Г. Створення геоінформаційних систем в інженерній гідрології: дис. д-ра техн. наук / С.Г. Яковченко. – Барнаул, 2007. – 406 с.

[52] 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.

[53] 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.

[54] 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.

[55] 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.

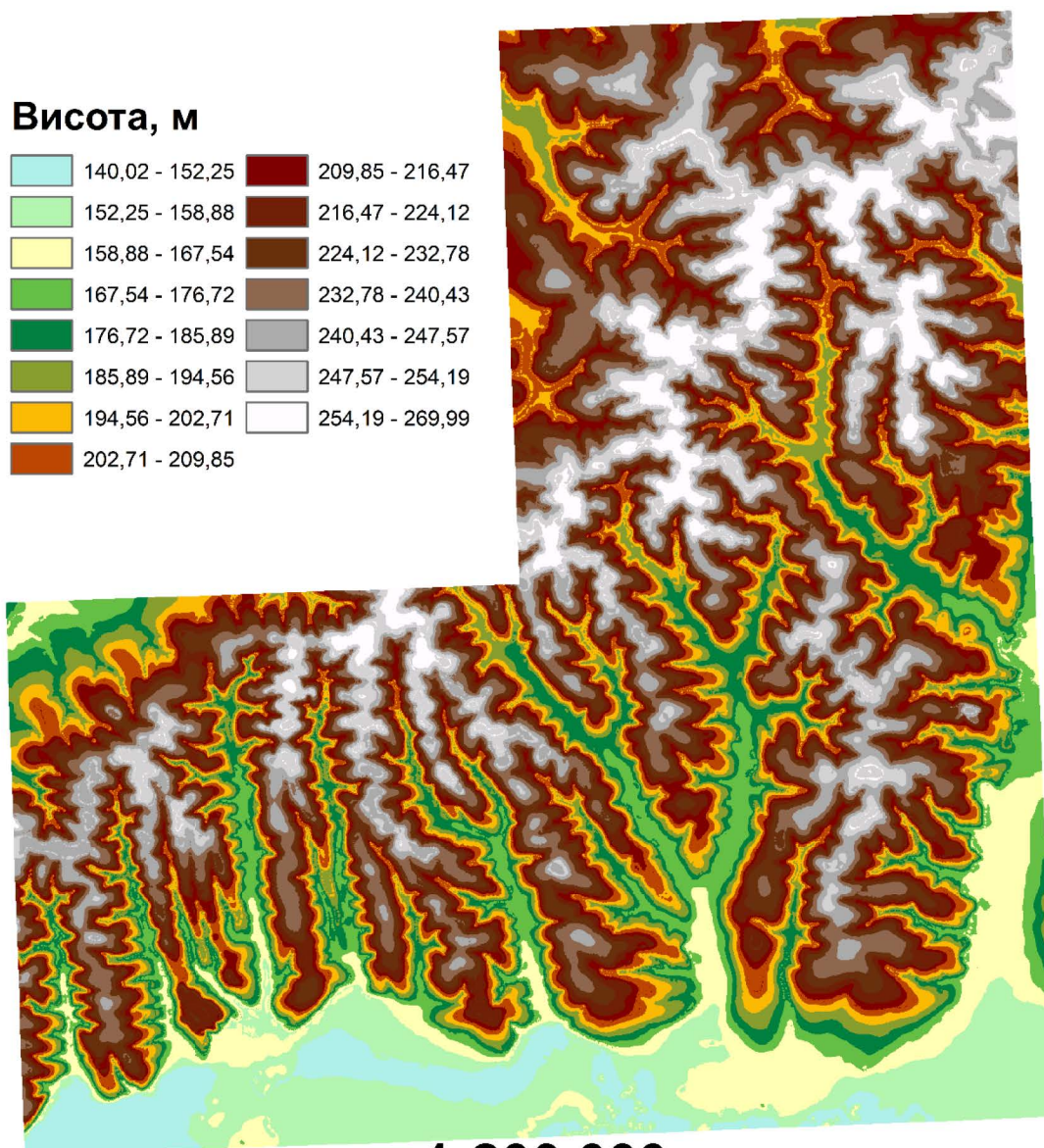
[56] Закон України «Про охорону праці» // Відомості Верховної Ради України. –1999. – № 783-XIV.

[57] Охорона праці в галузі : методичні вказівки / М. М. Сакун, І. І. Дядько . – Одеса: ОДАУ, 2015.

ЦМР побудована методом “Inverse Distance to a Power” в програмі Surfer

Висота, м

140,02 - 152,25	209,85 - 216,47
152,25 - 158,88	216,47 - 224,12
158,88 - 167,54	224,12 - 232,78
167,54 - 176,72	232,78 - 240,43
176,72 - 185,89	240,43 - 247,57
185,89 - 194,56	247,57 - 254,19
194,56 - 202,71	254,19 - 269,99
202,71 - 209,85	



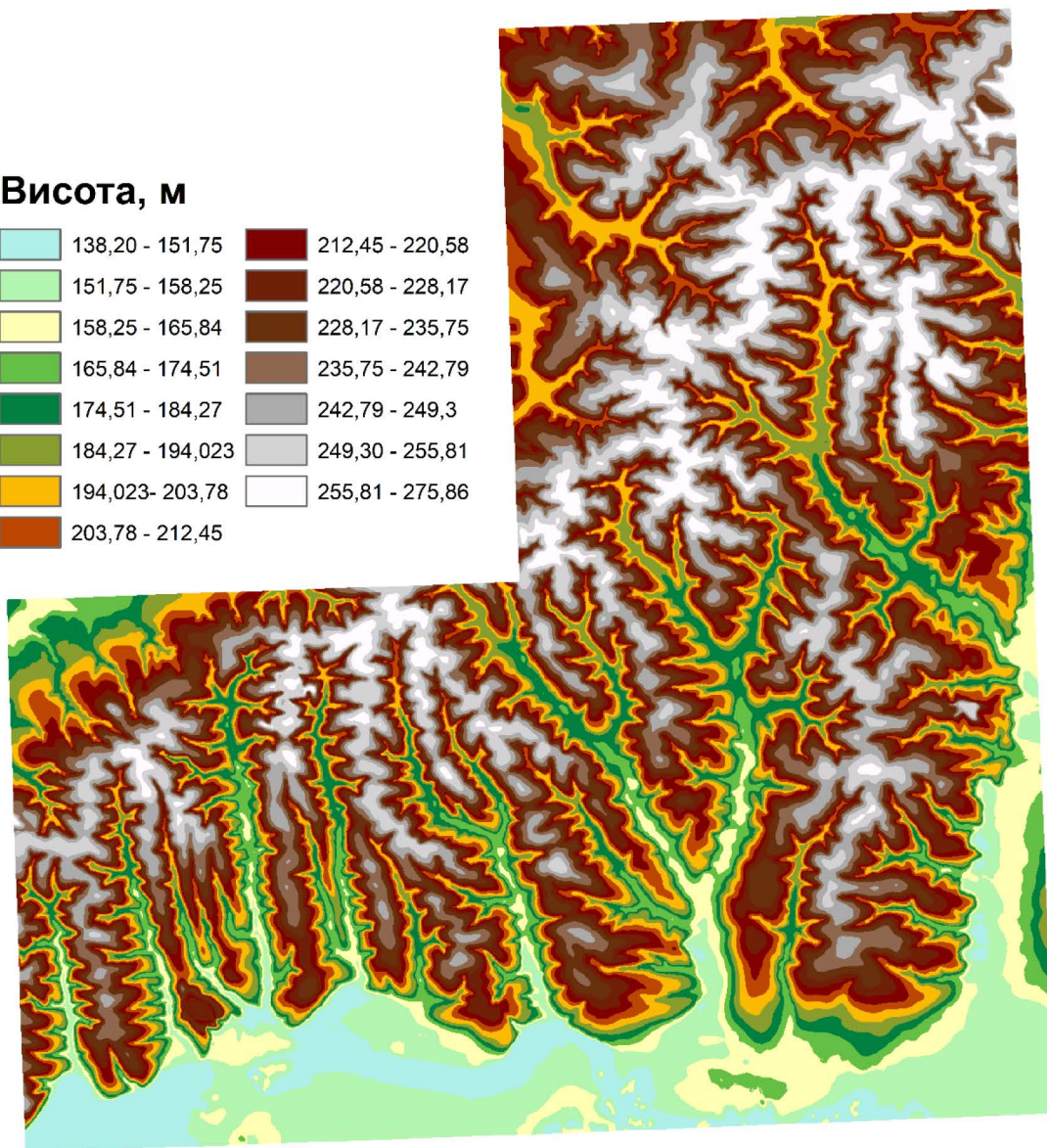
1:200 000
1 см = 2 км

Рис. А.1. Метод “Зворотно-зважених відстаней”

ЦМР побудована методом “Kriging” в програмі Surfer

Висота, м

138,20 - 151,75	212,45 - 220,58
151,75 - 158,25	220,58 - 228,17
158,25 - 165,84	228,17 - 235,75
165,84 - 174,51	235,75 - 242,79
174,51 - 184,27	242,79 - 249,3
184,27 - 194,023	249,30 - 255,81
194,023 - 203,78	255,81 - 275,86
203,78 - 212,45	



1:200 000

1 см = 2 км

Рис. А.2. Метод “Крігінг”

ЦМР побудована методом “Minimum Curvature” в програмі Surfer

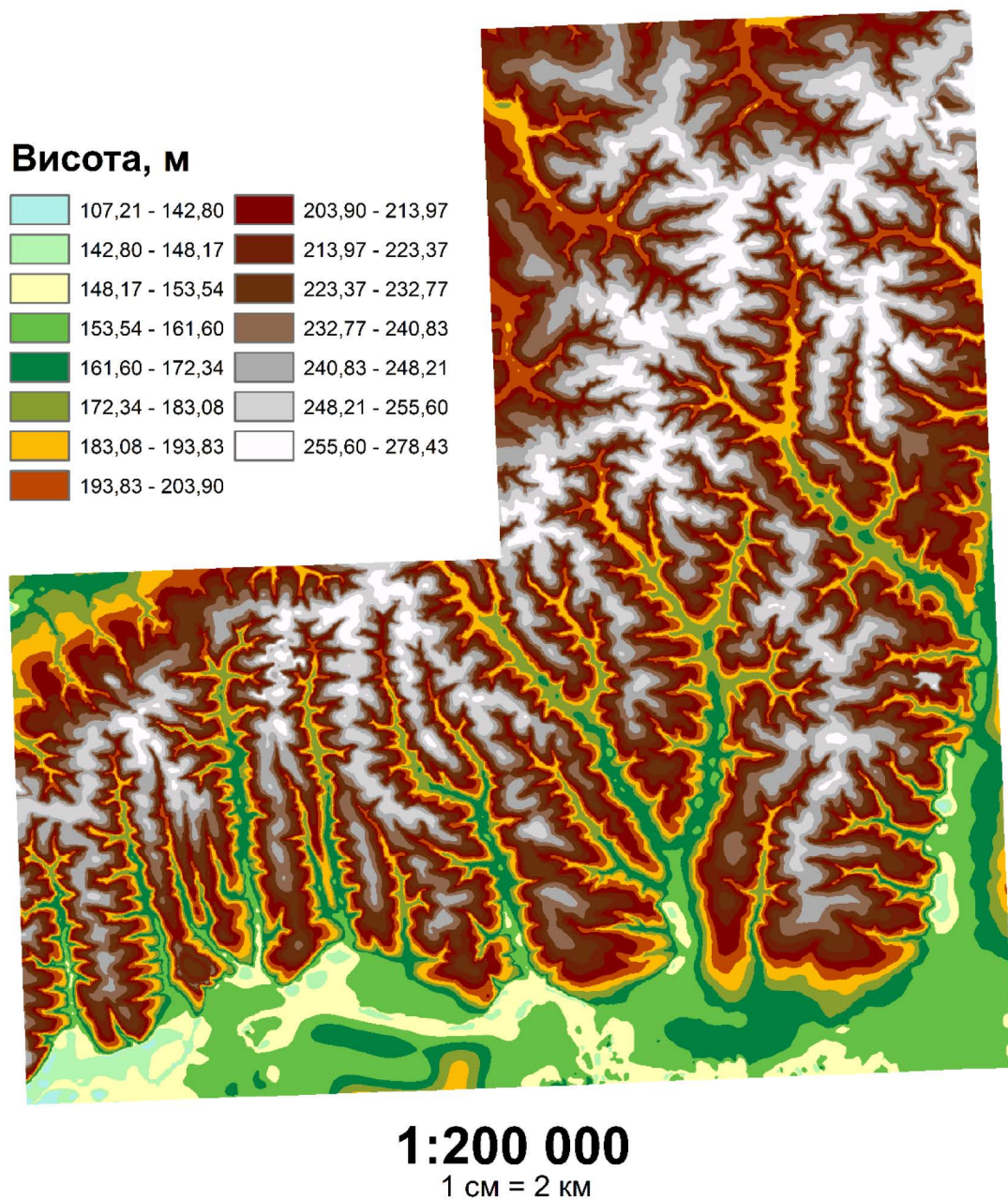


Рис. А.3. Метод “Мінімальної кривизни”

ЦМР побудована “Modified Shepard’s Method” в програмі Surfer

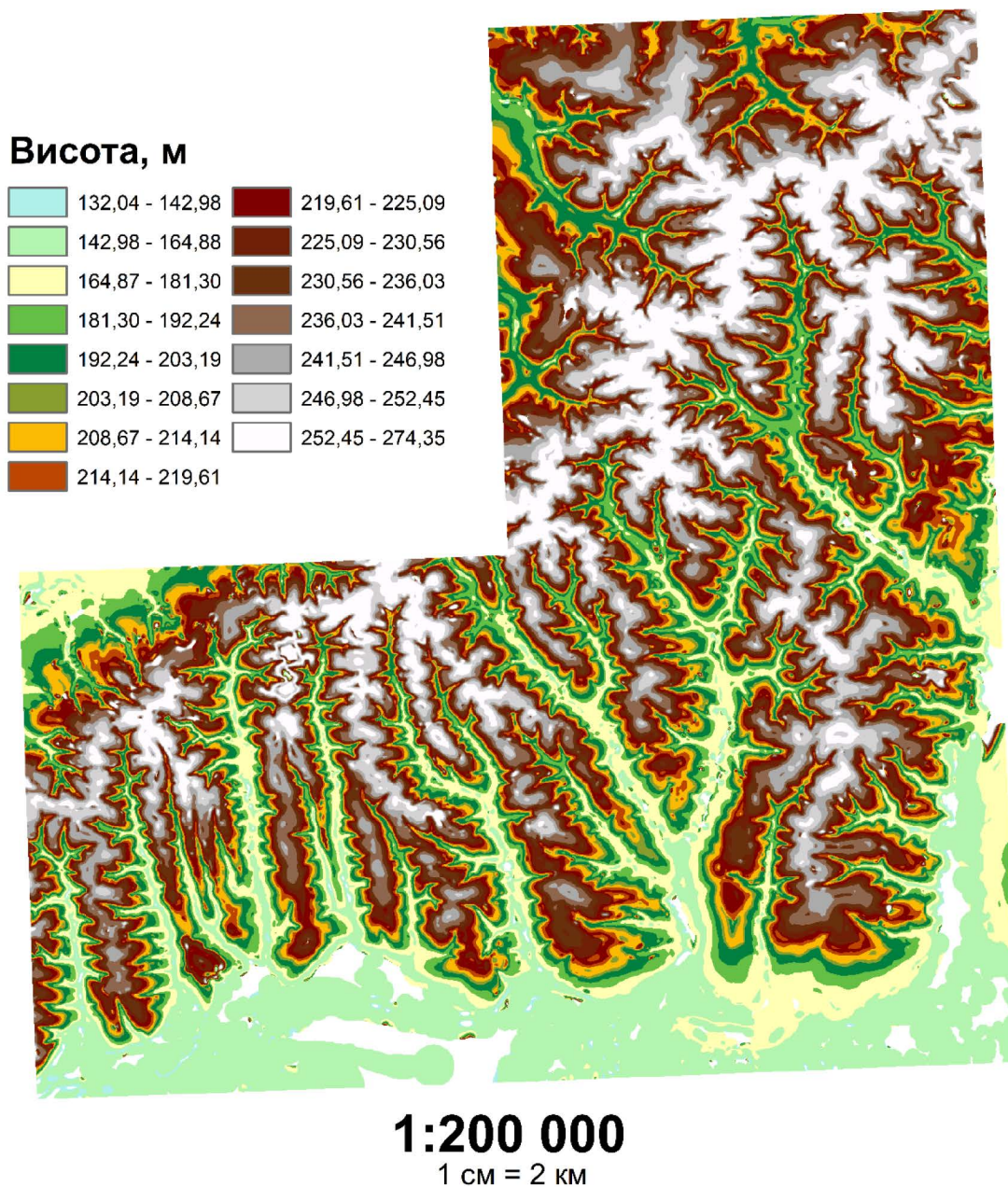
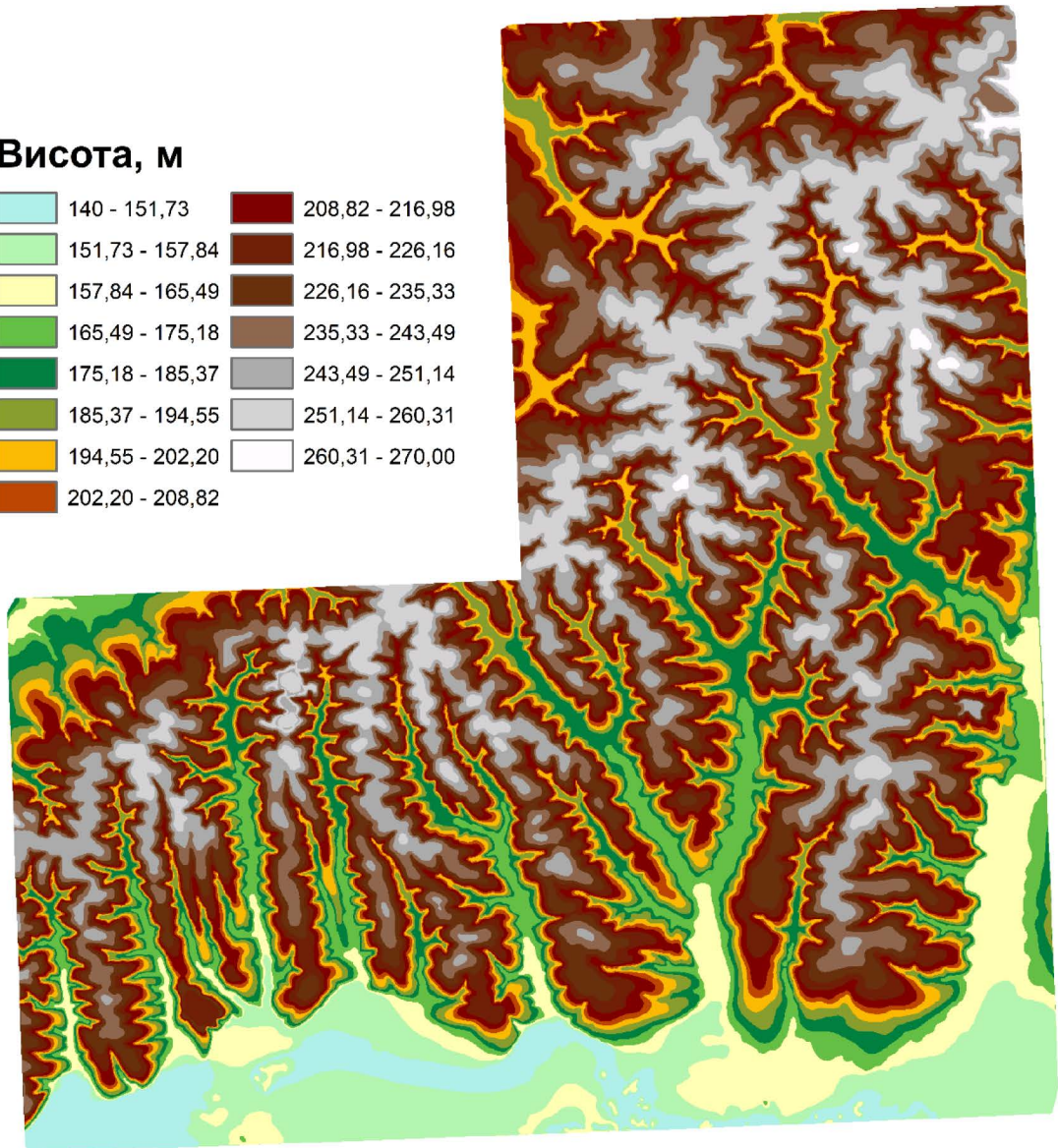


Рис. А.4. Метод Шепарда

ЦМР побудована методом “Natural Neighbor” в програмі Surfer

Висота, м

140 - 151,73	208,82 - 216,98
151,73 - 157,84	216,98 - 226,16
157,84 - 165,49	226,16 - 235,33
165,49 - 175,18	235,33 - 243,49
175,18 - 185,37	243,49 - 251,14
185,37 - 194,55	251,14 - 260,31
194,55 - 202,20	260,31 - 270,00
202,20 - 208,82	

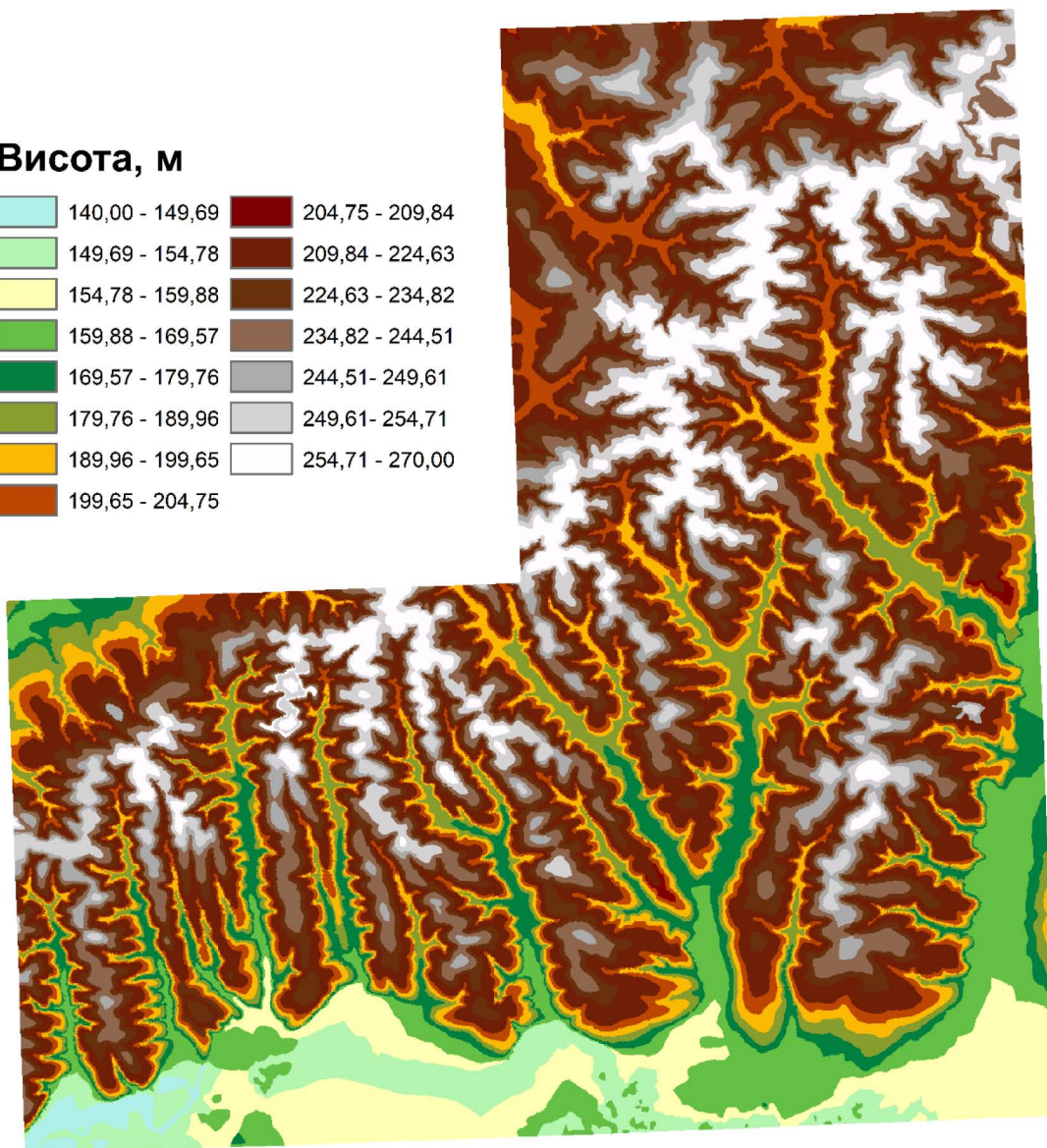
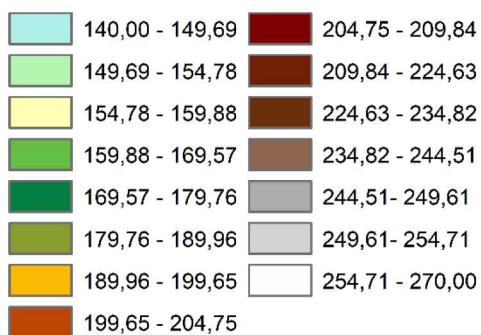


1:200 000
1 см = 2 км

Рис. А.5. Метод природної околиці

ЦМР побудована методом “Nearest Neighbor” в програмі Surfer

Висота, м



1:200 000

1 см = 2 км

Рис. А.6. Метод “Найближчого сусіда”

ЦМР побудована методом “Polynomial Regression” в програмі Surfer

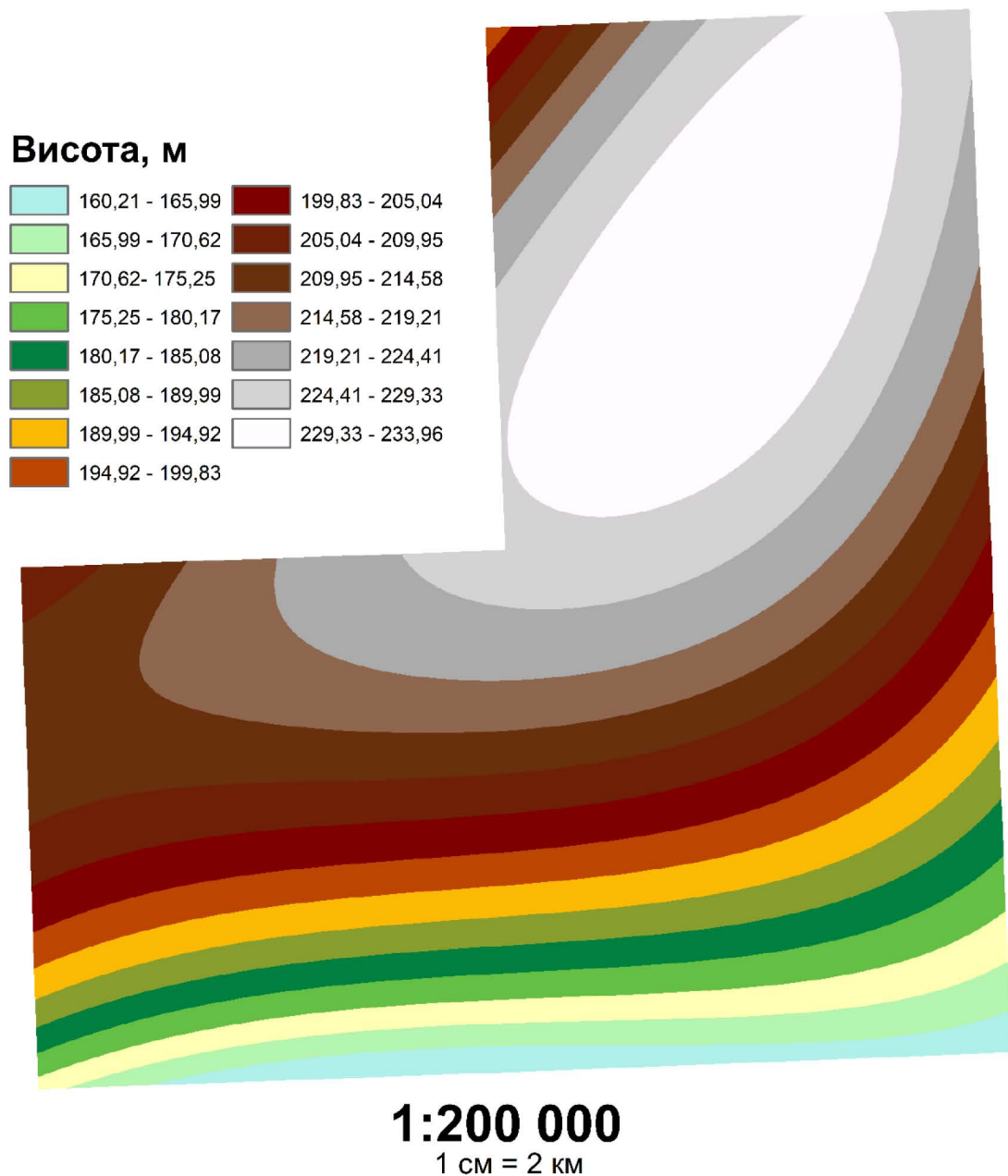


Рис. А.7. Поліноміальна регресія

ЦМР побудована методом “Radial Basic Function” в програмі Surfer

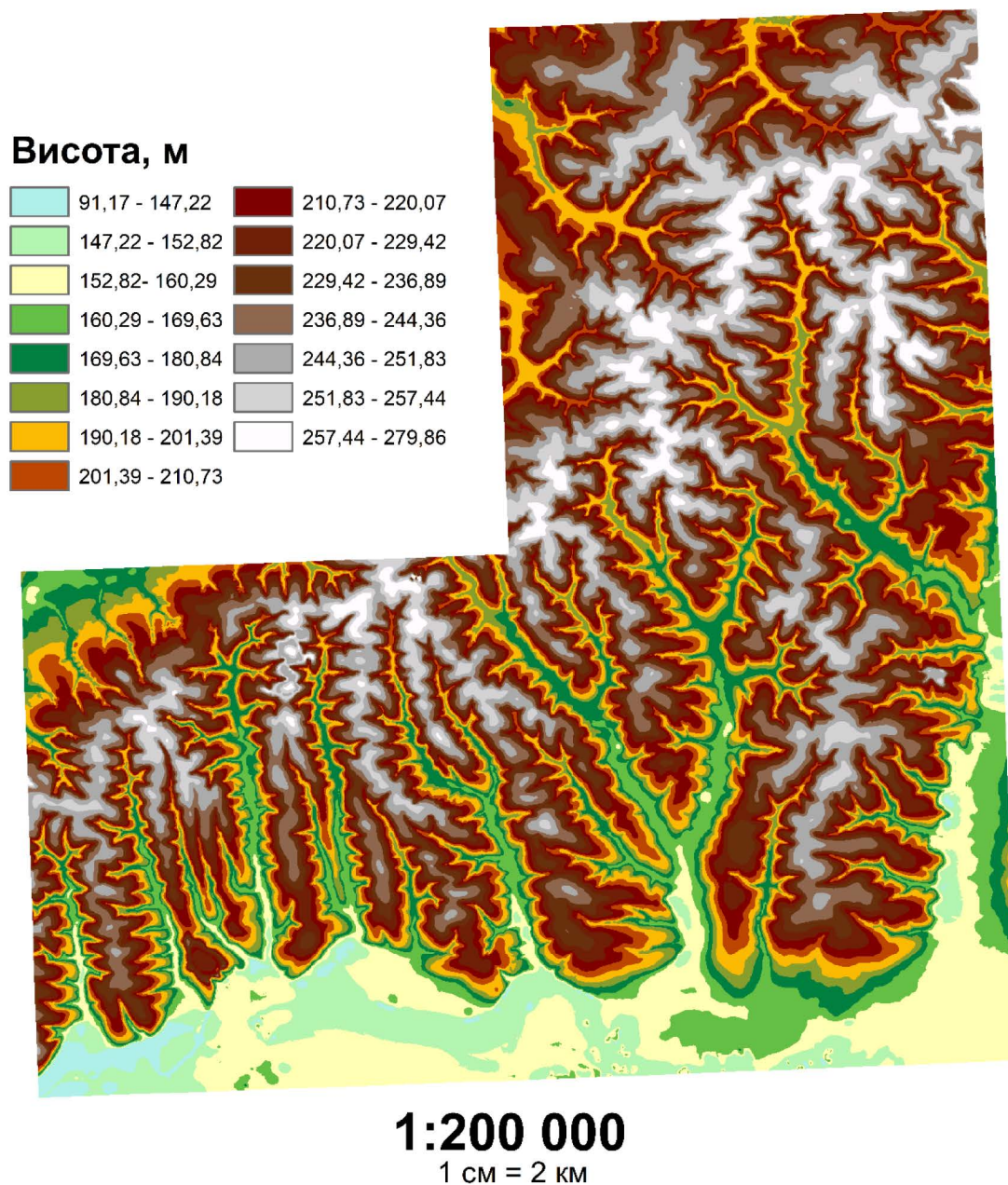


Рис. А.8. Метод радіальних базисних функцій

**ЦМР побудована методом
“Triangulation with Linear Interpolation”
в програмі Surfer**

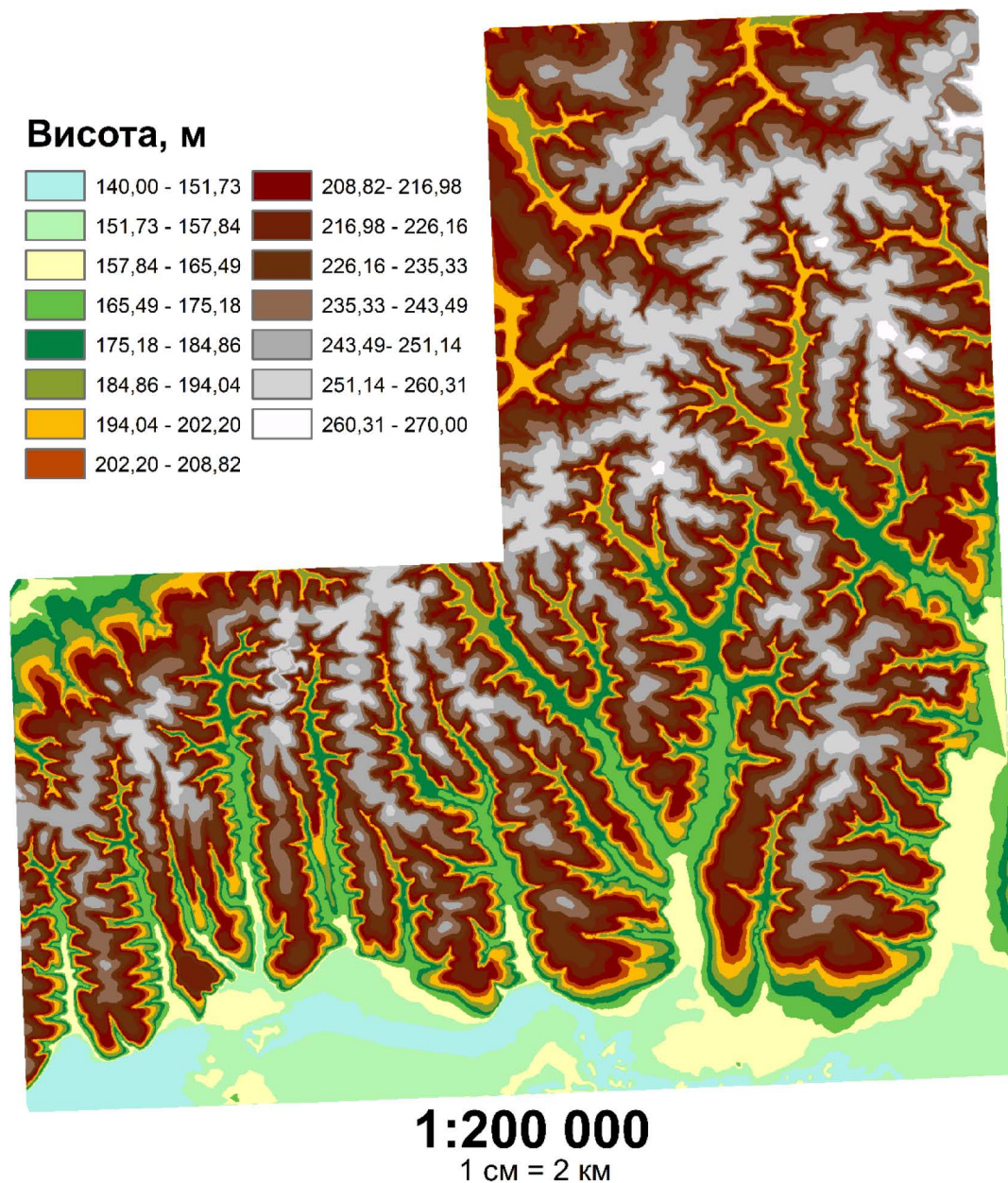


Рис. А.9. Метод “Триангуляція з лінійною інтерполяцією”

ЦМР побудована методом “Moving Average” в програмі Surfer

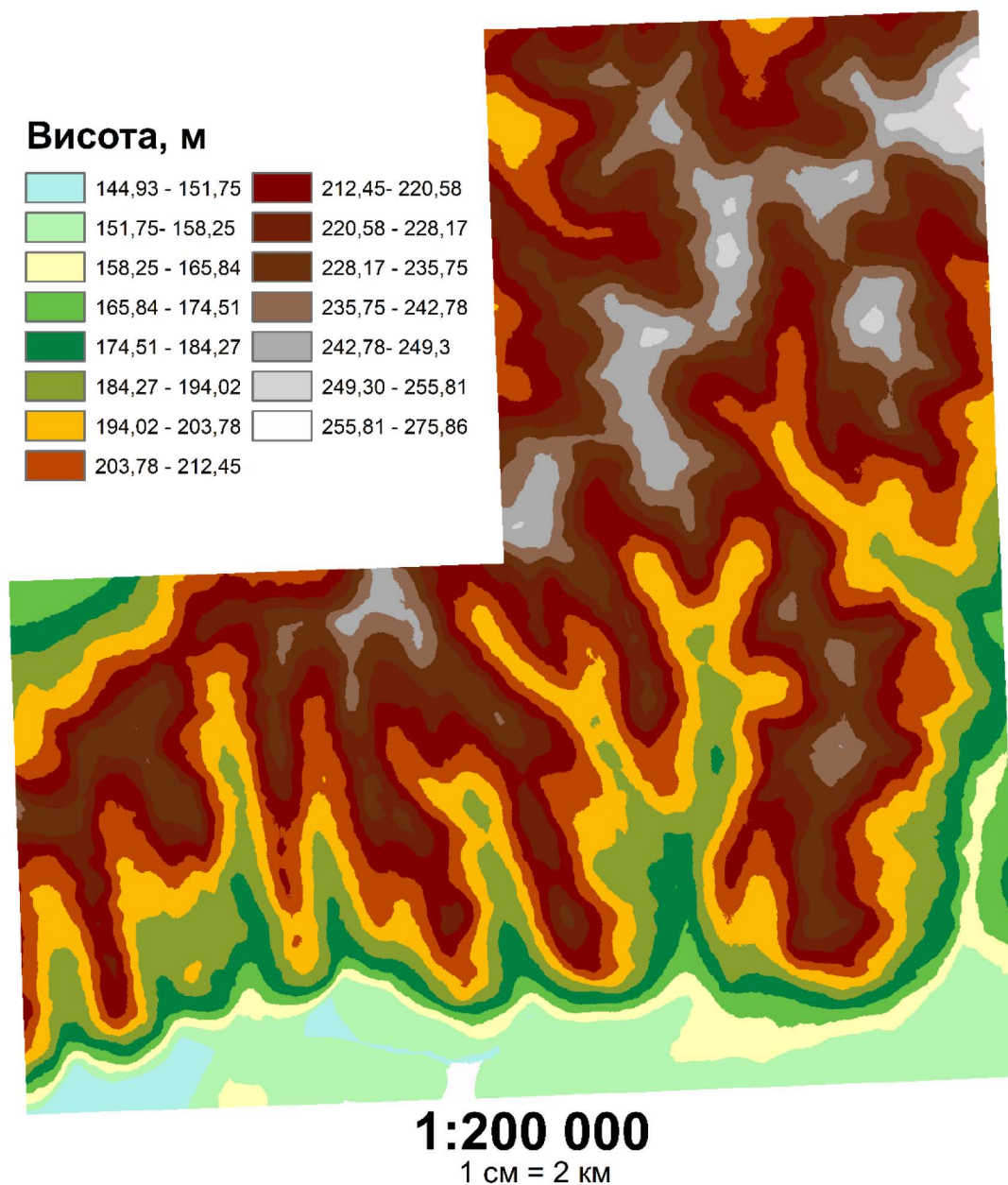


Рис. А.10. Метод змінного середнього

ЦМР побудована методом “Local Polynomial” в програмі Surfer

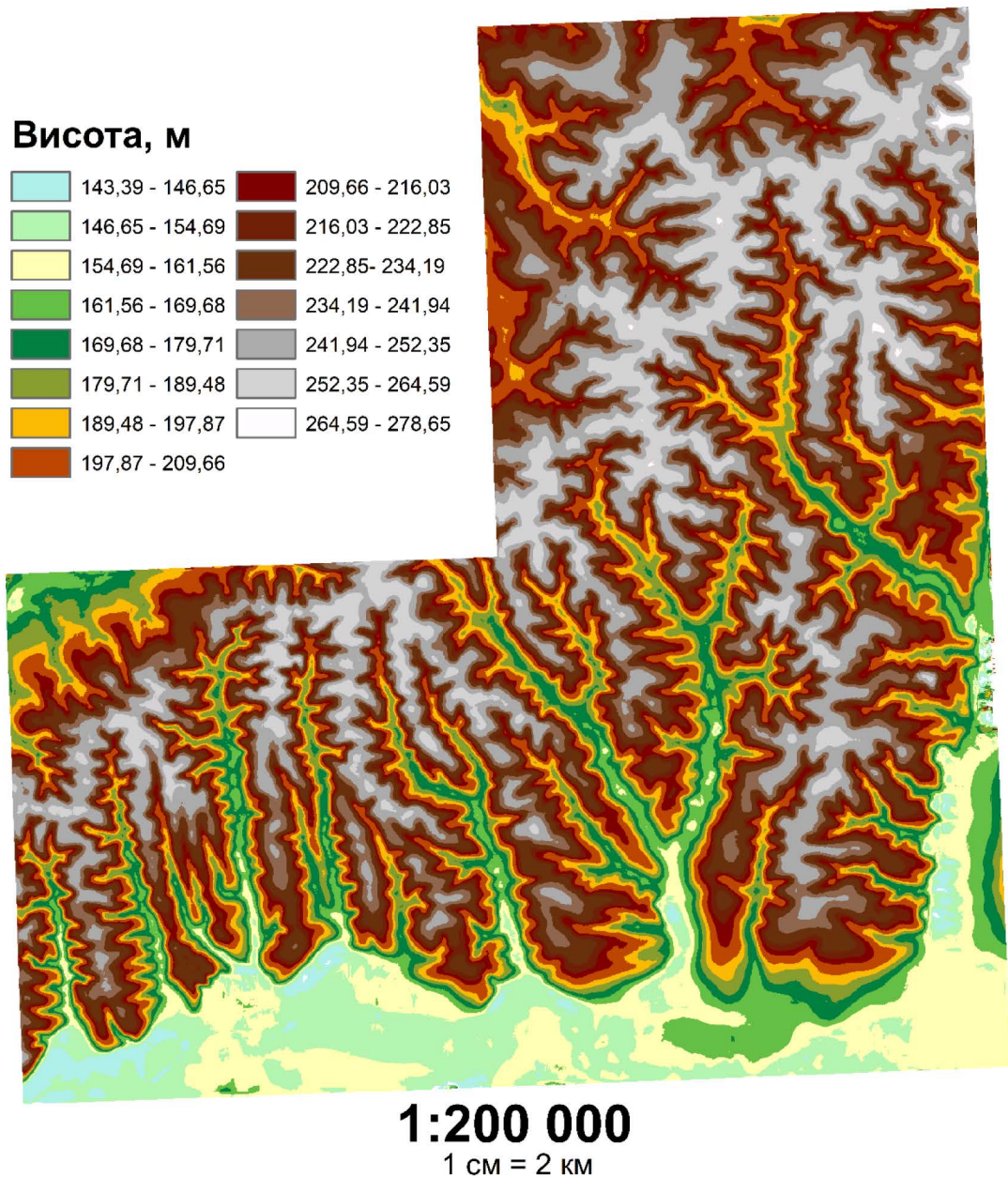
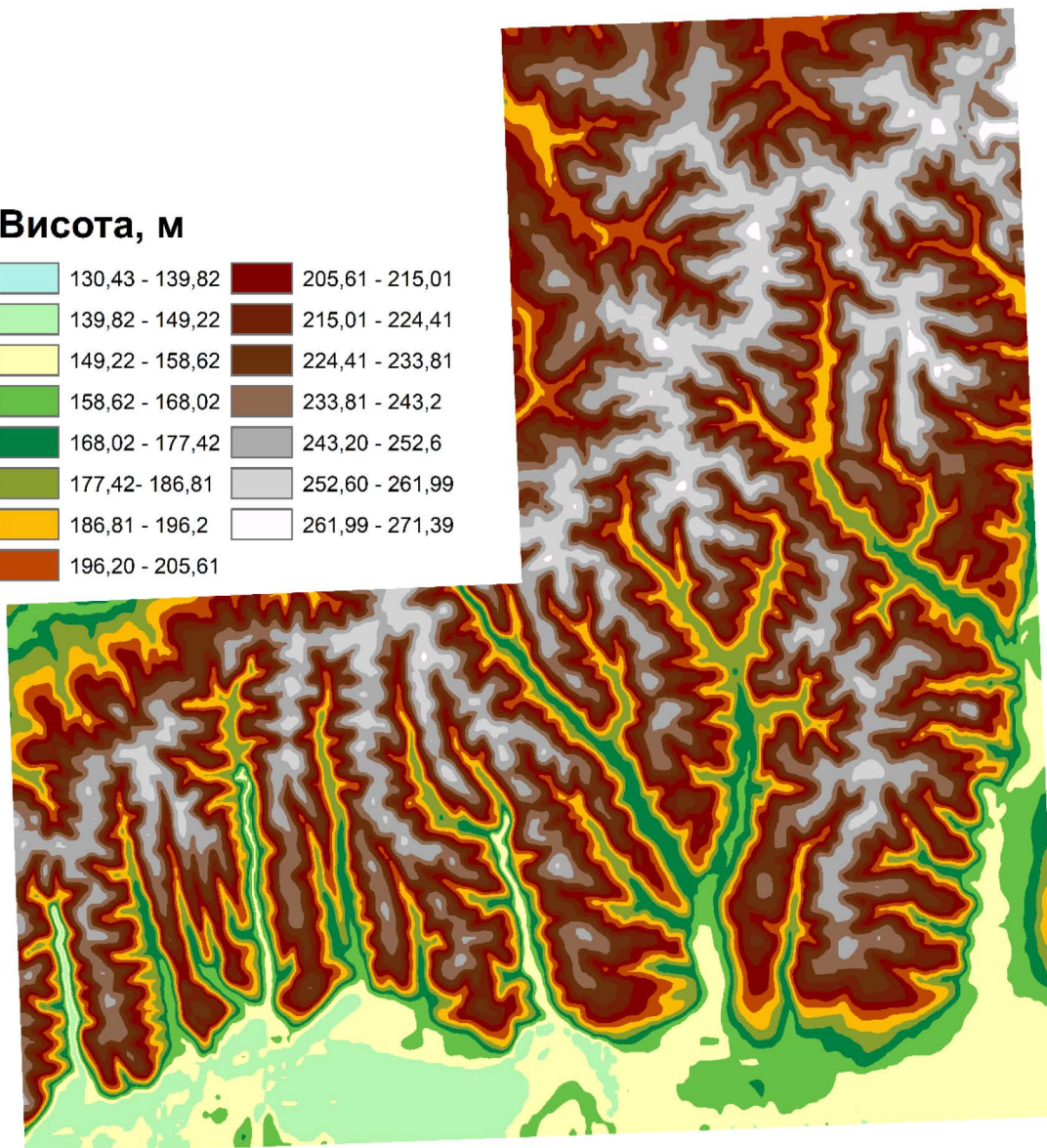


Рис. А.11. Метод локальних поліномів

ЦМР побудована методом ANUDEM

Висота, м

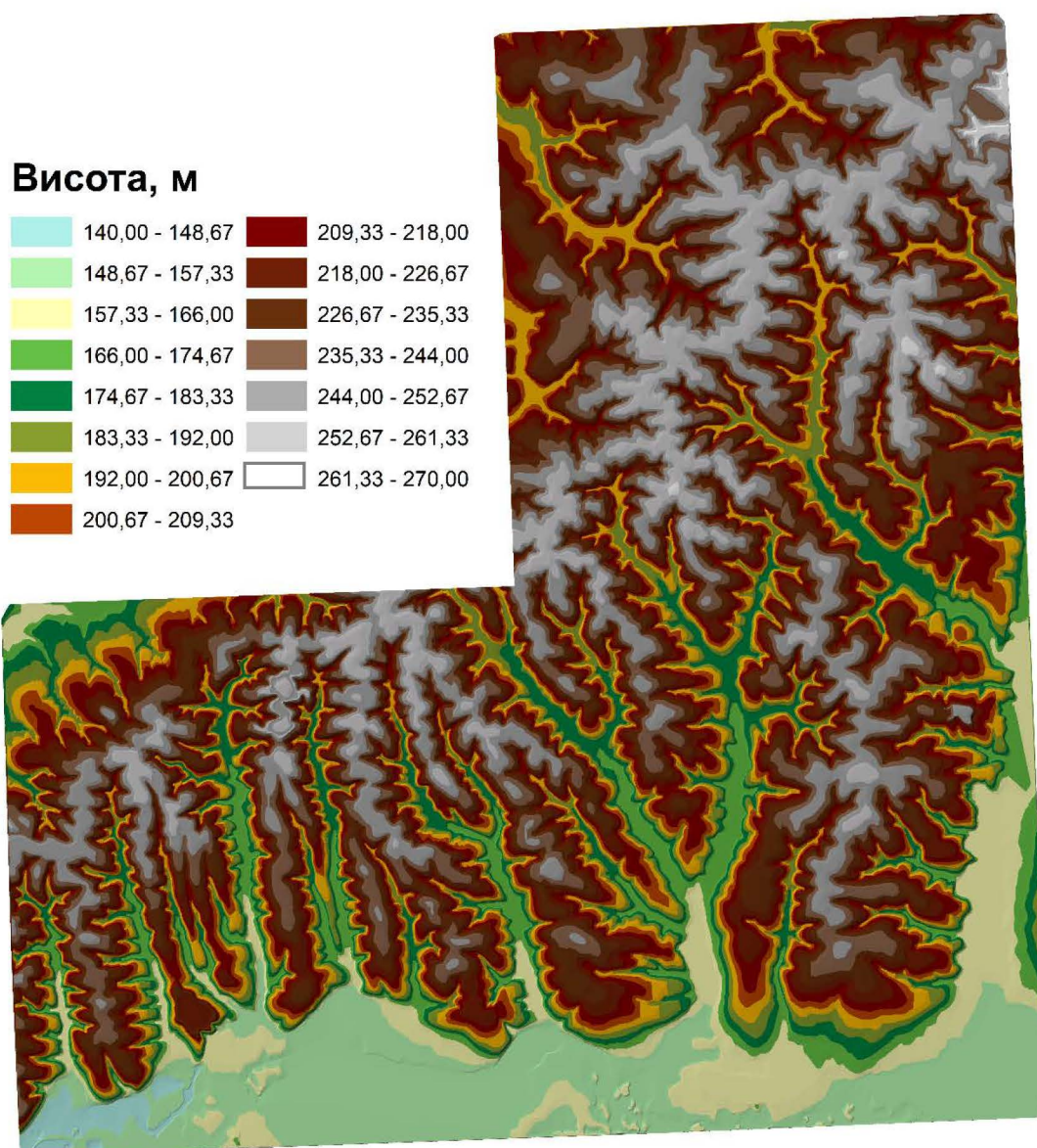
130,43 - 139,82	205,61 - 215,01
139,82 - 149,22	215,01 - 224,41
149,22 - 158,62	224,41 - 233,81
158,62 - 168,02	233,81 - 243,2
168,02 - 177,42	243,20 - 252,6
177,42 - 186,81	252,60 - 261,99
186,81 - 196,2	261,99 - 271,39
196,20 - 205,61	



1:200 000
1 см = 2 км

Рис. А.12. Метод “ANUDEM”

ЦМР побудована методом TIN



1:200 000
1 см = 2 км

Рис. А.13. Метод “TIN”

Додаток Б

Оцінка точності методів побудови ЦМР за контрольними точками

№	Контрольні точки	Зворотно-зважених відстаней	Крігінг	Мінімальної кривизни	Метод Шепарда	Природної околиці	Найближчого сусіда	Поліноміальна регресія	Радіальних базисних функцій	Триангуляція з лінійного інтерполяцією	Змінного середнього	Локальних поліномів	ANUDEM	TIN
1	211,85	210,87	212,62	212,33	212,35	212,49	215,00	213,08	212,63	212,69	193,47	212,92	212,56	212,12
2	224,72	223,20	223,96	223,73	225,66	224,08	220,00	211,12	224,64	224,15	234,61	221,30	222,48	224,67
3	157,78	158,01	158,75	158,79	158,92	158,04	160,00	166,36	158,76	157,88	153,81	159,25	158,74	157,88
4	183,45	183,27	181,53	180,66	180,74	181,90	180,00	217,94	181,53	181,75	198,01	182,05	183,25	184,19
5	183,85	186,56	183,43	182,53	183,88	184,19	180,00	216,66	183,57	184,18	204,11	182,90	182,76	183,81
6	203,59	207,26	204,41	205,01	204,00	204,70	200,00	228,05	204,05	204,50	219,97	205,27	205,18	204,10
7	215,28	217,72	217,29	216,64	216,70	217,23	220,00	229,74	217,26	217,03	216,74	217,82	216,41	215,38
8	234,41	229,47	233,63	234,31	235,34	233,44	230,00	229,24	234,23	233,52	226,99	229,34	233,54	234,40
9	192,97	198,15	193,31	193,57	192,57	193,84	190,00	231,81	193,33	193,87	212,52	193,22	192,10	193,00
10	215,79	218,22	217,04	216,81	216,92	216,99	220,00	219,22	217,14	216,99	228,69	216,74	216,81	216,89
11	155,97	155,77	155,58	155,73	155,01	155,98	155,00	167,26	155,56	155,88	158,70	155,64	155,46	156,41
12	164,98	164,70	163,95	163,41	164,12	164,34	160,00	202,07	164,05	164,44	187,61	163,36	163,47	165,01
13	194,43	194,71	195,44	195,69	197,44	195,33	200,00	184,25	196,19	195,45	196,25	193,68	195,22	194,70
14	162,31	162,90	162,25	162,43	162,25	162,33	165,00	178,17	162,25	162,37	165,98	161,90	162,61	162,38
15	235,67	237,12	236,77	236,95	236,05	236,64	240,00	229,45	236,82	236,64	241,84	236,06	236,76	235,64
16	164,73	166,70	164,70	164,78	163,26	164,93	160,00	191,90	164,89	164,78	186,47	164,42	164,59	164,42
17	165,24	165,85	163,28	164,55	163,30	163,60	160,00	194,03	163,38	163,63	189,18	162,87	164,19	165,27
18	243,87	245,03	244,56	243,84	244,11	244,56	240,00	219,50	244,49	244,37	234,79	246,73	244,63	243,70
19	221,52	218,37	222,36	222,81	223,06	221,83	220,00	228,68	222,51	221,93	222,19	221,05	222,39	222,50
20	214,92	211,01	216,48	216,35	216,55	216,04	220,00	193,79	216,56	215,91	196,09	216,76	216,38	214,88
	Середньо-квадратична похибка σ, м	2,46	1,09	1,16	1,35	0,96	4,00	21,72	1,11	0,93	14,15	1,93	1,07	0,42

Додаток В

Побудова довірчих інтервалів для СКП та оцінки СКП

При $\beta = 0,95$ (95%), $n=20$

$p_1 = 0,025$

$p_2 = 0,975$

$\chi^2_1 = 33,32$

$\chi^2_2 = 8,89$

$\gamma_1 = 0,76$

$\gamma_2 = 1,46$

	Зворотно- зважених відстаней	Крігінг	Мінімальної кривизни	Метод Шепарда	Природної околиці	Найближчого сусіда	Поліноміальна регресія	Радіальних базисних функцій	Триангуляція з лінійною інтерполяцією	Змінного середнього	Локальних поліномів	ANUDEM	TIN
СКП (σ), м	2,46	1,09	1,16	1,35	0,96	4,00	21,72	1,11	0,93	14,15	1,93	1,07	0,42
Нижня границя інтервалу для СКП, σ	1,85	0,83	0,88	1,02	0,72	3,02	16,40	0,84	0,70	10,69	1,46	0,81	0,31
Верхня границя інтервалу для СКП, σ	3,59	1,60	1,70	1,97	1,40	5,85	31,75	1,62	1,36	20,69	2,83	1,57	0,61
Оцінка СКП (σ_x)	0,55	0,24	0,26	0,30	0,21	0,90	4,86	0,25	0,21	3,16	0,43	0,24	0,09
Нижня границя інтервалу для σ_x	0,41	0,18	0,20	0,23	0,16	0,68	3,67	0,19	0,16	2,39	0,33	0,18	0,07
Верхня границя інтервалу для σ_x	0,80	0,36	0,38	0,44	0,31	1,31	7,10	0,36	0,30	4,63	0,63	0,35	0,14