УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Будівельний факультет

Кафедра вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою

Дослідження методів моделювання рельєфу на основі використання даних аерокосмічних спостережень

Пояснювальна записка

до випускної кваліфікаційної роботи магістра

ВПГЗ. 313.193.2026.ПЗ.

Розробила: студентка групи 212-ГЗ-324
Соловйова Тетяна Миколаївна
Спеціальність: 193 Геодезія та землеустрій

Керівник: д.т.н. проф. Угненко Є.Б.

Нормоконтроль: к.т.н доц. Орел Є.Ф.

Зав. кафедри: д.т.н проф. Угненко Є.Б.

Рецензент: директор МПП
«АВТОДОРСЕРВІС»,
к.т.н., доцент кафедри будівництва
та цивільної інженерії Луцького
національного технічного університету
Процюк В.О.

2026

ВПГЗ

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет будівельний
Кафедра вишукувань та проєктування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою
Освітній рівень: магістр
Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, доктор техн. наук
_____ Є.Б. Угненко
«_____»_____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Соловйової Тетяни Миколаївни

1. Тема проекту «Дослідження методів моделювання рельєфу на основі використання даних аерокосмічних спостережень»
керівник роботи Угненко Євгенія Борисівна затверджені розпорядженням по будівельному факультету від «03» листопада 2025 року № 16.
2. Строк подання студентом закінченої роботи – «22» грудня 2025 року
3. Вихідні дані до проекту (роботи): характеристика об'єкта зйомки; картографічні матеріали; дані лідарного сканування з різною щільністю; дані про апаратуру та методику виконання зйомки; дані аерокосмічного дистанційного зондування; додаткові матеріали дистанційного зондування; нормативні документи та технічні інструкції; геоінформаційне програмне забезпечення ArcGIS та Surfer для створення моделей рельєфу.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1. Цифрові моделі рельєфу та способи їх математичного описання. 2. Геодезичні методи збору просторових даних для створення цифрових моделей рельєфу. 3. Візуалізація рельєфу місцевості засобами пакетів ArcGIS та Surfer. 4. Аналіз використання великих масивів даних, отриманих за допомогою лідарного знімання, для побудови моделі земної поверхні. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
мета і завдання, актуальність дослідження, об'єкт, предмет; поняття цифрової моделі рельєфу; операції, які дозволяють виконувати ЦМР; моделювання геополів; методи розрахунку ЦМР; створення ЦМР за даними радіометра Aster; SRTM – однопрохідна інтерферометрична методика ЦМР Полтавської області на основі даних SRTM; створення ЦМР за лідарними даними; створення ЦМР за стереопарами; висновки.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «03» листопада 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1 Вступ.	10.11.2025 р.	виконано
2 Цифрові моделі рельєфу та способи їх математичного описання.	15.11.2025 р.	виконано
3 Геодезичні методи збору просторових даних для створення цифрових моделей рельєфу	22.11.2025 р.	виконано
4 Візуалізація рельєфу місцевості засобами пакетів ArcGIS та Surfer	30.11.2025 р.	виконано
5 Аналіз використання великих масивів даних, отриманих за допомогою лідарного знімання, для побудови моделі земної поверхні	07.12.2025 р.	виконано
6 Висновки	15.12.2025 р.	виконано
7 Оформлення роботи	22.12.2025 р.	виконано

Студент _____ Тетяна СОЛОВЙОВА

Керівник проекту (роботи) _____ Євгенія УГНЕНКО

ВШЕ

Зміст

Вступ 6

1 Цифрові моделі рельєфу та способи їх математичного описання 8

1.1 Поняття цифрової моделі рельєфу 8

1.2 Методи розрахунку ЦМР 16

1.3 Регулярна мережа висот та нерегулярна тріангуляційна мережа 29

2 Геодезичні методи збору просторових даних для створення цифрових моделей рельєфу 35

2.1 Застосування повітряної лазерної локації для вивчення рельєфу 35

2.2 Побудова ЦМР на основі даних радіолокаційного знімання 43

2.3 Побудова моделі рельєфу на основі аерокосмічних фотознімків 61

3 Візуалізація рельєфу місцевості засобами пакетів ArcGIS та Surfer 78

3.1 Загальна характеристика засобів пакету ArcGIS, призначених для роботи з рельєфом 78

3.2 Візуалізація рельєфу Полтавської області в середовищі ArcGIS 83

3.3 Загальна характеристика програмного пакета Surfer 93

3.4 Візуалізація рельєфу Полтавської області в середовищі Surfer 97

ВПГЗ

4 Аналіз використання великих масивів даних, отриманих за допомогою лідарного знімання, для побудови моделі земної поверхні 99
4.1 Загальна характеристика лідарних даних та їх роль у моделюванні рельєфу 99
4.2 Особливості та виклики роботи з великими масивами лідарних даних 100
4.3 Методи побудови моделі земної поверхні 101
4.4 Оцінка точності побудованої моделі земної поверхні 102
Висновки 104
Список використаних джерел 105

ВПГЗ

Вступ

Актуальність теми. Сучасний розвиток геоінформаційних технологій та активне використання даних дистанційного зондування Землі створюють нові можливості для формування цифрових моделей рельєфу (ЦМР). Якісно побудована цифрова модель рельєфу є основою для просторового аналізу, моделювання природних процесів, землеустрою, містобудування та моніторингу територій. З огляду на зростання обсягів аерокосмічних даних та різноманіття їх характеристик, виникає потреба у науково обґрунтованих методичних підходах до побудови цифрового рельєфу, що забезпечить високу точність, надійність та оптимальність обробки інформації. Це робить тему дослідження актуальною та значущою для сучасної геодезії та дистанційного зондування.

Метою роботи є обґрунтування та вдосконалення методичних підходів до формування цифрового рельєфу на основі аерокосмічних даних.

Об'єктом дослідження є процес формування цифрового рельєфу за даними аерокосмічних спостережень.

Предмет дослідження – методичні та технологічні підходи, алгоритми та засоби обробки дистанційних даних для створення цифрової моделі рельєфу.

Методами дослідження були чисельні методи двовимірної інтерполяції даних.

При виконанні кваліфікаційної роботи магістра ставилися такі **задачі**:

- ознайомитись з основними способами представлення рельєфу в геоінформаційних системах, а також методами обчислення цифрових моделей рельєфу;

- дослідити аерокосмічні методи отримання даних про рельєф;

- на основі цифрових даних радарної топографічного знімання для території Полтавської області побудувати тривимірну карту рельєфу, карту з відмивкою рельєфу та карту горизонталей;

- проаналізувати використання великих масивів даних, отриманих за допомогою лідарного знімання, для побудови моделі земної поверхні.

ВТЗ

В роботі охарактеризовано основні способи цифрового представлення рельєфу та методи інтерполяції; описано особливості використання даних лазерного зондування, радарного знімання та аерофотознімання для побудови цифрових моделей рельєфу; охарактеризовано основні можливості програмних пакетів ArcGIS та Surfer щодо візуалізації та аналізу цифрових моделей рельєфу; на прикладі Полтавської області за допомогою програмних пакетів ArcGIS та Surfer побудовано тривимірну карту рельєфу, карту з рельєфом із затіненням, карту ухилів та експозиції рельєфу, карту в ізолініях, профіль висот вздовж заданого розрізу..

Методологічною основою роботи є принципи геодезичного та геоінформаційного моделювання, теорія обробки дистанційних даних та сучасні технології цифрової картографії.

У процесі дослідження використано такі **методи**:

– аналітичний та порівняльний аналіз джерел аерокосмічної інформації;

– методи математичного та статистичного опрацювання даних;

– геоінформаційне моделювання;

– алгоритми побудови цифрових моделей рельєфу (інтерполяція, фотограмметрична обробка, фільтрація);

– графічна та візуальна оцінка якості ЦМР.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні методичних підходів до формування цифрового рельєфу з використанням даних аерокосмічних спостережень, зокрема в уточненні критеріїв вибору вихідних даних та алгоритмів обробки, що забезпечують підвищення точності побудови ЦМР.

Практична значущість полягає у можливості застосування отриманих результатів під час виконання робіт із землеустрою, моніторингу територій, інженерних вишукувань, оцінки природних ризиків та інших завдань, що вимагають точного представлення рельєфу.

ВІГЗ

ВСТУП

Однією з істотних переваг геоінформаційних систем над звичайними “паперовими” картографічними методами досліджень є можливість створення тривимірних просторових моделей. Основними координатами в таких моделях крім широти і довготи служать також дані про висоту. При цьому система може оперувати з десятками і сотнями тисяч висотних відміток, а не з одиницями і десятками, що було можливо і при використанні методів “паперової” картографії. У зв’язку з доступністю швидкої комп’ютерної обробки величезних масивів висотних даних стає реально здійсненною задача створення максимально наближеної до дійсності *цифрової моделі рельєфу*. На основі ЦМР, у свою чергу, можливо швидке створення серії тематичних карт найважливіших морфометричних показників: гіпсометричної карти, карт крутизни та експозицій схилів, а на їхній основі і карт ерозійної небезпеки, напрямків поверхневого стоку, геохімічної міграції елементів, стійкості ландшафтів і т.п. Побудова цифрових моделей рельєфу земної поверхні дозволяє розв’язувати ряд прикладних задач: будувати тривимірні карти місцевості, карти горизонталей та поперечні перерізи, розраховувати площі та об’єми, отримувати інформацію про морфометричні показники в довільній точці земної поверхні, аналізувати зони видимості, здійснювати гідрологічне моделювання та ін.

Метою дипломної роботи є вивчення методів математичного моделювання рельєфу Землі та аерокосмічних методів отримання інформації про рельєф.

Об’єктом дослідження є цифрові моделі рельєфу поверхні Землі. Предмет дослідження – рельєф території Полтавської області.

Методами дослідження були чисельні методи двовимірної інтерполяції даних.

При виконанні дипломної роботи ставились такі задачі:

ВІП

– ознайомитись з основними способами представлення рельєфу в геоінформаційних системах, а також методами обчислення цифрових моделей рельєфу;
– проаналізувати аерокосмічні методи отримання даних про рельєф;
– на основі цифрових даних радарної топографічного знімання для території Полтавської області побудовано тривимірну карту рельєфу, карту рельєфу із затіненням, карту ухилів та експозиції рельєфу, карту в ізолініях.

В дипломній роботі охарактеризовано основні способи цифрового представлення рельєфу та методи інтерполяції; описано особливості використання даних лазерного зондування, радарного знімання та аерофотознімання для побудови цифрових моделей рельєфу; охарактеризовано основні можливості програмних пакетів ArcGIS та Surfer щодо візуалізації та аналізу цифрових моделей рельєфу; на прикладі Полтавської області за допомогою програмних пакетів ArcGIS та Surfer побудовано тривимірну карту рельєфу, карту з рельєфом із затіненням, карту ухилів та експозиції рельєфу, карту в ізолініях, профіль висот вздовж заданого розрізу.

ВІПЗ

Розділ **1.** ЦИФРОВІ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ ТА СПОСОБИ ЇХ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСАННЯ

1.1. Поняття цифрової моделі рельєфу

Під *цифровою моделлю* якого-небудь геометричного (географічного) об’єкта розуміється певна форма подання вихідних даних і спосіб їхнього структурного описання, що дозволяє “обчислювати” (відновлювати) об'єкт шляхом інтерполяції, апроксимації або екстраполяції. *Цифрові моделі рельєфу* – це особливий вид тривимірних математичних моделей, що представляє собою відображення “рельєфу” як реальних, так і абстрактних геополів (поверхонь). При цьому в якості “рельєфу поверхні” у цифровій моделі можуть виступати, крім реального рельєфу, різні інші показники і характеристики: атмосферний тиск, температура повітря, опади, пластовий тиск нафти, геофізичні поля, концентрація забруднюючих речовин і т.п.

У тлумачному словнику основних термінів геоінформатики [7], цифрова модель рельєфу визначається як «*засіб цифрового подання тримірних просторових об'єктів (поверхонь, рельєфів) у вигляді тривимірних даних як сукупності висотних відміток або відміток глибин і інших значень аплікат у вузлах регулярної мережі з утворенням матриці висот, нерегулярної трикутної мережі (TIN) або як сукупність записів горизонталей (ізогіпс, ізобат) або інших ізоліній*». У закордонних джерелах загальноприйняте трохи більше широке визначення ЦМР як сукупності комірок, що покривають область визначення, та способу відновлення значень у цих комірках. В таке визначення вписуються і тріангуляційне, і сіткове, і ізолінійне подання.

В даний час існує певна термінологічна неоднозначність в англомовних назвах продукції, що містить висотне представлення земної поверхні, зокрема по *цифровим моделям поверхні* (ЦМП) та *цифровим моделям рельєфу* (ЦМР). Англомовними аналогами понять ЦМП та ЦМР прийнято вважати DSM (Digital Surface Model) та DTM (Digital Terrain Model). Перша модель

ВЦЗ

включає в себе висоти всіх точок на земній поверхні, а друга – висоти рельєфа або, як доповнення, висоти окремих об'єктів місцевості. В той же час і перша, і друга моделі є DEM (Digital Elevation Model) [3].

Геополя можуть бути як неперервними, так і дискретними (таблиця 1.1), але для обох типів застосовується дискретна форма подання вихідних даних.

Таблиця 1.1

Порівняння реальних і абстрактних геополів **[22]**

	Реальне геополе	Абстрактне геополе
Досліджуване явище	Існує реально	Може бути змодельоване
Характер поширення відображуваного явища	Суцільний	Суцільний або дискретний
Вид локалізації явища	Неперервна множина значень	Окремі точки, лінії, площі
Спосіб відображення	Ізолінії	Псевдоізолінії
Приклади	Рельєф земної поверхні, атмосферний тиск, температура повітря, опади, геофізичні поля і т.п.	Поля забруднення, щільності дискретних явищ і т.п.

ЦМР може бути отримана за допомогою різноманітних технологій. Цифрова модель може мати в якості структурної основи ієрархічну, реляційну, мережеву або комплексну модель. Цифрові моделі можуть зберігатися в базах даних або незалежно у вигляді файлових структур.

Цифрові моделі рельєфу дозволяють виконувати наступні операції:

- картографічна візуалізація [26];
- швидке одержання інформації про морфометричні показники (висота, кут нахилу, експозиція схилу) у будь-якій точці моделі;
- аналіз крутості та експозицій схилів, побудова відповідних карт
- генерація горизонталей (рис. 1.1);

ВНТУ

– побудова профілів поперечного перерізу рельєфу по напрямку прямої або ламаної лінії;
– аналіз поверхневого стоку;
– генерація мережі тальвегів і вододілів;
– розрахунок об'ємів;
– розрахунок площ поверхні;
– гідрологічний аналіз (зокрема, розрахунок рівнів і площ затоплення) [55];
– побудова тривимірних моделей рельєфу з можливостями рендеринга і драпування поверхні як векторними об'єктами (гідромережа, дороги, населені пункти, ландшафтні карти і т.п.), так і растровими шарами (топокарти, дані дистанційного зондування);
– створення відеозображення «прольоту» над поверхнею моделі по заданому маршруту;
– аналіз зон видимості із заданої точки або точок огляду і побудова відповідних карт або тривимірних моделей;
– трансформація вихідної моделі шляхом додавання нових даних;
– геоекологічні дослідження [9, 30] тощо.

Складність подання тривимірних об'єктів на картах, “тривимірного картографування” історично породила багато способів картографічного зображення рельєфу: система ізоліній (горизонталі, ізогіпси), відмітки висот, сукупність точкових, лінійних, площадних знаків, що доповнюють зображення рельєфу горизонталями (знаки ярів, обривів, сухих ділянок рік, скель, льодовиків і т.д.), але не завжди уточнюють його метрику. Тому варто розрізняти цифрові моделі картографічного зображення рельєфу (цифрові карти) і власне ЦМР, під якими на практиці найчастіше розуміють цифрові моделі висот, створені з використанням обмеженого набору вихідних картографічних даних про рельєф [25].

ВПЗ

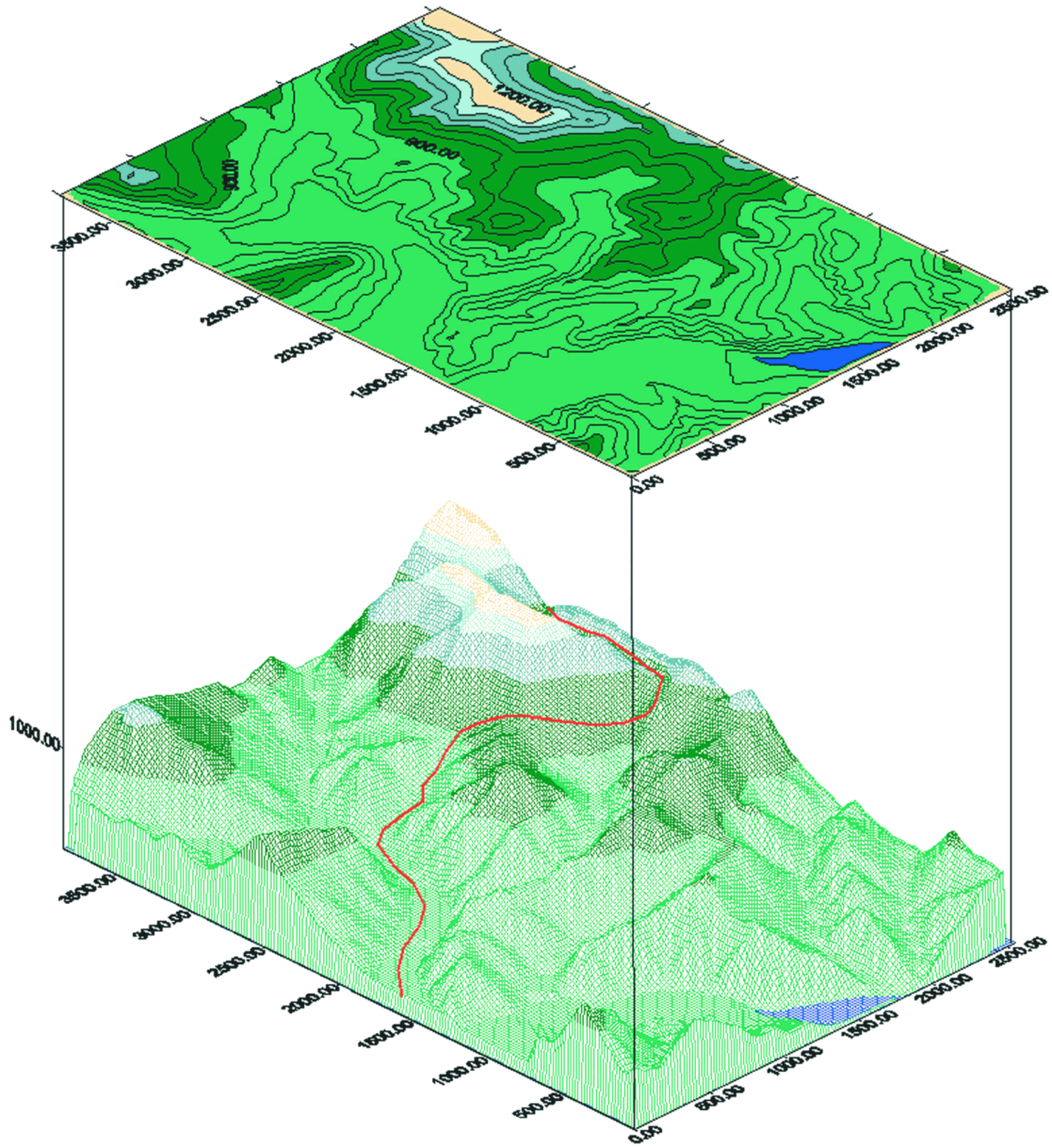


Рис. **1.1.** Генерація горизонталей в програмі Surfer на основі ЦМР

Неоднозначно різні автори підходять і до питання класифікації ЦМР [32]. В 1975 р. П. Жолі, аналізуючи розмаїтість джерел даних про рельєф з врахуванням інструментальних методів зйомок, характеру фотограмметричної обробки стереомоделей і технології цифрування карт, запропонував класифікацію ЦМР за типами просторової організації даних про рельєф суходолу. Він виділив наступні системи висотних відміток рельєфу:

– у випадково розташованих точках – вузлах нерегулярної мережі (на-

приклад, у результаті тахеометричної зйомки);

– у напіввпорядкованих множинах точок (інженерні вишукування) та у вузлах регулярних решіток (спеціальні види площадного нівелювання);
– лінійно впорядковані множини точок, одержувані шляхом цифрування карт (обведенням ліній або скануванням);
– повністю або частково впорядковані множини точок, згенеровані в процесі фотограмметричної обробки стереомоделей місцевості.

Д.Б. Лисицький в 1988 р. запропонував класифікацію моделей топографічних поверхонь по характеру розподілу утворюючих їх множин точок місцевості, що включає 4 типи:

– геометрично впорядковану (регулярну) модель із завданням поверхні у вершинах правильних геометричних фігур;
– геометрично впорядковану (аналогову) модель із розташуванням точок на горизонталях, структурних лініях і в характерних точках поверхні;
– напіврегулярну модель як комбінацію перших двох типів;
– хаотичну (випадкову) модель із довільним розташуванням точок дискретизації поверхні.

Узагальнюючи схеми створення ЦМР, О.Р.Мусін (1998) наводить 4 типи вихідних множин точок для моделювання геополів:

– нерегулярно розташованих точок;
– нерегулярно розташованих точок, положення яких зв’язано зі структурою рельєфу (структурні лінії поля);
– точок, регулярно розташованих вздовж ліній, слабко зв’язаних зі структурою поля (на ізолініях або профілях, наприклад, галси попутного проміру);
– регулярно розташованих точок (прямокутні, трикутні або шестикутні

ВІПЗ

регулярні мережі).

При цьому, як правило, цифрове моделювання рельєфу включає дві групи операцій, перша з яких обслуговує рішення задач створення ЦМР, а друга – її використання.

Перші експерименти по створенню ЦМР відносяться до ранніх етапів розвитку геоінформатики і автоматизованої картографії першої половини 1960-х рр. Згодом були розроблені методи і алгоритми розв'язання різних задач, створені потужні програмні засоби моделювання, великі національні і глобальні масиви даних про рельєф, накопичений досвід розв'язання з їхньою допомогою різноманітних наукових і прикладних задач. Зокрема, великий розвиток набуло застосування ЦМР для військових задач.

Одним з лідерів у сфері створення і використання ЦМР є США. В даний час національною топографо-картографічною службою країни – Геологічною зйомкою США (U.S. Geological Survey) – виробляються п'ять наборів даних, що представляють ЦМР у форматі DEM (Digital Elevation Model) і розрізняються по технологіях, роздільній здатності та просторовому охопленню (Таблиця 1.2). При виробництві DEM використовуються чотири технології. Перша з них заснована на автоматизованій обробці цифрових (оцифрованих) аерознімків на цифрових стереофотограмметричних станціях, друга заснована на ручному профілюванні стереомоделі на автоматичних стереоплоттерах з цифровим виходом, третя – на промальовуванні на них же і паралельному цифруванні горизонталей, четверта – на перетворенні цифрових топокарт у формат DLG.

Кожний блок "7,5-хвилинної" ЦМР США в границях аркуша топокарти масштабу 1:24 000 – це матриця висот у вузлах регулярної мережі з роздільною здатністю 30 м, розбитої в системі прямокутних координат проекції UTM. Множини висотних відміток інших ЦМР локалізовані у вузлах мережі меридіанів і паралелей з розрізненням, вимірюваним одиницями кутових секунд, причому для високоширотних блоків номенклатурних аркушів топо-

ВІПС

карт і території Аляски в цілому кутовий розмір комірок різний по широті і довготі. DEM-дані розглядаються як складова частина Національної цифрової картографічної бази даних NDCDB. Для більшої доступності цих даних Геологічною зйомкою США зараз здійснюється їхнє конвертування в стандартний формат SDTS. Слід зазначити, що дані DEM лежать в основі цифрових моделей рельєфу, використовуваних у популярній пошуковій системі Google Earth.

Останнім часом для виробництва ЦМР у США широко використовуються дані радіолокаційного знімання з космічних кораблів багаторазового використання Shuttle у рамках проекту NASA під назвою SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Метою цього проекту є виробництво цифрових топографічних карт на всю територію суходолу між 60° півн.ш. та 56° півд.ш. (тобто на 80% всього суходолу Землі) із просторовою роздільною здатністю 1 кутова секунда (25–30 м) і вертикальною точністю 16 м (для SRTM з розрізненністю 3 кут. секунди). Дані SRTM одержали велику популярність при створенні віртуальних геозображень.

Як показує досвід створення ЦМР США, мінімальний масштаб карт, використовуваних для найбільш грубої «одноградусної» ЦМР (1-degree DEM), не виходить за межі 1:250 000, тобто масштаби дрібніше 1:250 000 в якості джерела даних для ЦМР не використовуються.

ВЦЗ

Таблиця **1.2.** Основні характеристики ЦМР США

Оригінальна назва	Система планових координат	Блоки	Подання висот	Просторова роздільна здатність	Організація даних
7,5-minute DEM 1:24000 (1:25000)	Проекція UTM у системі вихідних геодезичних дат NAD 27 або в геодезичній системі параметрів Землі NAD 83	Номенклатурний аркуш топокарт в межах сферичної трапеції 7,5×7,5 хв	Метри (фути) або десяті частки метра (фута) від нуля висот системи 1929 р. NGVD 29 для континентальної частини США та місцевий середній рівень моря для Гавайських островів і Пуерто-Рико	30х30 м	Значення висот з інтервалом 30 м у порядку з півдня на північ по профілях, що слідують один за одним із заходу на схід на відстані 30 м. Число висотних відміток на профілях різне і залежить від положення трапеції в границях зони
30-minute DEM 1:100 000	Геодезичні координати (широта і довгота) у системах NAD 27 або NAD 83	Чотири 15-хвилинних блоки в межах сферичної трапеції 30×30 хв (1/2 частина аркуша топо- карти)	Метри (фути) або десяті частки метра (фута) від нуля висот системи 1929 р. NGVD 29 для континентальної частини США та місцевий середній рівень моря для Гавайських островів і Пуерто-Рико	2×2″	Значення висот з інтервалом 2″ в порядку з півдня на північ по профілях, що слідують один за одним із заходу на схід на відстані 2″
1-degree DEM 1:250 000	Широта і довгота у всесвітніх геодезичних системах WGS 72 або WGS 84	Номенклатурний аркуш топокарт у границях сферичної трапеції 1×1°	Метри від нуля висот системи 1929 р. NGVD 29 для континентальної частини США і Аляски та місцевий середній рівень моря для Гавайських островів і Пуерто-Рико	Висотні відмітки з інтервалом 3″ по профілях; відстань між профілями 3″ для широт південніше 50° півн. ш., 6″ для широтного пояса 50-70° півн.ш., 9″ для широт північніше 70° півн.ш.	Значення висот у порядку з півдня на північ по профілях, що слідують один за одним із заходу на схід
7,5-minute Alaska DEM 1:24 000 (1:25 000)	Геодезичні координати (широта і довгота) у системах NAD 27 або NAD 83	Блоки розміром 7,5×10 хв для широт південніше 59° півн.ш., 7,5×11,25 хв для широтного пояса 59-62° півн.ш., 7,5×15 хв для широтного пояса 62-68° півн.ш, 7,5×18 хв для широт північніше 68° півн.ш.	Метри або десяті частки метра від нуля висот системи 1929 р. NGVD) 29	Висотні відмітки з інтервалом 1 з по профілях з відстанню між ними 2″	Значення висот у порядку з півдня на північ по профілях, що слідують один за одним із заходу на схід
15-minute Alaska DEM 1:63 360	Геодезичні координати (широта і довгота) у системах NAD 27 або NAD 83	Блоки розміром 15×20 хв для широт південніше 59° півн.ш., 15×22,5 хв для широтного пояса 59-62° півн.ш., 15х30 хв для широтного пояса 62-68° півн.ш., 15×36 хв для широт північніше 68° с.ш.	Метри або десяті частки метра від нуля висот системи 1929 р. NGVD) 29	Висотні відмітки з інтервалом 2″ по профілях з відстанню між ними 3″	Значення висот у порядку з півдня на північ по профілях, що слідують один за одним із заходу на схід

ВЦЗ

Ще одним прикладом успішного досвіду національної ЦМР може служити ЦМР Данії. Перша цифрова модель рельєфу Данії була створена в 1985 р. для рішення задачі оптимального розміщення трансляторів мережі мобільного зв'язку і являла собою масив висотних відміток у вузлах регулярної мережі 50×50 м, отриманих шляхом цифрування горизонталей топографічної карти масштабу 1:50 000 з перетином 5 м. Однак роздільна здатність цієї ЦМР не дозволяло відобразити типові для території Данії дрібні позитивні і негативні форми рельєфу, і Кадастрово-Топографічною службою Данії було ухвалене рішення про створення нової ЦМР, яка будуватиметься на основі цифрової карти масштабу 1:25 000 з перетином 2,5 м із залученням аерофотознімальних матеріалів для уточнення моделі на окремих ділянках. При цьому для нової версії ЦМР із розрізненням 25×25 м цифруються не тільки горизонталі, але і берегова лінія внутрішніх водойм, водотоки, дороги, висотні відмітки окремих об'єктів, реалізуючи тим самим структурний підхід до її побудови.

1.2. Методи розрахунку ЦМР

Створення ЦМР і перерахування їх з одного виду в іншій базується на використанні математичного апарата. Від правильного його застосування залежить не тільки адекватність побудованої моделі, але і оптимальність витрат ресурсів машинної пам'яті і часу обчислення.

Для аналізу на основі чисельних методів найбільш зручними є дві форми подання: у вигляді значень у вузлах регулярної сітки (сіткові моделі) і у вигляді значень у вузлах нерегулярної трикутної сітка (тріангуляційні моделі). Ізолінійну форму подання використовувати прямо для візуалізації (за винятком способу ізоліній, причому тільки із уже наявним кроком перетинів) і аналізу важко. Область визначення в перших двох випадках розбивається на множину прямокутних або трикутних комірок, що дозволяє легко відновлювати значення висот у довільній точці шляхом інтерполяції, а також знаходити похідні показники та виконувати чисельний аналіз. Найбільш простим і

ВПЗ

загальновживаним способом інтерполяції для трикутних комірок є лінійна функція двох змінних

$$f(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y,$$

коефіцієнти якої однозначно визначаються за значеннями висот у вершинах трикутника. Для прямокутних комірок аналогічну властивість має білінійна функція

$$f(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy.$$

Для рідких сіток з великими відстанями між вузлами для відновлення значень показника іноді застосовують і більш складні функції, для побудови яких залучаються значення в сусідніх комірках [1, 35, 39]. Однак найчастіше такі способи використовуються для згущення сітки з наступним використанням більше простих способів. Кожна із зазначених вище форм має свої переваги і недоліки, однак тріангуляційні моделі застосовуються в основному для великих масштабів, оскільки дозволяють вбудовувати у свою структуру границі природних і штучних об'єктів, у той час як сіткові, незважаючи на деяку надмірність даних у порівнянні із тріангуляційними моделями, для будь-яких.

Описані нижче методи застосовуються для моделювання рельєфу лише в тих випадках, коли значення висот відомі тільки в декількох точках (надалі будемо називати їх *опорними*), розташованих, в загальному випадку, нерегулярно. Звичайно такого роду вихідні дані отримуються після проведення польових знімань (нівелювання, тахеометрична зйомка, зйомка з використанням приймачів супутникового позиціонування і т.д.), або фотограмметричним способом по стереознімкам [21]. На відміну від рельєфу земної поверхні, для більшості інших географічних полів вихідні дані в такій формі зустрічаються найчастіше (точки випробування в екологічних дослідженнях, точки прив'язки показника при побудові абстрактних полів і т.д.).

Надалі будемо використовувати наступні позначення: n – кількість опорних точок; x_i, y_i – планові прямокутні координати опорних точок; z_i –

ВГЗ

значення висот в опорних точках; $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)$ – опорні точки як геометричні об'єкти (вектори) на площини, індекс i пробігає всі цілі значення від 1 до n; (x, y) – довільна точка області визначення ЦМР; $f(\mathbf{p}) = f(x, y)$ – модельна функція. Задача моделювання зводиться до описання конструктивного способу відновлення значення висоти $f(x, y)$ у довільній точці (x, y) області моделювання, заснованого на даних в опорних точках, або в аналітичному вигляді, або у вигляді деякого алгоритму, що задає послідовність операцій для обчислення значення висоти.

У математиці відомо досить велика кількість методів моделювання за даними в точках, деякі з них розглядаються в оглядах [14, 24, 36, 42, 55, 61]. Зупинимось лише на тих, які найчастіше зустрічаються в програмних пакетах по моделюванню або є найбільш підходящими для моделювання саме рельєфу.

Спосіб побудови ЦМР по нерегулярній мережі вихідних точок вимагає постановки задачі відновлення (інтерполяції) поверхні і перерахування мережі на регулярну. В даний час існує багато методів, що дозволяють вирішувати цю задачу. Серед них – інтерполяція на основі тріангуляції Делоне, середньозважена інтерполяція, Крайгінг та ін.

Однак у кожному разі при обчисленні оцінки точки необхідно користуватися алгоритмами інтерполяції (значення, одержувані у вихідних точках, збігаються з істинними абсолютно точно) або апроксимації (значення, одержувані у вихідних точках, збігаються із істинними з деяким ступенем точності). Ще однією особливістю вибору методу розрахунку є ступінь його локалізації. Можна скористатися однією формулою наближення для всієї досліджуваної території (глобальний алгоритм) або міняти формулу наближення по мірі зміни аргументів (кусково-локальний алгоритм). Вибір цих параметрів алгоритму залежить від якості вихідних даних (немає необхідності вирішувати більше складну задачу інтерполяції, якщо якість вихідних даних невисока) і наших знань про рельєфоутворюючі процеси (якщо на

ВГЗ

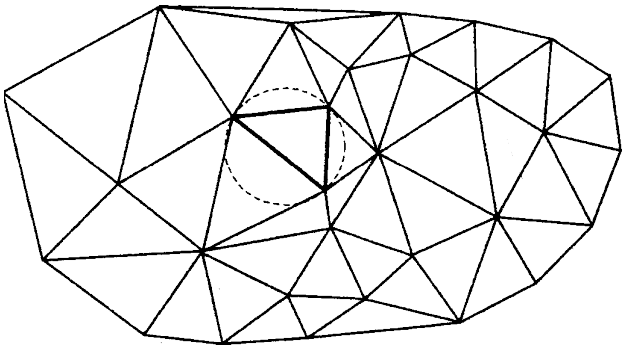


Рис**. 1.2.** Умова тріангуляції Делоне

території рельєфоутворення пов'язане із сукупністю декількох слабкозв'язаних процесів, то природно використовувати кусково-локальний алгоритм).

Одним з найпоширеніших методів, використовуваних картографами при побудові карт вручну, є спосіб *тріангуляції.*

При цьому спочатку тріангулюється множина вихідних точок на карті, тобто будується система трикутників, що не перекриваються, вершинами яких є вихідні точки. Поверхня представляється як багатогранник із трикутними гранями, де проекція кожної грані на площину карти є відповідний трикутник тріангуляції, а висоти дорівнюють значенням $z(i)$ в i-х точках. Множина точок на площині може бути розбита на трикутники багатьма способами, відповідно до цього будуть виходити різні поверхні. Оптимальною для моделювання рельєфу є тріангуляція Делоне [31], у якій щоб уникнути заломів ізоліній на ребрах полігонів для кожної вихідної точки будується локальний поліном першого або другого ступеня, і по тріангуляції ці локальні поліноми «склеюються» в одну гладку поверхню. При цьому повинне виконуватися умова Делоне – всередину кола, описаного навколо будь-якого побудованого трикутника, не повинна попадати жодна із заданих точок тріангуляції (рис. 0.2). У найпростішому варіанті (фактично це ЦМР у тріангуляційній формі) інтерполяція виконується за допомогою лінійної функції на кожному трикутнику. До недоліків методу можна віднести те, що обчислення значень показника можливо тільки в межах опуклої оболонки множи-

ВІТЗ

ни опорних точок, у граничних трикутниках спостерігаються значні спотворення, модельна функція не є гладкою. До переваг методу можна віднести можливість вбудовувати в структуру тріангуляції додаткові об'єкти природного і штучного характеру (тальвеги, границі ярів, обриви, дороги і т.д.). Це можливо при використанні тріангуляції з обмеженнями і у такому виді робить метод найбільш підходящим для моделювання рельєфу по даним великомасштабних польових зйомок, оскільки при проведенні ізоліній вручну використовується аналогічний підхід.

На основі тріангуляції можлива побудова не тільки кусково-лінійних функцій, але і гладких із заданим ступенем гладкості. Деякі варіанти таких функцій пропонуються в роботах [1, 35, 44]. У методі Акіми [35] функція на кожному трикутнику являє собою поліном п'ятого степеня від двох змінних, коефіцієнти поліномів визначаються з умов їхнього гладкого зшивання на ребрах трикутників. У двох інших способах значення функції в кожному трикутнику визначається аналогічно методу Шепарда як зважена сума трьох функцій, локалізованих у вершинах трикутника. Однак ваги обчислюються іншим способом, на основі барицентричних координат у трикутнику, а не відстаней до вершин. Це дозволяє уникнути недоліків середньозваженої інтерполяції і при певному підборі ваг одержувати модельну функцію заданого ступеня гладкості.

Недолік методу, пов'язаний із граничними трикутниками, може бути усунутий шляхом додавання додаткових точок на границі опуклої оболонки, що дозволяє уникнути гострокутних трикутників з довгою стороною і нівелювати граничний ефект. Екстраполяція за межі опуклої оболонки досягається шляхом додавання додаткових точок у вершини прямокутної області моделювання. Перевагою методу є його локальність і висока обчислювальна ефективність.

Інтерполяція і апроксимація на основі ієрархічних B-сплайнів.

У даному методі поверхня представляється як сума кусково-

ВПЗ

поліноміальних функцій, визначених на основі двовимірних базисних сплайнів (тензорний добуток одномірних B-сплайнів) з коефіцієнтами, заданими на регулярній прямокутній сітці, причому на кожному наступному рівні ієрархії сітка згущається [41, 51, 63]. Для кожного конкретного рівня ієрархії модельна функція представляється у вигляді:

$$f(x,y)=\sum_{k=0}^{3}\sum_{l=0}^{3}B_k(s)\,B_l(t)\,c_{(i+k)(j+l)},$$

де $i=[x/h]-1$; $j=[y/h]-1$; $s=x/h-[x/h]$; $t=y/h-[y/h]$; операція [...] означає взяття цілої частини числи; h – крок сітки, на якій задані коефіцієнти сплайна c_{ij}; $i=-1,0,\ldots,m+1$; $j=-1,0,\ldots,n+1$; B_k, B_l – кубічні B-сплайни, які визначаються на відрізку $0\le t<1$ як

$$B_0(t)=(1-t)^3/6,$$

$$B_1(t)=(3t^3-6t^2+4)/6,$$

$$B_2(t)=(-3t^3+3t^2+3t+1)/6,$$

$$B_3(t)=t^3/6.$$

Коефіцієнти c_{ij} визначаються методом найменших квадратів за значеннями у вихідних опорних точках. При досить дрібній сітці коефіцієнтів метод виходить інтерполяційним. Результуюча поверхня отримується як сума функцій для кожного рівня ієрархії, для обчислення коефіцієнтів кожного наступного рівня як значення в опорних точках використовуються залишки – різниця вихідних значень і суми значень функцій попередніх рівнів. При побудові функції можуть бути використані не тільки поліноміальні базисні сплайни, але і інші, наприклад, сплайни з натягом, раціональні сплайни і т.д. Метод активно використовується при конструюванні поверхонь у системах автоматизованого проектування, для стиснення зображень, морфінга і т.д. Перевагою методу, що відрізняє його від, наприклад, методу радіальних функцій, є те, що він однаково добре працює як для рівномірного, так і нерів-

ВГЗ

номірного просторового розподілу опорних точок (наприклад, зі згущенням вздовж ліній профілів). Також як і метод, заснований на тріангуляції, він має високу швидкодію.

Широко використовується також *метод Крайгінгу*, названий за прізвищем південноафриканського геолога D.G.Krige. У цьому методі використовується функція, що називається *напівваріограмою*, де важливу роль грає радіус впливу. Варіограма являє собою експериментальну криву, що будується в такий спосіб: у поле точок на графіку уздовж осі *X* відкладається відстань між кожними двома вихідними точками, а вздовж осі *Y* – різниця *Z* між ними. Потім будується крива, що відповідає середнім значенням різниці по *Z*. Крайгінг дозволяє врахувати випадок, коли в який-небудь із точок випадково виникають дуже високі значення. При врахуванні цього ефекту Крайгінг перетворюється з інтерполяційної функції в екстраполяційну. Крайгінг як інтерполяційна функція незамінний при розташуванні вихідних точок з дуже великою неоднорідністю, наприклад у випадку використання вихідних даних, розташованих по профілях. У методі Крайгінгу використовується статистичний підхід до побудови модельної функції [8, 13, 23, 50, 52, 59, 49]. Передбачається, що модельна функція $f(\mathbf{p})$ є випадковим процесом зі стаціонарними приростами і заданою варіограмою $\gamma(\mathbf{h})$ (або коваріаційною функцією $c(\mathbf{h})$), а значення в опорних точках є деякою реалізацією цього випадкового процесу. Варіограма (а також коваріаційна або автокореляційна функції) є найважливішою характеристикою випадкового процесу зі стаціонарними приростами і задає розподіл квадратів різниць значень (або кореляцію) у парах точок залежно від їхнього взаємного розташування, але не від їхнього абсолютного положення. Процедура інтерполяції називається оцінюванням, а отримане в результаті інтерполяції значення $z_0 = f(\mathbf{p}_0)$ називається оцінкою в точці $\mathbf{p}_0$. Модельна функція представляється у вигляді:

ВПЗ

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{n} a_i(\mathbf{p}) \cdot z_i ,$$

де ваги a_i, обчислюються з умови незміщеності оцінки та мінімізації її дисперсії. У випадку стаціонарності випадкового процесу це приводить до системи лінійних рівнянь ординарного Крайгінга:

$$\sum_{j=1}^{n} a_j \gamma_{ij} + \mu = \gamma_i , \quad i = 1, \ldots, n , \qquad \sum_{j=1}^{n} a_j = 1,$$

де $\gamma_{ij} = \gamma(p_i - p_j)$, $\gamma_i = \gamma(\mathbf{p}_i - \mathbf{p})$. Якщо в даних присутній значимий тренд, його можна врахувати в процедурі універсального Крайгінга.

Найважливішим у Крайгінгу є підбирання модельної варіограми, яка найкраще відповідає даним в опорних точках. Приведемо формули для деяких найбільш популярних модельних функцій варіограм (тут скрізь $t = h / a$, $\gamma(0) = 0$ для випадків (1)–(5), $\gamma(h) = c_0 + c_1$ при $h > a$):

1) лінійна $\gamma(h) = c_0 + c_1 t$;

2) сферична $\gamma(h) = c_0 + c_1 \left(\frac{3}{2} t + \frac{1}{2} t^3 \right)$;

3) логарифмічна $\gamma(h) = c_0 + c_1 t^2 (1 - \ln t^2)$;

4) квадратична $\gamma(h) = c_0 + c_1 (2t - t^2)$;

5) кругова $\gamma(h) = c_0 + c_1 \frac{2}{\pi} (t \sqrt{1 - t^2} + \arcsin t)$;

6) експоненціальна $\gamma(h) = c_0 + c_1 (1 - e^{-3t})$;

7) Гаусова $\gamma(h) = c_0 + c_1 (1 - e^{-3t^2})$.

Параметрами варіограм є: a – радіус впливу або лаг, c_0 – ефект самородка, $c = c_0 + c_1$ – поріг, c_0 / c – відносний ефект самородка.

Незважаючи на відмінність теоретичних підходів і формул, методи Крайгінга та радіальної інтерполяції приводять до однієї модельній функції (за умови використання однакової варіограми та радіальної функції). Цей

ВІТВ

факт може бути строго доведений математично і один з таких доказів наведено в роботі засновника геостатистики Матерона [52]. Перевагою Крайгінга є можливість об'єктивно підібрати найбільш підходящу варіограму шляхом співставлення вибіркової варіограми, побудованої за значеннями в опорних точках, з модельними значеннями.

Метод середньозваженої інтерполяції був розроблений К.Ф. Гауссом на початку XIX в. для потреб геодезії, однак у західній літературі його зв'язують із ім'ям Шепарда. Значення модельної функції в точці обчислюється як зважена сума значень в опорних точках:

$$f(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(\mathbf{p}) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i(\mathbf{p})}, \qquad w_i(\mathrm{p}) = \left|\mathbf{p} - \mathbf{p}_i\right|^{-k}, \tag{1.1}$$

де $k > 1$ – степінь вагової функції. Ваги в кожній точці додатні і менші або дорівнюють одиниці, а їхня сума тотожно дорівнює одиниці. Найбільш уживаним є випадок $k = 2$, в іноземній літературі його прийнято називати методом обернених зважених відстаней (IDW – Inverse Distance Weighted). Завдяки своїй простоті цей метод реалізовано практично в усіх ГІС та спеціалізованих програмах по моделюванню.

Недоліками методу у формі (1.1) є його глобальність (функція залежить від значень у всіх опорних точках) і рівність нулю частинних похідних модельної функції в опорних точках (у цих точках функція має локальні максимуми і мінімуми). Це означає, з одного боку, низьку обчислювальну ефективність, а з іншого боку, нездатність методу до адекватного відображення похідних характеристик модельованої поверхні, зокрема, градієнта. До переваг методу можна віднести те, що значення модельної функції не виходять за межі значень в опорних точках. Для деяких геополів така властивість може бути вирішальною при виборі методу моделювання, зокрема, при створенні карт рівня радіаційного забруднення територій по точкових вимірах.

ВДТЗ

Метод також легко може бути узагальнений на випадок багатьох змінних. Через властиві методу недоліки він зовсім не годиться для моделювання рельєфу, за винятком випадку, коли при великій кількості опорних точок побудована ЦМР використовується для обчислення інтегральних показників, наприклад, при оцінці об'ємів видобутку у відкритих кар'єрах. Диференціальні ж характеристики модельної поверхні незадовільні.

Шепардом [60] були запропоновані способи усунення цих недоліків. Для локалізації методу пропонувалося використовувати вагові функції з компактним носієм, а для інтерполяції похідних використовувати у формулі (1.1) не значення в опорних точках, а лінійні функції, локалізовані в цих точках, приймають ті ж значення і апроксимують градієнт. Там же був запропонований і спосіб обчислення коефіцієнтів таких функцій, і спосіб організації даних для швидкого пошуку найближчих точок. Така модифікація середньозваженої інтерполяції одержала надалі назву *методу Шепарда*, вийшло досить багато робіт, зокрема [37, 46], присвячених подальшому вдосконаленню цього підходу, серед яких можна виділити [58, 56, 57]. Узагальнюючи всі запропоновані варіанти, модельну функцію в методі Шепарда можна представити у вигляді

$$f(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(\mathbf{p}) \cdot Q_i(\mathbf{p})}{\sum_{i=1}^{n} w_i(\mathbf{p})}, \qquad (1.2)$$

де $Q_i(\mathbf{p})$ – функції, локалізовані в i-й опорній точці (це можуть бути алгебраїчні поліноми степеня від 1 до 3, тригонометричні поліноми першого або другого степеня, або деякі інші функції). Вагові функції з компактним носієм можуть мати вигляд, наприклад, наступний:

$$w_i(\mathbf{p}) = \left[\frac{(R_i - r_i)_+}{R_i r_i} \right]^2 \qquad r_i = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_i|, \quad (R_i - r_i)_+ = \begin{cases} R_i - r_i & \text{якщо } r_i < R_i \\ 0 & \text{якщо } r_i \geq R_i \end{cases} \qquad (1.3)$$

ВПЗ

що випливає: де R_i – радіус впливу *i*-ої опорної точки.

У багатьох програмах локалізація методу Шепарда виконується не за допомогою вагових функцій спеціального виду (1.3), а просто шляхом відбору для формули (1.2) точок, що потрапили в коло заданого радіуса, або заданої кількості, найближчих до шуканої точки. Це приводить до формально розривної модельної функції (набір точок і значень, що беруть участь у підсумовуванні, може змінюватися при переході до сусіднього вузла сітки) і може приводити до помітних стрибків значень побудованої моделі.

Описані вище вдосконалення дозволяють істотно поліпшити якість моделювання. Незважаючи на це, метод Шепарда, як правило, програє методу радіальної інтерполяції і Крайгінгу.

Метод радіальних функцій поєднує цілу групу методів, які спочатку розвивалися самостійно і пізніше були об'єднані під однією назвою, коли було помічено, що розв’язання багатьох задач приводить до їхнього математичного формулювання в одній і тій самій формі. Модельна функція шукається у вигляді:

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i R(r_i) + P_k(\mathbf{p}), \qquad r_i = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_i|, \tag{1.4}$$

де $R(r)$ – функція однієї змінної, яка називається *радіальною*, а $P_k(\mathbf{p})$ – поліном степеня *k.* З формули (1.4) видно, що значення в шуканій точці залежить тільки від відстаней до опорних точок, але не від напрямку, у якому вони перебувають.

Умови інтерполяції $f(x_i, y_i) = z_i$ та додаткова вимога точності інтерполяційної схеми на поліномах степеня *k*, приводять до системи лінійних рівнянь для визначення коефіцієнтів λ_i та коефіцієнтів полінома $P_k(x, y)$. Для того, щоб система мала рішення, радіальні функції повинні задовольняти певним властивостям.

Для багатьох часткових випадків метод має власні назви, відзначимо

ВПЗ

найважливіші з них (радіальні функції наводяться для випадку двох змінних):

1) *Мультиквадрики*

$$R(r) = \sqrt{r^2 + h^2}\ , \quad h > 0, \quad k = 0$$

та *обернені мультиквадрики*

$$R(r) = \frac{1}{\sqrt{r^2 + h^2}}, \quad h > 0, \quad k = 0$$

запропоновані Харді в роботах [47, 48]. Метод є згладжуючим, за ступінь згладжування відповідає параметр *h.*

2) *Сплайни мінімальної кривизни*

$$R(r) = r^2 \ln(r^2), \quad k = 1$$

є розв'язком задачі мінімізації функціонала

$$J_2(f) = \int (f_x^2 + 2 f_x^2 + f_y^2)\, dx\, dy\,.$$

серед всіх досить гладких функцій, що інтерполюють значення в опорних точках. Підінтегральний вираз може служити аналогом кривизни поверхні при малих значеннях градієнта, звідси і походить назва таких сплайнів. Функціонал $J_2(f)$ може розглядатися також як величина "енергії" гнучкої пластини, закріпленої в опорних точках, тому іноді їх називають *сплайнами гнучкої пластини* (thin plate spline). Ще одна часто використовувана назва – *сплайни Дюшона*, оскільки були вперше їм розглянуті для випадку двох змінних [40]. Надалі сплайни мінімальної кривизни досліджувалися в роботах [6, 10, 38, 43, 61] та ін.

3) *Сплайни з натягом*

$$R(r) = \frac{1}{2\pi t}\left[\ln\left(\frac{rt}{2}\right) + C_E + K_0(rt)\right]$$

де $C_{\mathrm{E}} \approx 0.577215$ – константа Ейлера, $K_0(x)$ – функція Бесселя, також є розв'язком задачі мінімізації функціонала $J(f) = t\, J_1(f) + J_2(f)$, де $J_1(f) = \int (f_x^2 + f_y^2)\, dxdy$, а параметр натягу t контролює вагу перших похід-

ВГЗ

них в сумі.

4) *Регуляризовані сплайни*

$$R(r) = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{r^2}{4}\left(\ln\left(\frac{r}{2\tau}\right) + C_E - 1\right) + \tau^2 K_0\left(\frac{r}{\tau}\right) + C_E + \ln\left(\frac{r}{2\tau}\right)\right)$$

мінімізують функціонал із сумою квадратів других і третіх похідних, параметр регуляризации τ відповідає за вагу третіх похідних у цій сумі [53]. Регуляризовані сплайни і реалізовані в модулі Spatial Analyst ГИС ArcView.

5) *Регуляризовані сплайни з натягом*

$$R(r) = -\left(\ln\left(\frac{\varphi r}{2}\right) + E_1\left(\frac{\varphi r}{2}\right) + C_E\right), \quad \text{де} \quad E_1 = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t}\,dt$$

мінімізують функціонал із сумою квадратів похідних всіх порядків з деякими коефіцієнтами, що залежать від одного параметра регуляризації φ.

Всі сплайни мають інтерполяційні властивості, однак можуть використовуватися і для згладжування. Теоретично параметр згладжування може бути заданий індивідуально для кожної опорної точки, однак на практиці така можливість реалізована тільки в ГІС GRASS для регуляризованих сплайнів з натягом.

Великий вибір різних радіальних функцій і можливість додаткового настроювання за допомогою параметрів роблять даний метод найбільш потужним. Практичні експерименти показують, що для даних, отриманих фотограмметричним шляхом із близьким до рівномірного розподілом опорних точок, найкращі результати при відповідному настроюванні параметрів дають сплайни з натягом і регуляризовані сплайни. Добрі результати виходять і при невеликій кількості опорних точок. Якщо в значеннях показника присутній помітна похибка, то краще використовувати згладжуючі варіанти або мультиквадрики, відповідним чином підбираючи параметр згладжування. Єдиним недоліком методу радіальних функцій є його глобальність, тобто зміна показника в одній точці приводить до зміни функції на всій області ви-

ВГЗ

значення. Оскільки матриця системи рівнянь для визначення коефіцієнтів не є розрідженою, це приводить до обчислювальних труднощів при рішенні системи для великої кількості опорних точок (>500).

У роботах [19, 54, 43] пропонуються деякі підходи до рішення цієї проблеми – локалізації методу. Основна ідея полягає в розбитті області визначення на ділянки, що перекриваються, але не містять занадто велику кількість точок, і обчисленні сплайна на кожній окремій ділянці. Формально такий підхід приводить до розривної функції, однак на практиці в більшості випадків неперервність забезпечується за рахунок загальних точок в областях перекриття. Виключення становлять ситуації з великою нерівномірністю в розподілі опорних точок, у цих випадках можливі стрибки значень при переході від однієї ділянки до іншої. У роботі [24] запропонований спосіб усунення і цього недоліку. Сплайни на ділянках склеюються з потрібним ступенем гладкості за допомогою набору функцій так званої розбивки одиниці, пов'язаної з покриттям області визначення прямокутниками, що перекриваються.

1.3. Регулярна мережа висот та нерегулярна тріангуляційна мережа

Звичайно, первинні дані, на основі яких здійснюється цифрове моделювання, з використанням тих або інших операцій приводяться до одного із двох найбільш широко розповсюджених способів подання поверхонь (полів) в ГІС: растрового подання та моделі TIN. Виходячи з цього, історично виділилися дві альтернативні моделі ЦМР:

- засновані на чисто регулярних (матричних) поданнях поля рельєфу відмітками висот;
- структурні, однією з найбільш розвинених форм яких є моделі на основі структурно-лінгвістичного подання.

Растрова модель рельєфу передбачає розбивку простору неподільні

ВПЗ

елементи (пікселі), які утворюють матрицю висот – регулярну мережу висотних відміток. Подібні цифрові моделі рельєфу створюються національними картографічними службами багатьох країн.

Регулярна мережа висот являє собою решітку з рівними прямокутниками або квадратами, де вершини цих фігур є вузлами сітки.

Одним з перших пакетів програм, у якому була реалізована можливість множинного введення різних шарів растрових комірок, був пакет GRID (від англ. *гратка*, *сітка*, *мережа*), створений наприкінці 1960-х рр. у Гарвардській лабораторії машинної графіки і просторового аналізу (США) [45]. У сучасному широко розповсюдженому пакеті ArcGIS (ESRI Inc.) растрова модель просторових даних також зветься GRID. В іншій популярній програмі для розрахунку ЦМР – Surfer (Golden Software Inc.) регулярна мережа висот також іменується GRID, файли ЦМР мають формат GRD, а розрахунок подібної моделі називається *gridding*.

При створенні регулярної мережі висот (GRID) дуже важливо враховувати густину (крок) сітки, що визначає її просторову роздільну здатність. Чим менше обраний крок, тим точніше ЦМР, але тем більша кількість вузлів сітки, отже, більше часу потрібно на розрахунок ЦМР і більше місця на диску. Наприклад, при зменшенні кроку сітки в 2 рази об'єм комп'ютерної пам'яті, необхідної для зберігання моделі, зростає в 4 рази. Звідси випливає, що треба знайти баланс. Наприклад, стандарт на ЦМР Геологічної зйомки США, розроблений для Національного цифрового картографічного банку даних, визначає цифрову модель рельєфу як регулярний масив висотних відміток у вузлах решітки 30×30 м для карти масштабу 1:24 000.

Шляхом інтерполяції, апроксимації, згладжування та інших трансформацій до растрової моделі можуть бути приведені ЦМР всіх інших типів. Для відновлення поля висот у будь-якій його точці (наприклад, у вузлі регулярної мережі) по заданій множині висотних відміток (наприклад, по цифрових записах горизонталей) звичайно застосовуються різноманітні методи інтерпо-

ВЦЗ

ляції.

Серед нерегулярних сіток найчастіше використовується трикутна мережа неправильної форми – модель TIN (Triangulated Irregular Network). Вона була розроблена на початку 1970-х рр. як простий спосіб побудови поверхонь на основі набору нерівномірно розташованих точок. В 1970-ті рр. було створено кілька варіантів даної системи, комерційні системи на базі TIN стали з'являтися в 1980-ті рр. як пакети програм для побудови горизонталей. Модель TIN використовується для цифрового моделювання рельєфу, при цьому вузлам і ребрам трикутної мережі відповідають вихідні і похідні атрибути цифрової моделі. При побудові TIN-моделі дискретно розташовані точки з'єднуються лініями, що утворюють трикутники (див. рис. 1.3 та рис. 1.4).

У межах кожного трикутника моделі TIN поверхня звичайно представляється площиною. Оскільки поверхня кожного трикутника задається висотами трьох його вершин, застосування трикутників забезпечує кожній ділянці мозаїчної поверхні точне прилягання до суміжних ділянок. Це забезпечує неперервність поверхні при нерегулярному розташуванні точок. При цьому кожний трикутник моделі окрім інформації про висоту має атрибути кута нахилу та експозиції, що дозволяє швидко побудувати на базі однієї моделі TIN кілька тематичних карт – гіпсометричну, ухилів, експозицій – і дає можливість зробити різні види складного просторового аналізу, наприклад розрахунок шляхів геохімічних міграцій на основі поверхневого стоку.

Основним методом розрахунку TIN є тріангуляція Делоне, тому що в порівнянні з іншими методами вона має найбільш підходящі для цифрової моделі рельєфу властивості: має найменший індекс гармонійності як суму індексів гармонійності кожного з утворюючих трикутників (близькість до рівнокутної тріангуляції), властивості максимальності мінімального кута (найбільшої невиродженості трикутників) і мінімальності площі утвореної багатогранної поверхні.

ВІЗ



Рис**. 1.3.** Тривимірна модель поверхні, побудована на основі нерегулярної тріангуляційної мережі

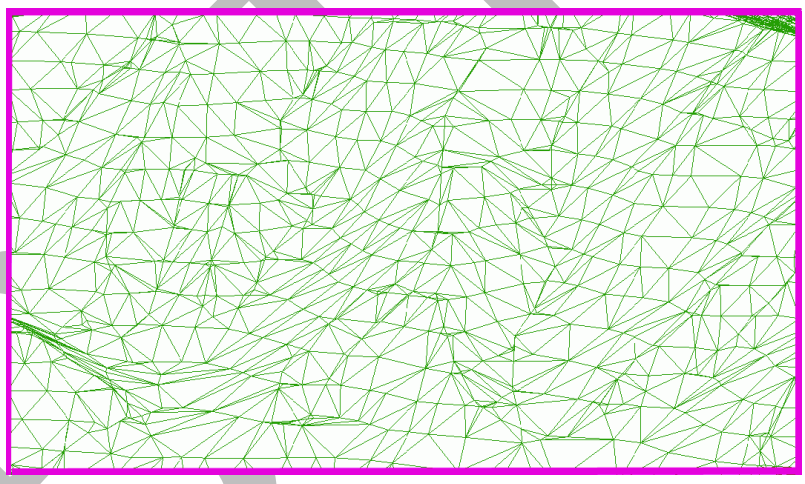


Рис**. 1.4.** Збільшений фрагмент моделі рельєфа на рис**. .3**, який показує трикутну структуру моделі TIN

Як переваги моделі GRID слід зазначити простоту та швидкість її комп'ютерної обробки, що пов'язане із самою растровою природою моделі. Пристрої виведення, такі як монітори, принтери, плотери та ін., для створення зображень використовують набори точок, тобто також мають растровий формат. Тому зображення GRID легко і швидко виводяться на такі пристрої, тому що на комп'ютерах легко виконати розрахунок для подання окремих

квадратів регулярної мережі висот за допомогою точок або відеопікселів пристроїв виведення.

Завдяки своїй растровій структурі модель GRID дозволяє «згладити» модельовану поверхню та уникнути різких граней і виступів. Але в цьому криється і недолік моделі, тому що при моделюванні рельєфу гірських районів з достатком крутих схилів і гострих вершин можливі втрата та «розмивання» структурних ліній рельєфу та спотворення загальної картини. У подібних випадках необхідне збільшення просторового розрізнення у моделі (кроку сітки висот), а це викликає різке зростання об’єму комп’ютерної пам’яті, необхідної для зберігання ЦМР. Взагалі, як правило, моделі GRID займають більше місця на диску, чим моделі TIN. Щоб прискорити відображення більших по об'єму цифрових моделей рельєфу застосовуються різні методи, з яких найбільш популярним є побудова так званих пірамідальних шарів, що дозволяють при різних масштабах використовувати різні рівні деталізації зображення. Подібний підхід, зокрема, реалізований у новому форматі Terrain програмного комплексу ArcGIS 9 (ESRI Inc.).

Таким чином, модель GRID ідеально підходить для відображення географічних (геологічних) об'єктів або явищ, характеристики яких плавно змінюються в просторі (рельєф рівнинних територій, температура повітря, атмосферний тиск, пластовий тиск нафти і т.п.).

Як було відзначено вище, недоліки моделі GRID проявляються при моделюванні рельєфу молодих горотворень. Особливо неблагополучна ситуація з використанням регулярної мережі висотних відміток складається, якщо на модельованій території чергуються великі вирівняні ділянки з ділянками уступів і обривів, що мають різкі перепади висот, як, наприклад, у широких розроблених долинах великих рівнинних рік. У такому випадку на більшій частині модельованої території буде «надмірність» інформації, тому що вузли сітки GRID на плоских ділянках будуть мати ті самі висотні значення. Але на ділянках крутих уступів рельєфу розмір кроку сітки висот може виявитися

ВНТУ

занадто великим, а, відповідно, просторове розрізнення моделі – недостатнім для передачі рельєфу.

Подібних недоліків позбавлена модель TIN. Оскільки використовується нерегулярна мережа трикутників, то плоскі ділянки моделюються невеликим числом величезних трикутників, а на ділянках крутих уступів, там, де необхідно детально показати всієї грані рельєфу, поверхня відображається численними маленькими трикутниками. Це дозволяє більш ефективно використовувати ресурси оперативної та постійної пам'яті комп'ютера для зберігання моделі.

До числа недоліків TIN варто віднести більші витрати комп'ютерних ресурсів на обробку моделі, що істотно сповільнює відображення ЦМР на екрані монітора та виведення на друк, тому що при цьому потрібна растеризація. Одним з рішень цієї проблеми може бути введення «гібридних» моделей, що сполучають структурні лінії TIN та спосіб відображення у вигляді регулярного набору точок. Як приклад подібних моделей можна вказати формат Terrain ArcGIS 9.

Ще один істотний недолік моделі TIN – «ефект терас», що виражається в появі так званих «псевдотрикутників» – плоских ділянок у явно неможливій геоморфологічній ситуації (наприклад, по лінії днища V-образних долин). Одна з основних причин цього явища – малість відстаней між точками цифрового запису горизонталей у порівнянні з відстанями між самими горизонталями, що характерно для більшості типів рельєфу в їхньому картографічному відображенні. «Псевдотрикутники» виникають там, де всі три вершини трикутника лежать на одній горизонталі. Поява таких морфологічних артефактів порушує морфографію та морфометрію модельованого рельєфу та знижує точність і якість самої моделі і її похідних. Один зі способів значного поліпшення якості та морфологічної правдоподібності ЦМР полягає у розширенні моделі TIN шляхом її структурування – введення до неї мережі тальвегів, вододілів і ліній перегинів і розривів.

ВІГЗ

Розділ **2. ГЕОДЕЗИЧНІ МЕТОДИ** ЗБОРУ ПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ

2.1. Застосування повітряної лазерної локації для вивчення рельєфу

Лазерне сканування в останні десятиліття активно застосовується в різних галузях: моніторингу земної поверхні, просторового моделювання територій, інвентаризації доріг, ліній електропередач, лісових масивів, створення кадастрових планів. Лазерне сканування застосовують з метою побудови цифрових моделей рельєфу, створення ортофотозображень та мозаїк, картографування коридорів для комунікацій. Перевагами цієї методики є продуктивність та точність, а також можливість створення ЦМР для важкодоступних територій, причому за наявності рослинності та за несприятливих погодних умов.

Методика грунтується на лазерному вимірюванні відстані від приладу, встановленого на літаку або гелікоптері, до точки місцевості. Принциповим в отриманні зображень лазерними знімальними системами є підсвічування місцевості променем напівпровідникового лазера, тобто системи є активними. Лазер працює в імпульсному режимі, він випромінює короткі імпульси, напрям поширення яких регулює оптична система, зокрема сканувальний елемент, який входить до її складу. Режим сканування вибирають так, щоб охопити всю смугу сканування. Імпульси поширюються прямолінійно до поверхні Землі. Стикаючись з поверхнею Землі або наземними об'єктами, імпульс відбивається. Це відбиття, як правило, є дифузним, тобто у бік локатора повертається тільки частина енергії. Ці відбиті імпульси реєструє приймач, а часовий проміжок між посиланням імпульсів і їх прийманням реєструє високоточний пристрій. На підставі виміряної відстані визначають координати точки місцевості у вибраній системі координат.

На борту літака встановлюють потужний лазерний сканер – лідар (від

ВПЗ

англ. Light Detection and Ranging – оптична реєстрація і вимірювання), інерційну вимірювальну навігаційну систему (ІНС), систему глобального позиціонування GPS, бортовий комп'ютер і відеокамеру, блок сканування, блок реєстрації даних. Апаратура лазерного локатора складається з лазерної знімальної системи, у функцію якої входять генерація лазерних імпульсів, приймання відбитого сигналу і визначення нахиленої дальності до точки відбиття, а також керування розгорткою; бортового навігаційного комплексу, функцією якого є визначення елементів зовнішнього орієнтування для кожного лазерно-локаційного вимірювання. На землі повинна бути встановлена наземна GPS та робоча станція для опрацювання даних, одержаних у польоті. Найчастіше в практиці використовують лазерний віддалемір, що працює в інфрачервоному діапазоні і висилає імпульси з частотою кілька тисяч герц на секунду. Блок сканування відхиляє промені перпендикулярно до лінії польоту, а за рахунок переміщення літака отримують сукупність смуг знімання. Точність вимірювання відстані становить близько декількох сантиметрів. Синхронно з лазерним сканером працює відеокамера, оптична вісь якої скерована вздовж надирного променя; вона знімає всю смугу сканування. Часом встановлюють ще одну камеру, скеровану під кутом 45° вперед, за допомогою якої отримують перспективні зображення земної поверхні, що дає змогу одержати стереомодель місцевості. На борту літака лазерну систему встановлюють так, щоб вісь розгортального пристрою збігалась з напрямком польоту. Розгортка променя лазера вздовж рядка здійснюється поворотом сканувального пристрою, найчастіше дзеркала, розгортка по кадру – за рахунок руху літака. Промінь від лазера скеровується розгортальним пристроєм на місцевість; відбитий промінь за допомогою оптичної системи передається у приймач випромінювання, де перетворюється на електричний сигнал. Рух променя по поверхні землі формує електричні сигнали, пропорційні до спектральних коефіцієнтів яскравості об'єктів. Сигнал записується у цифровому вигляді. Прямолінійність поширення лазерного променя і значення швидкос-

ВПЗ

ті поширення електромагнітних коливань дає змогу визначити дальність від джерела випромінювання до об'єкта. Зауважимо, що в кожному сеансі вимірювання можуть реєструватися відбиті сигнали від декількох елементів поверхні (наприклад, земля і рослинність).

Найголовніші переваги методу такі:

- для сканування не є перешкодою рослинність;
- оскільки лазер є активним джерелом випромінювання, то результат мало залежить від натуральної освітленості поверхні та від погоди; висока точність побудови ЦМР;
- час отримання ЦМР становить 2–3 дні після польоту;
- кошти на створення ЦМР менші, ніж за використання інших методів, зокрема традиційного фотограмметричного;
- можливість одержати з результату сканування просторову модель об'єктів.

Для того, щоб створити цифрову модель рельєфу земної поверхні, тобто визначити координати точки відбиття сигналу, в геоцентричній системі координат необхідно визначити траєкторію руху носія і кути кути орієнтування сенсора (лазера): крену, тангажу, рискання. Ці визначення здійснюються за допомогою встановленого на борту носія GPS приймача та інерційної системи. Щоб знайти координати точки відбиття, під час сканування визначають аргумент сканування – кут відхилення напрямку лазерного променя від вертикалі в системі сканерного блока. Значення нахиленої дальності разом з елементами зовнішнього орієнтування лазерного локатора дають змогу визначити координати точки моделі місцевості, що є основним результатом лазерного сканування.

Дані бортового GPS приймача уточнюють за допомогою мережі наземних базових GPS станцій. Кутові параметри орієнтації літального носія у сучасних умовах визначають на основі сумісного аналізу GPS та інерційних даних, враховуючи вищу точність визначення лінійних елементів за допомо-

ВГЗ

гою GPS. На точність визначення координат точок лазерної локації впливають: механічна розгортка, кут лазерного променя, дальність до точки визначення, спектральний інтервал лазерного випромінювання.

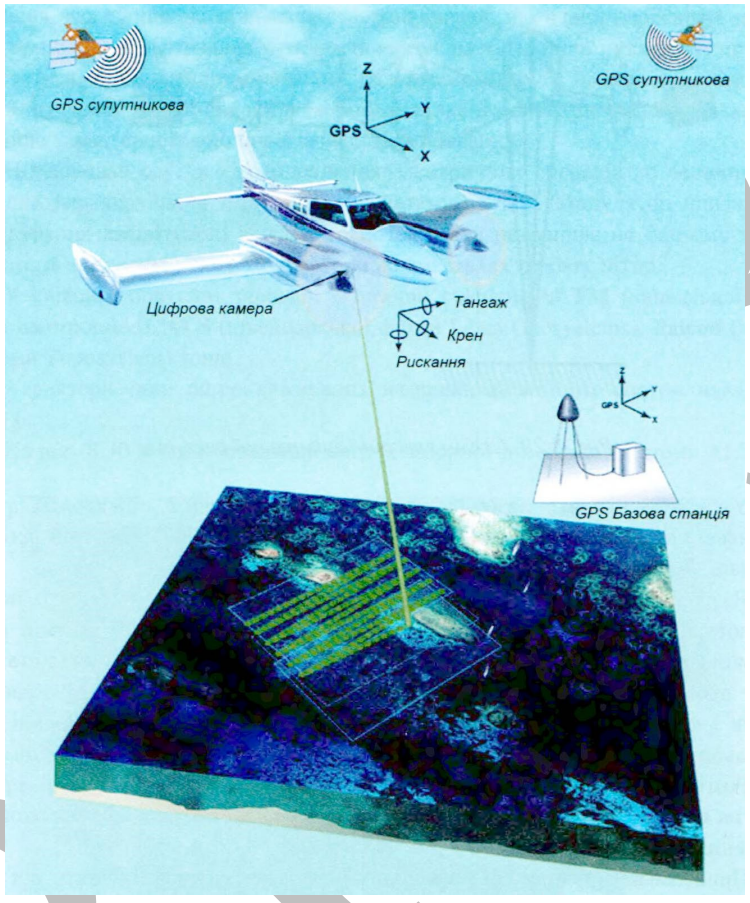


Рис. **2.1.** Принцип лазерного сканування [5]

Лазерні знімальні системи працюють у видимому, найчастіше в інфрачервоному діапазоні, переважно їх встановлюють на літаках. Лазер підсвічування, призначений для підсвічування місцевості, повинен мати потужність, яка б забезпечувала отримання відбитого від об'єкта потоку випромінювання. Довжина хвилі випромінювання лазера повинна збігатись з вікном прозорості атмосфери і міститись у ділянці максимальної контрастності об'єктів і фону. Промінь лазера повинен утворювати на земній поверхні пляму мінімальних розмірів, що визначає розрізнювальну здатність лазерної системи.

У світовій практиці знаними є лазерні сканери ALTM (канадської фір-

ми Optech Incorporated), ALS (швейцарської фірми Leica Geosystems), Falcon (німецької фірми Toposystem) тощо (таблиця 2.1).

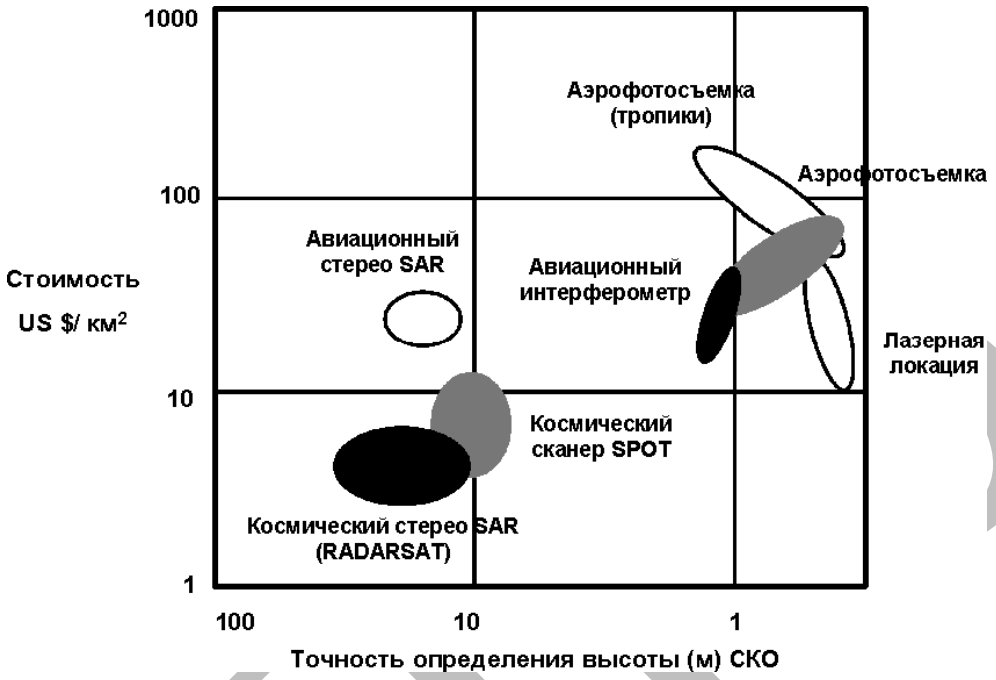


Рис**. 2.2.** Вартість топографічного картографування з використанням різних засобів авіаційного та космічного дистанційного зондування [17]

Системи дають змогу отримувати відстань до об'єкта з сантиметровою точністю. Висота польоту сканерів ALTM3100 і ALTM3100EA сягає від 80 до 3500 м; системи ALTM Gemini – 150–4000 м. Точність сканування по висоті для сканерів: ALTM 3100 – менше за 15 см для висоти 1200 м, менше за 35 см – для висоти 3000 м; ALTM 3100 EA – менше за 15 см для висоти 500 м, менше за 20 см для висоти 3000 м; ALTM Gemini – 5–30 см на різних висотах знімання.

Будь-який об'єкт на земній поверхні має власну відбивну здатність, залежно від якої і одержуємо різні інтенсивності відбитого сигналу. Кольорова класифікація дає змогу візуально розрізнити об'єкти з різною відбивною здатністю і відповідно їх розпізнати та векторизувати. Виділяючи ті або інші класи ТЛВ (точок лазерного віддзеркалення), можна отримати зображення

інтенсивності різних поверхонь: землі, рослинності, дорожньої мережі, ліній електропередач тощо.

Таблиця 2.1

Основні характеристики лазерних знімальних систем **[5]**

Виробник	Leica Geosystems	Mosaic Mapping Systems Inc.	Optech Incorporated	Riegl LMS GmbH	Riegl LMS GmbH	Terra Point USA, Inc.	TopEye	TopEye	TopoSys GmbH
Назва	ALS-50 Airborne Laser Scanner	ALMIS 350	ALTM 3100	LMS-Q140i	LMS-Q280i	ALTMS 4036	TopEye MK 1	TopEye MK II	Falcon
Метод сканування	Осцилю-вальне дзеркало	Коливне дзеркало	Осцилювальне дзеркало	Коливне дзеркало	Коливне дзеркало	Коливне дзеркало	Подвійна система дзеркал	Коливне дзеркало	Волоконно-оптичний метод
Частота сканування (min-max), кГц	83	30	33-100	30	24	0,40	7	100	83
Робоча довжина хвилі, мкм	1,064	0,9	1,064	Близька інфр.	Близька інфр.	1,064	1,064	1,064	1,56
Довжина імпульсу, нс	12	15	7	–	–	10	6-8	4	5
Розбіжність променя, мілірад.	0,33	3	0,3 або 0,7	3	0,5	0,75	1, 2, 4 або 8	1	1
Максимальний кут сканування, град.	75	60	50	40	22,5	36	20	20	7,2
Максимальна кількість відгуків	3	1	4	перший або останній	перший або останній	4	4	3	9
Точність визначення дальності, см	1,5	2,5	1,0	2,5	2,0	0,75	2,0	2,0	1,4
Точність визначення висот, см	15	4	15-35	–	–	15	10	10	10

ВЛЗ

Під час побудови растрового зображення вибирають алгоритм сканування поверхні за мінімальними, максимальними або усередненими значеннями інтенсивності. Створені за тими самими точками із однаковою шкалою растрові зображення розрізняються за тоном, що підкреслює межі тих чи інших об'єктів. Під час вибору алгоритму сканування поверхні за максимальними значеннями інтенсивності контрастніше виділяється, наприклад, межа об'єктів гідрографії. Використання геоповерхонь інтенсивності віддзеркалення дає змогу прискорити та уточнити процес розпізнавання об'єктів місцевості, оскільки окремі природні об'єкти краще визначаються саме за растрами геоповерхонь. Для місцевості з густим рослинним покривом, наприклад, лісом, виділення малих об'єктів гідрографії є складним через перекривання кронами дерев берегової лінії водоймищ. Під час використання як растрової основи геоповерхні інтенсивності ця проблема усувається. Виділення поверхні справжнього рельєфу з використанням алгоритмічних процедур дозволяє впевнено відновити форму рельєфу навіть під густими кронами дерев (рис. 2.3). Значні успіхи досягнуті в останні роки як у підвищенні точності лазерно-локаційного методу в цілому, так і в підвищенні вірогідності і загальної інформативності вихідних топографічних матеріалів. Так в 2006 році компанія Optech – світовий лідер в області виробництва авіаційних лідарів, запропонувала нові моделі ALTM 3100EA і ALTM Gemini, що забезпечують точності вимірювання похилої дальності на рівні 3–5 см. Разом з тим, сучасні алгоритми виділення поверхні істиної землі та інших найважливіших топографічних і структурних поверхонь і контурів дозволяють домогтися точності геопозиціонування цих поверхонь і контурів на рівні перших сантиметрів при забезпеченні достатньої щільності сканування.

ВНТУ

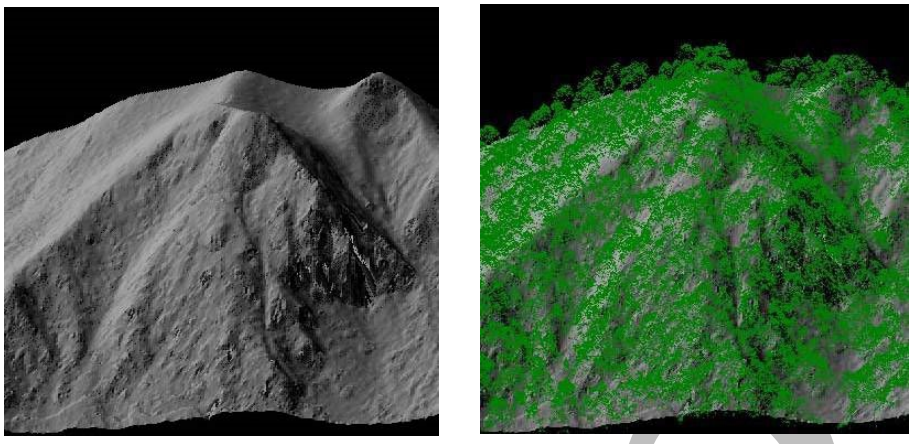


Рис. **2.3.** Виділення рельєфу під кронами дерев по лазерно-локаційним даним

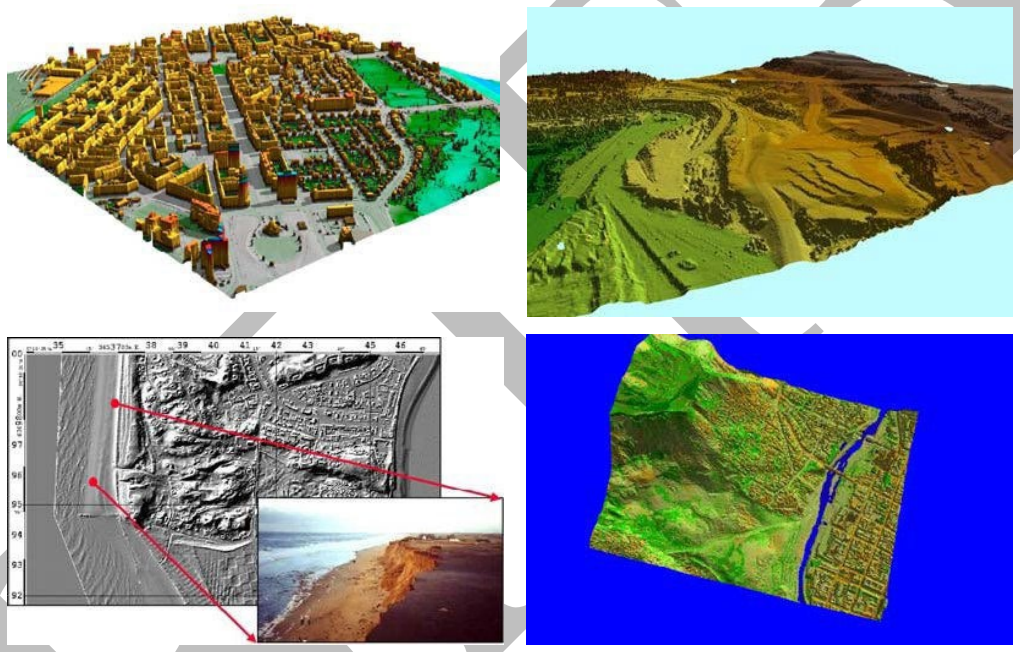


Рис. **2.4.** Варіанти візуалізації цифрових моделей рельєфу та різних об’єктів по лазерно-локаційним даним [17]

Точки лазерного віддзеркалення (ТЛВ) містять інформацію про планове положення, висоту, інтенсивність віддзеркалення від об'єктів місцевості, час знімання та деякі інші характеристики.

За допомогою програмних засобів (Autodesk Civil 3D) обробки даних лазерної локації створюються просторово визначені зображення поверхні з класифікацією точок за допомогою забарвлення. Вони конвертуються у растровий формат і використовуються під час створення топографічних планів і карт, дають інформацію, подібно як ортофотоплани.

2.2. Побудова ЦМР на основі даних радіолокаційного знімання

Радіолокаційне знімання – це виявлення об'єктів, яке здійснюється за рахунок опромінення поверхні електромагнітними хвилями і одержання відбитих імпульсів. На борті носія – літака або супутника – встановлюється радіолокатор – активний давач, здатний передавати і приймати поляризаційні радіохвилі в заданому діапазоні частот електромагнітного спектра (сантиметрові довжини хвиль). Залежно від радіохвиль, існують такі діапазони зняття (таблиця 2.2): L-діапазон характеризується великою довжиною хвилі та істотною глибиною проникнення крізь підстилаючу поверхню, але порівняно невисоким просторовим розрізненням; X-діапазон має невисоку проникаючу здатність, однак знімки мають високе розрізнення; C-діапазон являє собою компроміс між короткими і довгими хвилями, дозволяє вирішувати широкий спектр завдань.

Радіолокаційні системи – це сканувальні пристрої, в яких сканування відбувається по один бік від носія перпендикулярно до лінії польоту. У практиці не використовують суто вертикального напрямку через накладання хвиль; кути сканування становлять від 15°–20° до 75°–80°. Пульсація радіохвильової енергії опромінює місцевість з часовими відрізками, меншими за мікросекунду.

Розгортка сигналу виконується за принципом сканера, тобто перехід від одного рядка до іншого йде за рахунок переміщення носія. Кількість енергії, повернутої на антену локатора, називається “зворотним розсіюванням”. Кожний піксель радіолокаційного знімка потужність сигналу, що повернувся до антени. Відстань до цілі (range) визначається часом проходження хвилі до об'єкта і назад. Суцільне радіолокаційне зображення будується як панорама елементів радіояскравості по рядках.

Про властивості об'єктів судять по потужності і структурі відбитого сигналу. Об’єкти частково поглинають, частково пропускають, частково відбивають і розсіюють падаючі на них радіохвилі у співвідношеннях,

ВІЗ

обумовлених діелектричними властивостями матеріалів самих об'єктів. На знімках об’єкти, що мають світлі тони, мають більший коефіцієнт ефективного поверхневого розсіювання, чим об'єкти з темним фототоном.

Слід зазначити недолік радіолокаційних зйомок – більш низьку метричну точність у порівнянні з аерофотозніманням. Іншим недоліком є залежність від відбивних властивостей поверхні (наприклад, вологості). При поступовій зміні цих властивостей радіолокаційні знімки однієї і тієї ж поверхні, зроблені протягом різних періодів спостережень, можуть істотно відрізнятися, мають деякі складності при обробці через геометричні спотворення; певні складнощі можуть виникнути при дешифруванні знімків; обсяг пам'яті, займаний такими даними, як правило, більший, ніж у даних інших типів [1].

Важливим фізичним параметром радарного знімання є поляризація. Поляризація – це переданий і одержуваний сигнал, що поширюється в певній площині. При лінійній поляризації площини можуть розташовуватися горизонтально (H) і вертикально (V). Вертикально поляризована хвиля буде взаємодіяти з вертикальними стеблами шару рослин, горизонтально поляризована – проникати крізь шар. Комбінування різних видів поляризації може поліпшувати детальність класифікації, наприклад, дозволяти визначати різні класи рослинності.

Дуже важливо правильно підібрати вид поляризації для кожного конкретного проекту, щоб поліпшити характеристики результуючого продукту. В радіолокаційних системах застосовується геометрія бічного знімання, на відміну від оптичних систем, що формують знімки центральної проекції. При бічному зніманні відстані до цілі визначають просторове положення відповідно до вимірюваної різниці часу проходження сигналу. Тому послідовність одержання пікселів може бути порушена в районах із сильно вираженим рельєфом або в умовах міської забудови. Бічне розрізнення залежить тільки від ширини частотного діапазону (150 і 300 Мгц) та кута падіння променя. Просторове розрізнення поліпшується зі збільшенням кута падіння променя. При

ВПЗ

азимутальному зніманні сигнали, що мають однаковий час проходження, розташовані в правильній послідовності у відповідності зі зміщенням їхньої частоти, обумовленим ефектом Доплера. Просторове розрізнення регулюється за рахунок зміни апертури. Азимутальне розрізнення стале вздовж маршруту і залежить від режиму знімання, розміру антени і частоти повторення імпульсів. Дані одиночного нахиленого знімання мають більш високе розрізнення.

Таблиця 2.2

Параметри радіохвильового діапазону руху

Діапазон	Довжина хвилі, см	Частота, Гц
Ka	0,8–1,1	40,0–26,0
K	1,1–1,7	26,5–18,5
Ku	1,7–2,4	18,5–12,5
X	2,4–3,8	12,5–0,8
C	3,8–7,5	8,0–4,0
S	7,5–15,0	4,0–2,0
L	15,0–30,0	2,0–1,0
P	30,0–100,0	1,0–0,3

Принцип дії радіовисотоміра грунтується на визначенні часу проходження радіосигналу від передавальної антени до відбиваючої поверхні і назад до приймальної антени [12]. Висоту і час затримки сигналу визначають за формулою

$$h = \frac{t \cdot c}{2} \tag{2.1}$$

де h – висота; t – час затримки; c – швидкість поширення радіохвиль (дорівнює швидкості світла). Висоту земної або морської поверхні вимірюють від земного референц-еліпсоїда.

За типом використовуваного радіовипромінювання та методом його обробки радіовисотоміри поділяють на дві групи:

– із *частотною модуляцією* (ЧМ) мають діапазон вимірювань до кіль-

ВПІ

кох сотень метрів (зазвичай до 1500 м), їх використовують переважно під час заходу літака на посадку;

– з *імпульсною модуляцією* (ІМ) призначені для вимірювання великих висот, їх застосовують переважно у військовій авіації, космонавтиці, під час аерофотознімання тощо.

Сучасні супутникові радіовисотоміри мають точність оцінки висоти 2–5 см. Проте досягнення таких показників – завдання дуже складне, оскільки на результат його розв'язання впливає багато факторів, таких як величина нерівностей мікрорельєфу зондованої поверхні, радіус просторової кореляції висот нерівностей, швидкість польоту носія, кутова ширина двонапрамленої антени та індикатриси розсіювання поверхні, спосіб обробки ехо-сигналу в радіовисотомірі тощо.

Визначення висоти залежить від конкретних умов вимірювання. Висоту польоту літального апарата визначають як просту змінну середню для значень локальних висот, вимірюваних радіовисотоміром. Кількісна невизначеність висоти може бути оцінена як величина дисперсії висот нерівностей, поділена на число незалежних відліків висоти за час вимірювання.

Метод гіпотетичної альтиметрії, за яким вимірювання локальних висот здійснюють у певній умовній системі координат, пов'язаної з носієм, забезпечує абсолютно точне вимірювання. При цьому висоту і похибку вимірювання визначають за законом розподілу висот нерівностей, розміром ділянки вимірювань і часовим інтервалом кореляції локальних висот поверхні під час її коливання, що дає змогу розрахувати невизначеність і точність.

Радіолокаційне знімання застосовують під час досліджень поверхні з 70-х років XX ст. Воно істотно відрізняється від аерофотографічного і сканерного як технікою знімання, так і геометричними та інформаційними особливостями отримуваних зображень. Давачі аерофотографічного і сканерного знімання пасивно сприймають відбите від земної поверхні сонячне або її власне теплове випромінювання. В радіолокаційних станціях бічного огляду

ВПЗ

використовують знімання в активному режимі. Ці системи «опромінюють» територію, яку знімають, самі. Під час польоту носія антена, встановлена вздовж поздовжньої осі тримальної платформи, посилає в перпендикулярному до польоту напрямку на земну поверхню високочастотні імпульси. Діаграма випромінювання цих імпульсів має форму вузької пелюстки. Сигнали, відбиті від опромінюваної земної поверхні або об'єктів на ній, приймаються антеною, перетворюються на відеосигнали і записуються на носій. Інтенсивність відбитого від поверхні або предметів сигналу передається на радіолокаційному знімку градаціями фототону і фоторисунком зображення. Для тематичної інтерпретації знімків важливі зміни інтенсивності і характеру радіолуни. Ці зміни залежать від структури поверхні та речовинного складу природних об'єктів (ґрунтів, рослин, гірських порід, води). Встановлено, що характер взаємодії зондувального електромагнітного випромінювання з поверхнею і природними об'єктами визначається довжиною хвилі, її поляризацією і кутом падіння. Це має враховувати інтерпретатор під час тематичного аналізу знімків.

У дистанційному зондуванні застосовують два типи радіолокаційних систем: знімальні радіолокаційні системи з реальною апертурою антени і знімальні радіолокаційні системи із синтезованою апертурою антени (РСА) [12]. РСА формує зображення, зондуючи поверхню Землі когерентними надвисокочастотними радіосигналами та приймаючи відбите випромінювання послідовно, за траєкторією польоту носія. За допомогою когерентного підсумовування сигналів досягається штучне збільшення розміру віртуальної (синтезованої) апертури антени та звуження її діаграми спрямованості. Такий спосіб побудови зображення дає змогу істотно збільшити розрізнювальну здатність одержуваних зображень: до десятків і навіть до одиниць метрів на поверхні Землі. Крім того, за радіолокаційними зображеннями можна виявляти рухомі об'єкти, одержати інформацію про рельєф зондованої місцевості, а також про певні її фізичні властивості, такі як електропровідність, вологість

ВПЗ

тощо. Радіолокаційні системи з реальною апертурою відносно прості. Вони не потребують складної обробки даних під час побудови зображення. Застосування їх обмежується відносно невисоким просторовим розрізненням. Системи із синтезованою апертурою дають змогу отримати високе просторове розрізнення незалежно від відстані між антеною та об'єктом. Проте отримання та обробка цих даних складна.

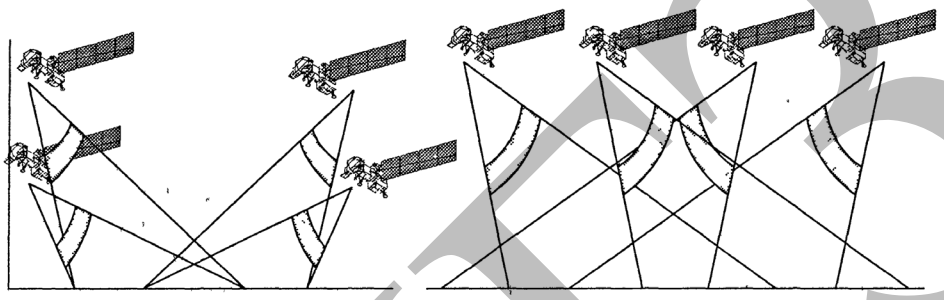


Рис**. 2.5.** Можливості радіолокаційного стереознімання (напрями знімання взаємно протилежні) [12]

Робота радіолокаційних знімальних станцій не залежить від умов природної освітленості, а при довжині хвилі понад 2 см радіолокаційне знімання не залежить від погодних умов, що дає переваги над фотографічним і сканерним зніманням. Радіолокаційне знімання є вирішальним методом вивчення і картування земної поверхні в тих районах, які значну частину року покриті димкою або хмарами. Радіолокаційні знімки та фотосхеми (мозаїчні дрібномасштабні зображення, змонтовані з окремих смуг) добре передають особливості рельєфу. Для того щоб отримати стереоскопічне зображення рельєфу за двома радіолокаційними знімками, потрібне їх взаємне просторове перекриття. Крім того, мають бути прирівняні якість, освітлення об'єктів, фотофон і структура обох зображень. У цих аспектах якість стереопар визначають за такими основними параметрами: кутом візування, кутом розкриття радіопроменя і типом території.

Необхідне для стереоінтерпретації перекриття РЛ-знімків однієї ділянки може бути досягнуте різними способами (рис. 2.5). Знімання поверхні з

ВГО

протилежних позицій створює труднощі під час інтерпретації насамперед гірських районів, оскільки одна і та сама ділянка під час знімання опромінюється в протилежних напрямках. Схили, затінені на одному знімку, будуть освітленими на іншому. Ці різні умови освітлення ускладнюють отримання стереозображення ділянки, яка цікавить інтерпретатора.

Для інтерпретації набагато краще, коли обидва РЛ-знімки, що перекриваються, отримані за однакового напрямку спостереження (опромінювання), з двох паралельних польотів або з різних висот. У такому разі орієнтування тіней на обох знімках однакове. Є також позитивні приклади отримання придатних для стереовивчення знімків із польотів, орієнтованих під кутом один до одного. Радіолокація із синтезованою апертурою фіксує амплітуду і фазу відбитого сигналу. Одне зображення, отримане за допомогою РСА, в більшості випадків не має практичного значення, тоді як два знімки РСА (інтерференційна пара), отримані під різними кутами, можуть бути використані для отримання цифрової моделі рельєфу, яка може дати інформацію про зміни ландшафту і поліпшити.

Інтерферометричні РСА (InSAR) використовують різницеву фазову складову двох чи більше відбитих від земної поверхні когерентних радіолокаційних сигналів для отримання прецизійної інформації про рельєф місцевості та малі зсуви об'єктів на ній [5].

Інтерферометрична методика ґрунтується на використанні пари РСА зображень. Розрізняють однопрохідну інтерферометрію**,** якщо одна антена, яка працює на передавання і приймання сигналу, встановлена на борту носія, а другу тільки для приймання встановлено на кінці довгої щогли. Відстань між антенами постійна, тому відбувається одночасне знімання двох зображень.

РСА середньої розрізненості (гірше за 10 м на місцевості) практично непридатні для топографічного картування, оскільки не забезпечують необхідних інформаційних вимог. Однак у результаті виконання проекту SRTM

ВПЗ

(Shuttle Radar Topographic Mission) в 2000–2002 рр. отримано високоточну цифрову модель рельєфу з детальністю 30 м практично всієї земної поверхні. Для цього на борту багаторазового космічного корабля типу Space Shuttle установлювали інтерферометричну РСА SIR-C/X-SAR, яка працювала одразу в трьох частотних діапазонах – L, C та X.

У двопрохідній інтерферометрії друге зображення отримують через деякий час після першого з того самого супутника або ж з іншого супутника, який рухається по повторюваній орбіті (тандемна місія).

Як результат знімання отримують комплексні зображення, зафіксовані антенами під різними кутами або в різний час. Після високоточного суміщення зображень отримують інтерферограму з мережею кольорових смуг, ширина яких відповідає різниці фаз з двох експозицій.

На рис. 2.6 показано геометрію основних співвідношень інтерферометрії. Точка *P* на Землі віддалена від S_1 на відстань *H*. Відомими параметрами є віддалі R_1, R_2, база *B,* кут її нахилу відносно горизонтальної площини α, а також кути нахилу променів θ_1, θ_2.

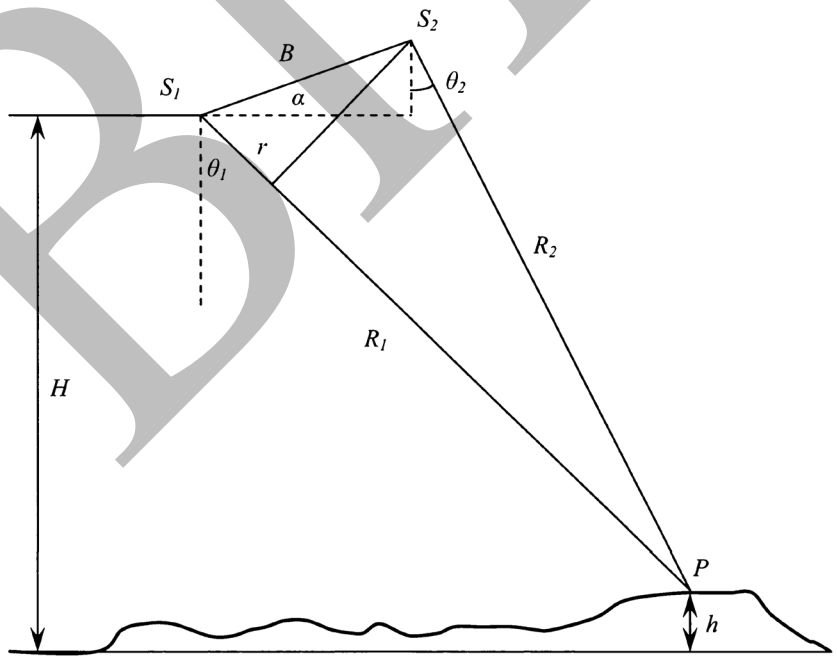


Рис**. 2.6.** Геометрія основних співвідношень інтерферометрії [5]

ВПЗ

Для відтворення висот рельєфу фотограмметричний метод оперує амплітудними зображеннями, інтерферометричний – базується на фазових відношеннях.

Різницю фаз можна виразити через різницю нахилених дальностей *R*. Множник 2 вказує на подвійне проходження шляху сигналом: передавач - відбивна поверхня - приймач.

Для двопрохідної інтерферометрії

$$\varphi_1 = \frac{2\pi \cdot 2R_1}{\lambda}, \quad \varphi_2 = \frac{2\pi \cdot 2R_2}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot 2(R_1 - r)}{\lambda}, \quad \Delta\varphi = \frac{4\pi r}{\lambda};$$

Для однопрохідної інтерферометрії

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

Різниця нахилених дальностей *r* залежить від дальності до еліпсоїда – «фаза плоскої землі» і від висоти ділянки над еліпсоїдом (залежність від топографії). Першу залежність легко компенсувати, враховуючи положення орбіт. Друга якраз і є основою побудови цифрових моделей рельєфу.

Із рис. 2.6 перевищення *h* відносно еліпсоїда

$$h = H - R_1 \cos\theta$$

На рис. 2.7 подано зображення цифрової моделі рельєфу, побудованої інтерферометричною методикою.

Існують різні додаткові чинники, які впливають на різницю фаз, а саме: відхилення супутника від орбіти, топографія місцевості, локальні зміщення відбивної поверхні між зніманнями, атмосферні впливи, а також шуми. Після врахування зміщень фази, викликаних орбітальними чинниками та впливом топографії, можна оцінити зміщення і часові зміни порівнянням пари супутникових зображень, отриманих через певний інтервал часу. На цьому ґрунтується диференціальна інтерферометрія**.** Вона дає змогу визначати зміщення земної поверхні (зсуви і передвісники землетрусів), а також відстежувати зміни характеристик радіосигналів через зміну вологості ґрунтів (підтоплен-

ВПІ

ня).

Сучасні РСА, завдяки прогресивним технологіям обробки сигналів, зокрема адаптивному синтезуванню апертури, стисненню імпульсів та фазовій корекції забезпечують просторове розрізнення, яка майже дорівнює просторовій розрізненню дистанційних панхроматичних зображень. До того ж певні об'єкти ефективніше виявляються на радіолокаційних зображеннях порівняно з оптичними через відмінності характеру відбиття та розсіяння радіохвиль та оптичного випромінювання.

Новітні космічні радіолокаційні системи спостереження, такі як Radarsat-2, TerraSAR-X та COSMO-SkyMed з номінальним просторовим розрізненням 1–3 м на місцевості, за інформативністю наближаються до авіаційних. Сьогодні авіаційні РСА забезпечують просторову розрізнення, в середньому в 10 разів кращу за супутникові, що істотно розширює перелік їх можливих застосувань.

Особливістю сучасних РСА є гнучкість, що дає змогу забезпечувати декілька різних робочих режимів. Так, наприклад, можна одержати високе просторове розрізнення, якщо значно звузити ширину радіолокаційного променя на землі (режим Stripmap), тоді як для панорамного огляду (режим ScanSAR) досить використовувати ширший промінь і гірше розрізнення. Крім того, можна істотно підвищити просторове розрізнення за допомогою сканування променем так, щоб він залишався у межах вибраної ділянки місцевості під час прольоту над нею (режим Spotlight). Основні технічні характеристики сучасних видових РСА наведено в таблиця 2.3.

ВІЗ

Таблиця 2.3

Технічні характеристики радіолокаційних систем із синтезованою апертурою **[5]**

Носій	Бортова радіолокаційна апаратура	Радіолокаційний діапазон (довжина хвилі), см	Висота знімання, км	Просторове розрізнення, м	Боковий винос, км	Ширина смуги огляду, км
Супутникові РСА						
Radarsat-1	SAR-1	C(5,6)	798	8	600	45
Space Shuttle	SIR-C	C(5,8)	225	30	90	15
ERS-2	AMI-SAR	C(5,3)	782	30	300	100
Envisat	ASAR	C(5,6)	800	30	400	100
ALOS	PALSAR	***L***(23,5)	692	14	100	40
SAOCOM	SIASGE	***L***(24,0)		10		65
Radarsat-2	SAR-2	C(5,5)	798	3	100	20
TerraSAR-X	X-SAR	X(3,2)	514	2	200	30
COSMO-Skymed	SAR-3	***X(10,0)***	619	1		10
"Вега"	РСА-10	S(10,0)		2		10
"Метеор-М"	"Северянин-М"	***L*** *(23,5)*	815	500	600	150
Авіаційні РСА						
Convair 580	C/X-SAR	C(5,7)	6,5	6	6,5	18
Do-228	E-SAR	X(3,1)	3,5	2,5	2	7
AeroCommander 685	AeS-1	*P*(72,0)	5	0,5	2	4
БПЛА	MiniSAR	X(3,0)	2,5	0,3	3	4
Gulfstream II	Pi-SAR	X(3,1)	12	1,5	9,4	20,6
DH-6 Twin Otter	Lynx	***Ku(1,8)***		0,3	7	1
Ту-154	"Компакт"-100	X(3,0)	12	1,5	20	20
Ту-134	МРЛК	X(3,9)	2,1	2		32
Ил-18	МАРС	L(23,4)	10	25	5	30
Ан-30	РСА-23	***L***(23,0)	7	10	3,5	15
Ан-2	КРАЗ	Ku(1,9)	2	1,5	0,5	2,5

ВПІ

Таблиця **2.4.** Стандартні рівні цифрових моделей місцевості

Рівень	Просторове розрізнення, м	Вертикальна точність		Джерело
		Абсолютна*, м	Відносна**, м	
DTED-1	90×90	30	20	SRTM-C
DTED-2	30×30	18	12	ASTER, SRTM-X, ERS Tandem, SPOT 5 HRS, SRTM-C (обмежені території)
HRTI-3	12×12	10	2–4	TanDEM-X, оптичні супутникові системи високого розрізнення
HRTI-4	6×6	5	0,8–2	Системи повітряного базування, TanDEM-X

Примітки:

DTED (Digital Terrain Elevation Data) – ЦММ або ЦМР середнього просторового розрізнення;

HRTI (High Resolution Terrain Information) – ЦММ або ЦМР високого просторового розрізнення;

* – визначається як 90% лінійна похибка в глобальному масштабі;

** – визначається як 90% лінійна похибка по точках для ділянки 1×1.

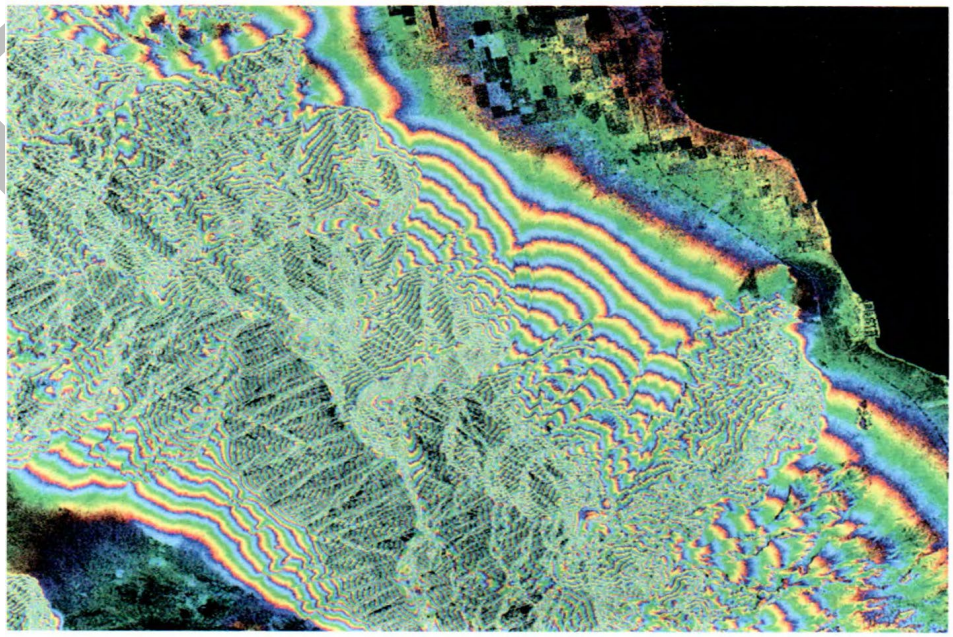


Рис**. 2.7.** Цифрова модель рельєфу, побудована на основі інтерферометричних вимірювань

Фотограмметрична обробка радіолокаційних даних дозволяє одержувати цифрові моделі місцевості для будь-яких територій, причому з високою точністю (до декількох метрів по висоті), що є важливим, тому що актуальна інформація про рельєф необхідна для рішення великої кількості завдань, від ортотрансформування космічних зображень до створення тривимірних моделей місцевості (рис. 2.8).



Рис**. 2.8.** Ілюстрація методики SAR-topography, представлена в середовищі GoogleEarth (колір точок відповідає висотам об'єктів на місцевості)

Інтерферометричні вимірювання проводяться з використанням пар знімків однієї території, отриманих при різних положеннях сенсора. В даний час для формування таких пар використовується 11-денний цикл повторного прольоту супутника TerraSAR-X-1, коли він опиняється на тій самій орбіті. Базис між двома зображеннями та якість інтерферометричної фази є визначальними для точності результуючої цифрової моделі місцевості (ЦММ). Цифрова модель містить складову, обумовлену шаром рослинності, тобто не є цифровою моделлю рельєфу. Інтерферометричні (INSAR) технології можуть використовуватися тільки при схожості парних зображень (пустелі, скеляста місцевість). INSAR з 11-денним циклом не застосовуються для тропічного клімату, порушення зв'язків (схожості) за цей період перешкоджає роботі з інтерферометрією.

ВНТУ

Таблиця 2.5

Характеристики супутникових радіолокаційних систем

Найменування системи	Країна	Рік запуску	Діапазон	Періодичність, днів	Максимальне просторове розрізнення, м	Смуга зніманння, км
Cosmo-SkyMed-3	Італія	2008	X	16	1	10
RISAT-1	Індія	2009	C	12	2	10
TanDEM-X	Німеччина	2009	X	11	1	10×5
Кондор-Э	Росія	2009	S	–	1–2	10–20
HJ-1C	Китай	2010	S	31	31	–
SAOCOM-1A/1B	Аргентина	2010	L	16	16	50
Kompsat-5	Південна Корея	2013	X	–	1	5
RADARSAT-1	Канада	2011	C	24	7,8–9,1	100
Sentinel-1	Європа	2013	C	12	12	80
BIOMASS	Європа	2013	P	30	50	–

Розглядаючи сучасні тенденції в радіолокаційному дистанційному зондуванні земної поверхні, не можна не відзначити активний розвиток саме супутникового сегмента, а не тільки технологій обробки даних. Коло завдань, розв'язуваних за допомогою радіолокаційних даних, постійно розширюється, що вимагає використання даних з новими параметрами. Таблиця 2.5 представляє узагальнену інформація про сучасні радіолокаційні системи.

Shuttle radar topographic mission (SRTM) – Радарна топографічна зйомка більшої частини території земної кулі, за винятком самих північних (>60°), самих південних широт (>54°), а також океанів, зроблена за 11 днів у лютому 2000 р. за допомогою спеціальної радарної системи з борта космічного корабля багаторазового використання «Шаттл». Двома радіолокаційними сенсорами SIR-C і X-SAR, було зібрано більше 12 терабайт даних. Протягом цього часу за допомогою радарної інтерферометрії, була зібрана величезна кіль-

кість інформації про рельєф Землі. Результатом знімання стала цифрова модель рельєфу 85% поверхні Землі. Але певна кількість інформації вже доступно користувачам. SRTM – міжнародний проект, очолений Національною Геопросторовою Спецслужбою (NGA), НАСА, італійським космічним агентством (ASI) та німецьким Космічним Центром.

Дані SRTM існують у декількох версіях: попередні (версія 1, 2003 р.) і остаточна (версія 2, лютий 2005 р.). Остаточна версія пройшла додаткову обробку, виділення берегових ліній і водних об'єктів, фільтрацію помилкових значень. Дані поширюються в декількох варіантах – сітка з комірок 1 кутова секунда і 3 кутові секунди. Більше точні односекундні дані (SRTM1) доступні на території США, на іншу поверхню Землі доступні тільки трисекундні дані (SRTM3). Файли даних являють собою матрицю з 1201×1201 (або 3601×3601 для односекундної версії) значень, що може бути імпортована в різні програми побудови карт і геоінформаційні системи. Крім того, існує версія 3, розповсюджувана у вигляді файлів ARC GRID, а також ARC ASCII і у форматі Geotiff, квадратами 5×5 в датумі WGS84. Ці дані отримані організацією CIAT з оригінальних висотних даних USGS/NASA шляхом обробки, що забезпечила одержання гладких топографічних поверхонь, а так само інтерполяцію областей, у яких були відсутні вихідні дані.

Номенклатура даних виробляється наступним чином: назва квадрата даних версій 1 і 2 відповідає координатам його лівого нижнього кута, наприклад: N45E136, де N45 є 45 градусів північної широти, а E136 є 136 градусів східної довготи, букви (n) і (e) в імені файлу позначають, відповідно, північну і східну півкулі. Назва квадрата даних обробленої версії (CGIAR) відповідає номеру квадрата з розрахунку 72 квадрата по горизонталі (360/5) і 24 квадрата по вертикалі (120/5).

Загальнодоступними є значення висот у кутах комірки розміром 3 на 3. Точність висот заявлена не нижче 16 м, але тип оцінки цієї величини – середня, максимальна, середня квадратична помилка (СКО) – не пояснена, що і не

ВПЗ

дивно, оскільки для строгої оцінки точності необхідні або еталонні значення висот приблизно такого ж ступеня охоплення, або строгий теоретичний аналіз процесу одержання і обробки даних. У зв'язку із цим, аналіз точності матриці висот SRTM проводився не одним колективом учених різних країн миру. Висоти SRTM мають похибку, яка для рівнинної місцевості в середньому становить 2,9 м, а для нерівної – 5,4 м, причому значна частина цих помилок включає систематичну складову. Матриця висот SRTM підходить для побудови горизонталей на топографічних картах масштабу 1:50 000. Але на деяких територіях висоти SRTM по своїй точності приблизно відповідають висотам, отриманим з топографічної карти масштабу 1:100 000, а також може використовуватися при створенні ортофотопланів по космічних знімках високого розрізнення, знятих з незначним кутом відхилення від надира.

Дані SRTM можуть застосовуватись при вирішенні в різних прикладних завдань різного ступеня складності, наприклад: для використання їх при побудові ортофотопланів, для оцінки складності майбутніх топографо-геодезичних робіт, планування їхнього проведення, а також можуть надати допомогу при проектуванні розташування профілів і інших об'єктів ще до проведення топознімання, отримані за результатами радарної зйомки SRTM значення перевищень точок місцевості можуть бути використані для відновлення топооснови територій, де відсутні дані детальних топографо-геодезичних робіт. Цей вид даних є універсальних джерелом для моделювання земної поверхні, головним чином для побудови цифрових моделей рельєфу і цифрових моделей місцевості, але питання застосовності радарних висотних даних SRTM як альтернатива стандартним методам побудови цифрової моделі місцевості і рельєфу повинен вирішуватися в кожному випадку індивідуально, залежно від поставленого завдання, характеристик рельєфу і необхідної точності висотної прив'язки.

Для одержання коректного результату при побудові ЦММ на основі інтерферометричних вимірювань необхідна наявність, по-перше, опорної циф-

ВІЛЬ

рової моделі рельєфу (можуть бути використані GTOPO-30, SRTM та ін.), по-друге, наявність опорних точок з відомими координатами і висотами, які впевнено зорієнтуються на радіолокаційному знімку. Для впевненого розпізнавання опорних точок на радіолокаційних зображеннях середнього розрізнення на земній поверхні в районі знімання встановлюють спеціальні металеві кутикові відбивачі з розміром грані близько 1 м (розмір залежить від знімальної системи), точно зорієнтовані на радіолокатор, які дають яскравий відгук на зображенні (ефект багаторазового відбиття сигналу). Замість кутикових відбивачів можуть бути використані спеціальні пристрої – транспондери, що дають сильний відгук на радіолокаційних зображеннях, які не вимагають орієнтації на радіолокатор, і будуть давати відгук при зйомці будь-який радіолокаційною системою. Їхнє застосування поки розвинене не дуже широко. На одне зображення необхідно 5–8 відбивачів, рівномірно розподілених по території зйомки. Опорні точки використовуються для уточнення параметрів інтерферометричної моделі і відновлення висот. Точності створюваних ЦММ досить сильно варіюються залежно від безлічі факторів і можуть бути оцінені тільки приблизно.

Таблиця 2.6.

Оцінка точності визначення висот ЦММ**,** отриманих в результаті інтерферометричної обробки **[20]**

Найменування системи	Просторове розрізнення, м	Середня похибка визначення висоти, м
TerraSAR-X	3	2–4
Radarsat-2	3	3–6
ALOS/PALSAR	7–14	5–10
Radarsat-1	8–25	
Envisat/ASAR	25	
ERS-1, 2	30	

У таблиця 2.6 наведена оцінка точності висот цифрових моделей міс-

ВНТУ

цевості, створюваних у результаті інтерферометричної обробки радіолокаційних зображень із використанням опорних точок.

Інтерферометричні вимірювання також можуть застосовуватись для побудова карт (картограм) вертикальних зсувів. У цьому випадку необхідна актуальна опорна цифрова модель рельєфу максимальної точності, тому що по ній усувається вплив рельєфу місцевості на інтерферограмі. Якщо точність використовуваної ЦММ буде невисокою, то на карті зсувів будуть присутні значні помилки. Такий метод обробки даних називається диференціальною інтерферометрією, і часто для визначення зсувів використовується трохи різночасні інтерферограми. Тим самим можна уникнути використання зовнішньої точної ЦММ прямо, тому що рельєф фіксується на обох інтерферограмах, і його вплив може бути усунутий при побудові диференціальної інтерферограми. Для розрахунку величин вертикальних зсувів також необхідна опорна інформація, тобто точки з відомими величинами зсувів. Оскільки одержати таку інформацію істотно складніше, ніж координати точок, то йдуть від зворотного. Як опорні точки беруть ті точки, де зсуву теоретично повинні бути нульові, або мінімальні. Поряд з цим існує інший підхід до визначення вертикальних зсувів земної поверхні, який ефективно застосовується для міських територій і дозволяє фіксувати осідання на міліметровому рівні на основі великої серії зображень (15–20 знімків). В основі методу лежить спільна обробка великого масиву знімків території, отриманих протягом декількох років. Всі наявні знімки обробляються спільно, з метою локалізації випромінювачів, таких як різноманітні металеві і бетонні спорудження: будинку, мости, скельні породи, спеціально встановлені кутикові відбивачі, які відображаються на радіолокаційних зображеннях у вигляді інтенсивних спалахів або точок. Точний вимір рухів визначається на тлі цих об'єктів. Результат таких вимірів являє собою таблицю, у якій рівняються виміри середньорічних рухів і тимчасові серії рухів для кожної точки вимірів. Ці дані можуть використовуватися при моніторингу будинків і споруд,

ВНТУ

тому що дозволяють визначати напрямок і величину деформацій (зсув і осідання) з міліметровою точністю.

2.3. Побудова моделі рельєфу на основі аерокосмічних фотознімків

Фотограмметричний метод отримання даних для побудови цифрової моделі рельєфу ґрунтується на стереовимірюваннях просторової моделі об’єкта, побудованої зі стереопари зображень; іншими словами, одержання інформації про глибину полягає у реєстрації декількох зображень сцени під різними ракурсами. У цьому випадку точки сцени дають зображення, відносне положення яких залежить від відстані до точки спостереження. Зіставляючи ці зображення, у ряді випадків можна реконструювати тривимірну структуру сцени.

Різні точки простору предметів відображаються оптичною системою камери в просторі зображень на різних відстанях від фокальної площини. Якщо відстань між камерою і спостережуваною сценою значно перевищує фокусну відстань оптичної системи, то можна вважати, що зображення будується в її фокальній площині. У цьому випадку використовують проективну модель камери, у якій зображення тривимірного об’єкта отримується проектуванням його у фокальну площину (площина зображення) через єдину точку, яка називається *оптичним центром*. Пряма лінія, яка перпендикулярна до площини зображення і проходить через цю точку, називається *оптичною віссю* камери, а точка перетину оптичної осі із площиною зображення – *головною точкою*.

ВДЗ

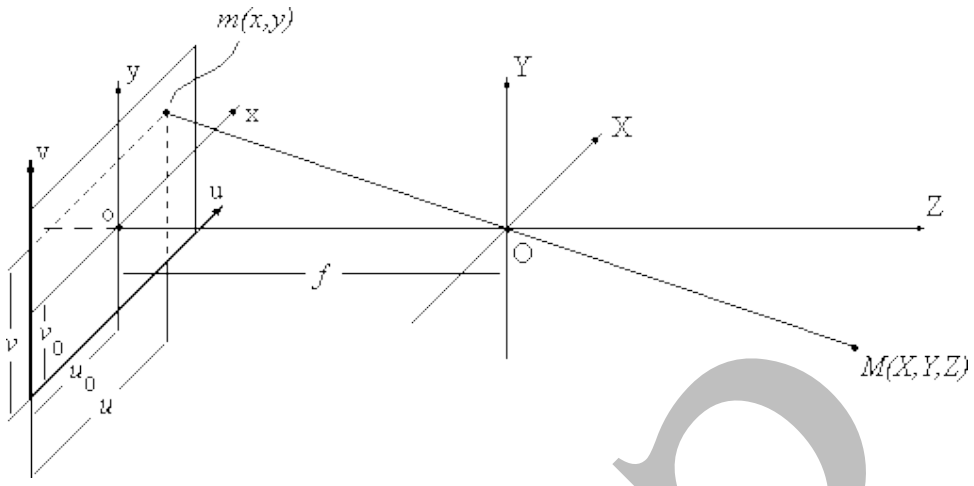


Рис. **2.9.** Система координат проективної камери

Нехай в тривимірному просторі визначена *стандартною системою координат* камери *OXYZ* (її початок збігається з оптичним центром, вісь *OZ* – з оптичною віссю камери); в цій площині задано систему координат *oxy* з початком у головній точці і осями *ox* і *oy*, паралельними осям *OX* і *OY* відповідно (рис. 2.9). Нехай вектор $\mathbf{M} = (X, Y, Z)^T$ відповідає положенню точки простору *M* відносно стандартної системи координат камери, а двовимірний вектор $\mathbf{m} = (x, y)^T$ відповідає проекції точки *M* в площині зображення. Для повного описання камери потрібно врахувати, що для реєстрації зображення в площині зображення камери міститься який-небудь фотоприймач (у фотокамері це фотопластинка або фотоплівка, у відеокамері це видикон або фотоприймаюча напівпровідникова матриця, у деяких спеціальних камерах – електромеханічний сканер). Для повного опису камери необхідно виразити координати точки *m* в природних одиницях фотоприймача, тобто виразити вектор $\mathbf{v} = (u, v, 1)^T$ однорідних внутрішніх координат камери. В загальному випадку вектор **v** можна представити у векторно-матричній формі:

$$Z\mathbf{v} = \mathbf{AM}, \qquad (2.2)$$

де $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f/w & 0 & u_0 \\ 0 & f/h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матриця *внутрішніх параметрів* камери, вона містить тільки параметри оптичної системи і фотоприймача камери; *w* і *h* –

ВПЗ

масштаби уздовж осей *ox* і *oy*; (u_0, v_0) – координати головної точки відносно початку координат фотоприймача; f – відстань площини зображення знаходиться від оптичного центра камери.

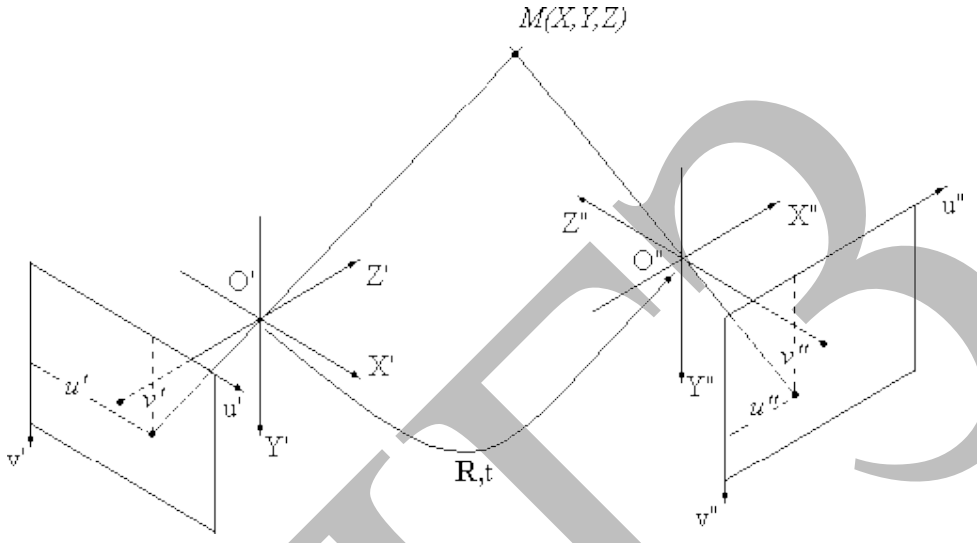


Рис**. 2.10.** Система двох довільно орієнтованих камер

У загальному випадку тривимірні координати точки можуть бути задані в *глобальній* системі *OXYZ*, що не збігається зі стандартною системою $O'X'Y'Z'$ координат камери. Зв'язок між координатами точки *M* в глобальній і стандартній системі може бути представлений як

$$\mathbf{M}' = \mathbf{RM} + \mathbf{t}, \qquad (2.3)$$

де $\mathbf{M}$ і $\mathbf{M}'$ – вектори просторових координат точки M в глобальній і стандартній системах, відповідно; $\mathbf{R}$ – матриця розмірності 3×3, що описує поворот стандартної системи координат щодо глобальної; компонентами матриці є напрямні косинуси осей глобальної системи в стандартній системі координат; $\mathbf{t}$ – тривимірний вектор зсуву початку координат глобальної системи відносно початку стандартної системи.

Розглянемо ситуацію, коли дві камери, що перебувають у різних точках, реєструють одну і ту ж саму сцену. Пари зображень, одержуваних при цьому, називається *стереопарою*.

ВПЗ

В загальному випадку оптичні осі камер не є паралельними, і напрямок зсуву оптичного центра однієї камери щодо оптичного центра іншої є довільним (рис. 2.10). Нехай першій камері відповідає стандартна система координат $O'X'Y'Z'$, а другій – $O'X'Y'Z'$ (рис. 2.10). Вектор $\mathbf{M}' = (X', Y', Z')^T$ характеризує координати деякої точки M тривимірного простору в системі першої камери, а вектор $\mathbf{M}'(X', Y', Z')^T$ – в системі другої камери. Перехід від глобальної системи координат до стандартних систем першої і другої камер здійснюється за допомогою перетворень $\mathbf{M}' = \mathbf{R}'\mathbf{M} + \mathbf{t}'$ і $\mathbf{M}' = \mathbf{R}'\mathbf{M} + \mathbf{t}'$ відповідно. Зв'язок між векторами $\mathbf{M}'$ і $\mathbf{M}'$ задається співвідношенням

$$\mathbf{M}' = \mathbf{R}\mathbf{M}' + \mathbf{t}, \tag{2.4}$$

де $\mathbf{R} = \mathbf{R}'\mathbf{R}'^T$ – ортогональна матриця, що описує орієнтацію системи координат другої камери відносно першої, а $\mathbf{t} = -\mathbf{R}'\mathbf{R}'^T\mathbf{t}' + \mathbf{t}'$ – вектор трансляції, який визначає положення оптичного центра другої камери в системі координат першої. Матрицю $\mathbf{R}$ і вектор $\mathbf{t}$ називають *зовнішніми параметрами* системи реєстрації.

Використовуючи (2.2), з (2.4) можна одержати співвідношення, що зв'язує координати спряжених точок (у координатах фотоприймача):

$$Z'\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}' = Z'\mathbf{R}\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{v}' + \mathbf{t}, \tag{2.5}$$

де

$$\mathbf{v}' = \mathbf{A}_1\mathbf{M}'/Z', \quad \mathbf{v}' = \mathbf{A}_2\mathbf{M}'/Z'. \tag{2.6}$$

(передбачається, що реєстрація може виконуватися двома різними камерами, внутрішні параметри яких визначаються матрицями $\mathbf{A}_1$ і $\mathbf{A}_2$).

Рівняння (2.2) і (2.4) дозволяють оцінити тривимірні координати точки M в системі координат кожної з камер, якщо відомі зовнішні параметри системи камер і вдається виміряти координати зображень цієї точки в площинах зображення камер (тобто оцінити вектори $\mathbf{v}'$ і $\mathbf{v}'$). Оскільки компоненти векторів $\mathbf{v}'$ і $\mathbf{v}'$ можуть містити похибки, реальне співвідношення (2.5) набуває вигляду:

ВПЗ

$$Z'\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}' - Z'\mathbf{R}\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{v}' - \mathbf{t} = \mathbf{e},$$

де $\mathbf{e}$ – вектор нев'язки, обумовлений наявністю похибок вимірювань.

Для оцінювання невідомих Z' і Z' можна скористатися методом найменших квадратів (МНК), суть якого полягає в тому, щоб знайти такі оцінки Z' та Z', які б мінімізували суму квадратів компонент (норму) вектора нев'язок: $J_1(Z', Z') = \mathbf{e}^T\mathbf{e}$. Прирівнюючи до нуля частинні похідні від J_1 по Z' і Z' (умова досягнення екстремуму), одержимо систему, що складається із двох скалярних рівнянь

$$\begin{cases} Z'\mathbf{v}'^T\mathbf{A}_1^{-T}\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{v}' - Z'\mathbf{v}'^T\mathbf{A}_1^{-T}\mathbf{R}^T\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}' + \mathbf{v}'^T\mathbf{A}_1^{-T}\mathbf{R}^T\mathbf{t} = 0 \\ -Z'\mathbf{v}'^T\mathbf{A}_1^{-T}\mathbf{R}^T\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}' + Z'\mathbf{v}'^T\mathbf{A}_2^{-T}\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}' - \mathbf{v}'^T\mathbf{A}_2^{-T}\mathbf{t} = 0 \end{cases},$$

після розв'язання якої Z' і Z' одержується

$$\begin{bmatrix} Z' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}'^T\mathbf{A}_1^{-T}\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{v}' & -\mathbf{v}'^T\mathbf{A}_1^{-T}\mathbf{R}^T\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}' \\ -\mathbf{v}'^T\mathbf{A}_1^{-T}\mathbf{R}^T\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}' & \mathbf{v}'^T\mathbf{A}_2^{-T}\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{v}'^T\mathbf{A}_1^{-T}\mathbf{R}^T \\ \mathbf{v}'^T\mathbf{A}_2^{-T} \end{bmatrix} \mathbf{t}. \quad (2.7)$$

Використовуючи (2.2), можна обчислити вектор тривимірних координат точки *M* в системі кожної з камер:

$$\mathbf{M}' = Z'\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{v}', \quad \mathbf{M}' = Z'\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{v}'. \quad (2.8)$$

Таким чином, для оцінювання тривимірних координат деякої точки по стереопарі необхідно: а) знати внутрішні параметри камер (задача калібрування); б) знати параметри взаємного розташування камер (задача взаємного орієнтування); в) знайти і визначити на зображеннях координати відповідній даній точці спряжених точок (задача пошуку спряжених точок).

Оцінка внутрішніх параметрів камери та її положення відносно системи координат, у якій задана тестова сцена, дозволяє, відкалібрувавши дві камери по одній тестовій сцені, визначити їхнє взаємне положення. Однак якщо внутрішні параметри камер визначені їхньою конструкцією і можуть вважатися постійними, то взаємне положення камер у багатьох практичних випадках може змінюватися в процесі реєстрації сцени. У зв'язку з цим виникає задача взаємного орієнтування, яка не припускає наявності тестової сцени.

ВІТЗ

Розглянемо пари камер, внутрішні параметри яких відомі, але невідомі зовнішні параметри (матриця **R** і вектор **t**). Помноживши обидві частини (2.4) ліворуч спочатку векторно на **t**, а потім скалярно на $\mathbf{M}'$, одержимо

$$\mathbf{M}'^{T}(\mathbf{t}\times\mathbf{R}\mathbf{M}')=0.$$

Це співвідношення виражає той факт, що вектори $\mathbf{M}'$, $\mathbf{M}'$ і **t** лежать в одній площині, що проходить через три точки: оптичні центри камер O' і O' і точку спостереження M. Виражаючи **M** через **v**, з (2.6) одержимо:

$$\mathbf{v}'^{T}\mathbf{A}_{2}^{-T}(\mathbf{t}\times\mathbf{R}\mathbf{A}_{1}^{-1}\mathbf{v}')=0 \qquad (2.9)$$

або, з огляду на властивості мішаного добутку векторів,

$$(\mathbf{v}'^{T}\mathbf{A}_{2}^{-T}\times\mathbf{R}\mathbf{A}_{1}^{-1}\mathbf{v}')^{T}\mathbf{t}=0. \qquad (2.10)$$

Еквівалентні співвідношення (2.9) і (2.10) є основою для оцінювання матриці **R** і вектора **t**. Припустимо, що відомо координати n пар спряжених точок і, відповідно, n пар векторів $\mathbf{v}'_i$ і $\mathbf{v}'_i{}'$ $i=1,2,...,n$.

Розглянемо оцінювання **R** і **t** з використанням (2.10). Оскільки це співвідношення справедливо для будь-якої пари спряжених точок, маємо систему з n рівнянь відносно невідомих **R** і **t**, яку можна представити у вигляді:

$$\mathbf{B}_n\mathbf{t}=\mathbf{0},\quad \text{де } \mathbf{B}_n=\begin{bmatrix}(\mathbf{v}'^{T}_{1}\mathbf{A}_{2}^{-T}\times\mathbf{R}\mathbf{A}_{1}^{-1}\mathbf{v}'_{1})^{T}\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ (\mathbf{v}'^{T}_{n}\mathbf{A}_{2}^{-T}\times\mathbf{R}\mathbf{A}_{1}^{-1}\mathbf{v}'_{n})^{T}\end{bmatrix}. \qquad (2.11)$$

Система (2.11) є однорідною лінійною по **t**. Це означає, що вектор трансляції можна оцінити тільки з точністю до постійного множника. Вводячи умову нормування $\|\mathbf{t}\|^2=1$, кількість можливих розв'язків можна обмежити двома, що відрізняються знаком. Система (2.11) містить п'ять невідомих, тому що матриця **R** в силу умов нормування і ортогональності залежить від трьох параметрів, а вектор **t** з врахуванням введеного нормування – від двох. Тому кількість рівнянь у системі, отже і кількість пар відомих спряжених точок n повинне бути не менш п'яти.

ВІТЗ

Оскільки на практиці в матрицю $\mathbf{B}_n$ входять не точні значення координат спряжених точок, а результати їхніх вимірів, які можуть містити похибки, реально система (2.11) має ненульову праву частину, тобто

$$\mathbf{B}_n\mathbf{t} = \mathbf{e},$$

де $\mathbf{e}$ – вектор нев'язок обумовлений наявністю помилок вимірювань.

Згідно методу найменших квадратів, в якості оцінки матриці обертання та вектора трансляції варто вибрати такі $\mathbf{R}$ і $\mathbf{t}$, які мінімізують значення функціонала $J_2(\mathbf{R},\mathbf{t}) = \mathbf{e}^T\mathbf{e} = \mathbf{t}^T\mathbf{B}_n^T\mathbf{B}_n\mathbf{t}$. За умови $\|\mathbf{t}\|^2 = 1$ квадратична форма $\mathbf{t}^T\mathbf{B}_n^T\mathbf{B}_n\mathbf{t}$ досягає мінімуму $J_2 = \lambda_{\min}$ по $\mathbf{t}$ ($\lambda_{\min}$ – мінімальне власне число матриці $\mathbf{B}_n^T\mathbf{B}_n$), якщо $\mathbf{t}$ – власний вектор матриці, що відповідає $\lambda_{\min}$. Тому процедуру оцінювання $\mathbf{R}$ і $\mathbf{t}$ можна розбити на два етапи. На першому шукається матриця $\mathbf{R}$, яка мінімізує $\lambda_{\min}$. На другому етапі оцінюється власний вектор матриці $\mathbf{B}_n^T\mathbf{B}_n$, що відповідає $\lambda_{\min}$.

Значно складнішою задачею є оцінювання матриці $\mathbf{R}$. Один з можливих алгоритмів полягає в наступному. Матриця $\mathbf{R}$ може бути представлена у вигляді $\mathbf{R} = \mathbf{R}_x(\omega_x)\mathbf{R}_y(\omega_y)\mathbf{R}_z(\omega_z)$, де

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega_x & -\sin\omega_x \\ 0 & \sin\omega_x & \cos\omega_x \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos\omega_y & 0 & \sin\omega_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\omega_y & 0 & \cos\omega_y \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\omega_z & -\sin\omega_z & 0 \\ \sin\omega_z & \cos\omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Кути ω_x, ω_y і ω_z і є ті три невідомих параметри, від яких залежить матриця $\mathbf{R}$. На практиці завжди відомий діапазон, у якому вони можуть лежати. Виконуючи в цьому діапазоні повний перебір по всіх кутах з досить грубим кроком (наприклад, 1°) можна наблизитися до значень, що задовольняють вимогам мінімізації функціонала J_2 по $\mathbf{R}$. Потім в околі цих значень для

ВІТЗ

уточнення положення мінімуму можна скористатися одним з відомих методів мінімізації.

Нарешті, одержавши оцінки **R** і **t**, можна, використовуючи (2.7), оцінити і Z -координати спостережуваних точок. Зі способу задання систем координат випливає, що Z' і Z' повинні бути позитивними. Цією умовою і визначається вибір правильного знака вектора трансляції **t**.

Задача автоматизованого пошуку спряжених точок полягає в наступному: на одному із зображень обрана точка m', яка є проекцією деякої точки M тривимірного простору; необхідно на другому зображенні знайти точку m' – проекцію цієї ж точки. Фактично при рішенні цієї задачі мова йде про ототожнення не окремих точок, а фрагментів зображень, що лежать в околах цих точок. Тут виникає два питання: 1) якщо на одному зображенні зазначена точка, де на другому зображенні шукати спряжену? 2) що є критерієм «подібності» фрагментів?

Звернемося до співвідношення (2.9). Векторний добуток $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ можна представити як $[a]_\times \mathbf{b}$, де матриця $[a]_\times$ має вигляд:

$$[a]_\times = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Тоді (2.9) можна представити як

$$\mathbf{v}'^T \mathbf{F} \mathbf{v}' = 0 \qquad (2.12)$$

або

$$\mathbf{v}'^T \mathbf{F}^T \mathbf{v}' = 0,$$

де

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}_2^{-T} [t]_\times \mathbf{R} \mathbf{A}_1^{-1}. \qquad (2.13)$$

З іншого боку, будь-яка пряма лінія на площині може бути задана рівнянням $ax + by + c = 0$ або, у векторному вигляді, $\mathbf{a}^T \mathbf{m} = 0$, де $\mathbf{m} = (x, y, 1)$, $\mathbf{a} = (a, b.c)$. Порівнюючи рівняння прямої з (2.12) і з (2.13) приходимо до ви-

ВПІ

сновку, що (2.12) задає в площині зображення першої камери пряму

$$\mathbf{a}'^{T}\mathbf{v}' = 0 \qquad (2.14)$$

с вектором коефіцієнтів $\mathbf{a}' = \mathbf{F}^{T}\mathbf{v}'$, а в площині зображення другої камери – пряму

$$\mathbf{a}'^{T}\mathbf{v}' = 0 \qquad (2.15)$$

с вектором коефіцієнтів $\mathbf{a}' = \mathbf{F}\mathbf{v}'$.

Це означає, що якщо в площині зображення першої камери зазначена точка з вектором внутрішніх координат $\mathbf{v}'$, то спряжена точка в площині зображення другої камери може лежати тільки на прямій, заданої рівнянням (2.14). Аналогічне правило справедливо і для точок, заданих у площині зображення другої камери.

Цей результат має наочну геометричну ілюстрацію (рис. 2.11).

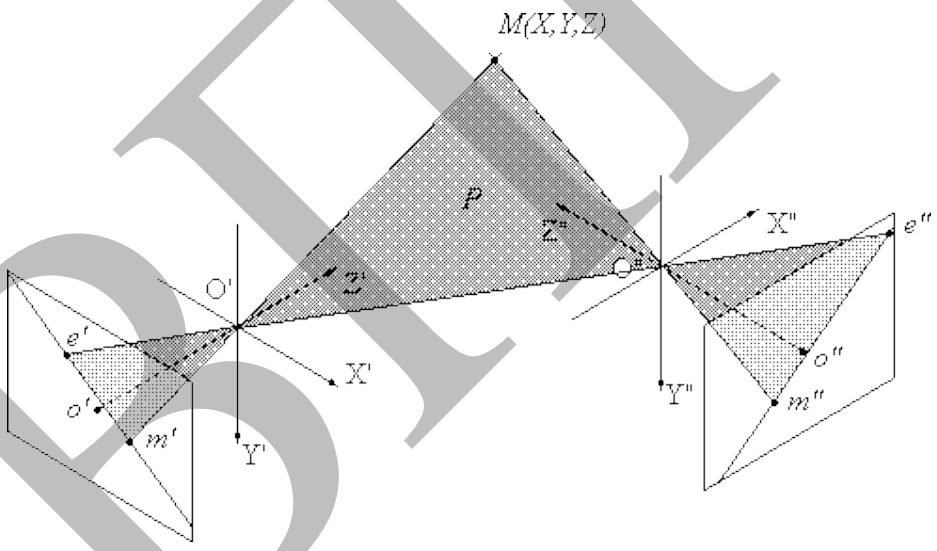


Рис**. 2.11.** Епіполярні лінії

Оптичні центри камер O' і O'' і спостережувана точка M утворюють площину P, що перетинає площини зображення камер по прямих $e'm'$ і $e''m''$, де точка e' є зображенням оптичного центра O'' другої камери в площині першої, а e'' – зображенням центра O' в площині другої. З іншого боку, якщо задано точку m', то точка M тривимірного простору може лежати тільки на прямій, що проходить через m' і оптичний центр O'. Отже, її проекція

ВПЗ

в площині зображення другої камери повинна лежати в площині P, що лежить на цій прямій і оптичному центрі C'', а виходить, на лінії перетинання площини P і площини зображення другої камери. Лінії перетинання площини P із площинами зображень камер називаються *епіполярними лініями*. При пошуку спряжених точок можна істотно скоротити розмір зони пошуку, виконуючи пошук не на всьому зображенні, а тільки уздовж епіполярної лінії, і тим самим знизити ймовірність помилкової ідентифікації фрагментів.

Зіставлення околів спряжених точок не піддається строгій формалізації, оскільки в його основі лежить проблема ідентифікації по зображеннях фрагментів реального тривимірного світу, які важко піддаються адекватному формальному опису. Виникаючі при зніманні і залежні від ракурсу проективні та яскравісні перекручування призводять до того, що в зображеннях тих самих ділянок сцени, знятих під різними ракурсами, можуть з'явитися значні відмінності. Принципово важливо те, що ці відмінності залежать не тільки від геометрії знімання, але і від геометричних і фізичних характеристик самої сцени. Розташування джерела світла відносно поверхні сцени впливає на розподіл освітленості. Положення елементів сцени, їх відбивні і розсіювальні властивості визначають кількість енергії, що потрапляє в об'єктиви камер, а отже, і локальні відмінності в яскравості спряжених фрагментів зображень.

На рис. 2.12 схематично показано деякі причини виникнення розходжень у зображеннях. Пунктиром показані індикатриси випромінювання (розсіювання) у точках A і B спостережуваної поверхні. Видно, що інтенсивність випромінювання з точки A в напрямку лівої камери (з оптичним центром C') більше, ніж у напрямку правої камери (з оптичним центром C'). Точка B, навпаки, випромінює в камеру C' слабкіше, ніж у камеру C'. Жирними стовпчиками показана інтенсивність сигналу в зображеннях цих точок у лівій (a' і b') і правої (a' і b') камерах. Більше того, точка C взагалі не видна в лівій камері, оскільки неї загороджує ділянка поверхні BC.

Величина розходжень залежить від різниці в ракурсах знімання. Як

ВПЗ

правило, чим більше ця різниця (зокрема, чим більша база), тим менш схожими стають зображення.

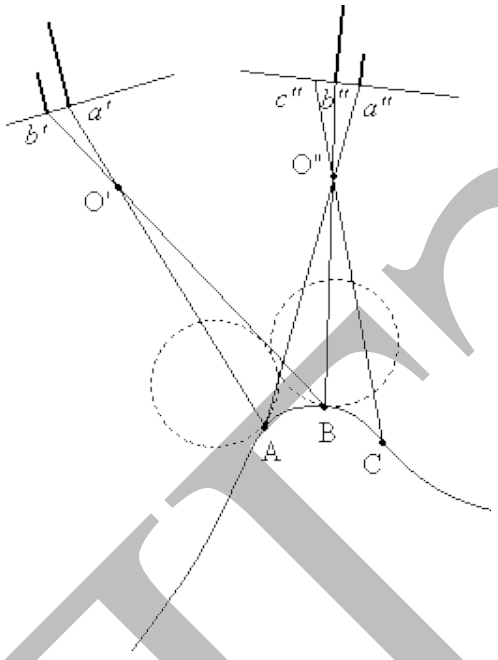


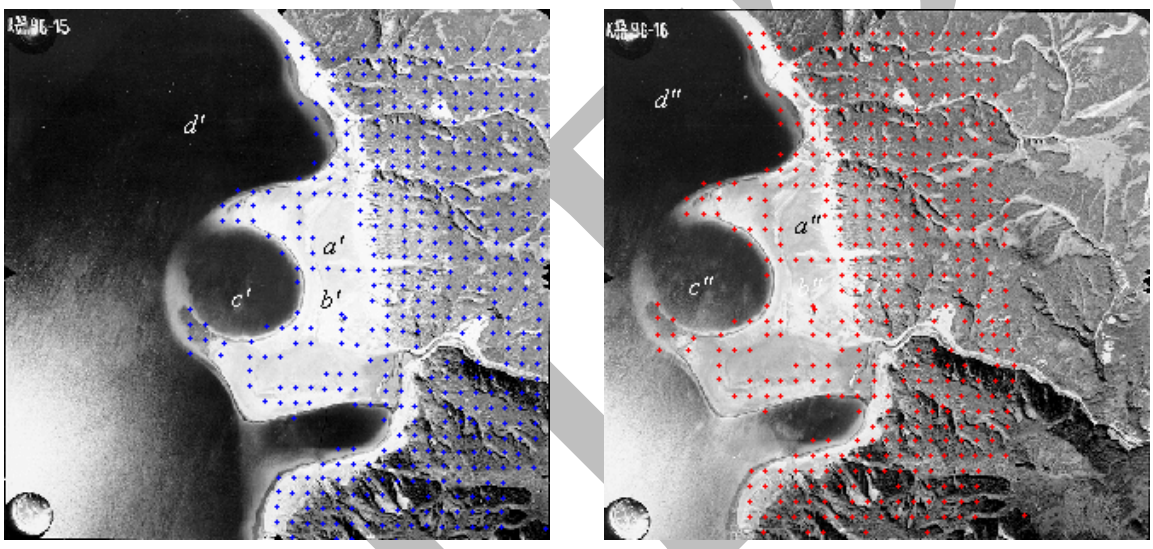
Рис. **2.12.** Проективні та яскравісні спотворення

Одним з найпоширеніших методів ідентифікації є кореляційний. При незначних відмінностях у ракурсах знімання і на досить гладких поверхнях від нього можна чекати добрих результатів. На рис. 2.13 (а і б) наведена пара знімків району, на які нанесена проріджена сітка спряжених точок, знайдених кореляційним методом, а на рис. 2.13, в показана поверхня, “натягнута” на тривимірні точки.

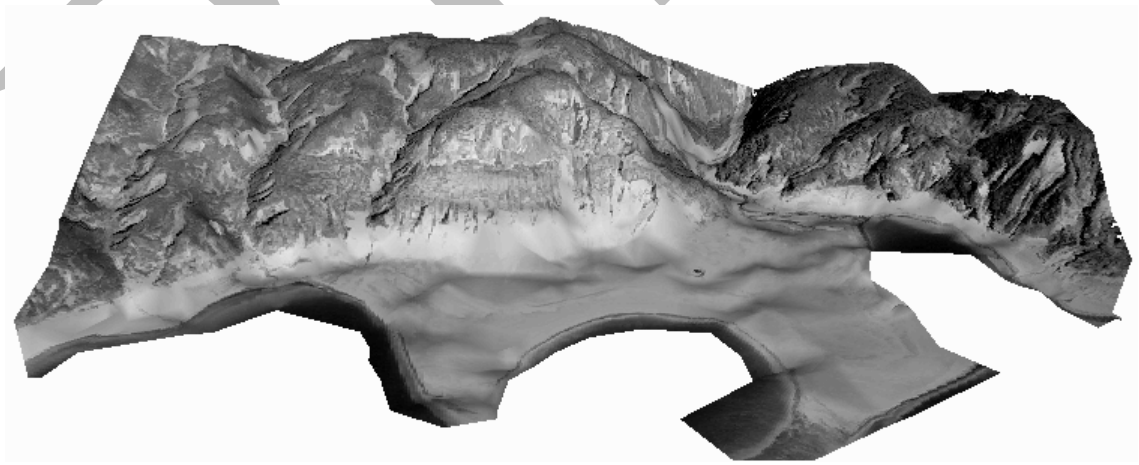
На знімках є області, де спряжені точки не знайдено. Причин цьому декілька. Частина сцени, видима в правій частині правого знімка, не потрапила в поле зору лівої камери. Крім цього, на знімках є ділянки з яскравістю, яка мало змінюється. На таких ділянках кореляційний критерій не дає добре вираженого максимуму, тому тут координати спряжених точок визначаються з більшими похибками. Більш того, тут велика ймовірність помилкових ототожнень. Просторове уявлення про такі ділянки одержати без залучення додаткової інформації неможливо. Якщо розміри цих ділянок малі, а по непрямих

ВЦЗ

ознаках можна припустити, що поверхня сцени змінюється плавно, можна інтерполювати тривимірну структуру ділянок з їхніх границь всередину, як це зроблено для ділянок a',a'' і b',b''. Якщо ж їхні розміри великі, або спряжені точки на границях не визначені, відновити тривимірну структуру ділянки не вдається (ділянки c',c'' і d',d''). Для того, щоб відновити дрібну структуру сцени, необхідно, щоб спряжені точки лежали досить часто. У наведеному прикладі для побудови рельєфу знайдено більше 7000 точок.



а б



в

Рис**. 2.13.** Відновлення поверхні тривимірної сцени по стереопарі

Складність застосування кореляційного методу полягає в тому, щоб пі-

дібрати такі розміри фрагментів, що зіставляються, при яких відмінності в тотожних фрагментах ще невеликі (для цього потрібно зменшувати розміри), а оцінка коефіцієнта кореляції залишається достовірною (для цього розміри треба збільшувати). Але самим серйозним його недоліком є чутливість до масштабних спотворень, які присутні в фрагментах, що ототожнюються. Найпростіший спосіб зменшення масштабних розходжень у спряжених фрагментах полягає у використанні попереднього афінного підстроювання зображень. Цей спосіб, однак, виявляється недійовим при варіаціях висот у сцені, порівнянних з відстанню від сцени до системи камер, оскільки в цьому випадку з'являються значні локальні масштабні спотворення.

Вплив яскравісних спотворень можна спробувати усунути, відмовившись від зіставлення фрагментів вихідних зображень, і перейшовши до зіставлення фрагментів контурних зображень, де виділені краї, тобто переходи між областями з постійною яскравістю. На таких переходах, як відомо, градієнт яскравості має максимум, а лапласіан обертається в нуль. Це обставина і використовується для виділення країв. Істотним моментом є те, що контури на зображеннях безперервних поверхонь повинні розташовуватися в однаковому порядку, як це видно на рис. 2.14 (зображення точок *A*, *B* і *D*). Це обмеження дозволяє певною мірою послабити вплив масштабних спотворень. Однак і тут, як і в кореляційному методі, існує проблема помилкового ототожнення. Пов’язана вона, зокрема, з тим, що видима частина поверхні залежить від ракурсу спостереження (тому, наприклад, на рис. 2.14 зображення точки *C* в правій камері відсутній), і на різних зображеннях можуть пропадати різні краї. Крім того, сама задача виділення країв тільки на перший погляд здається простою. У дійсності неминуча присутність шумів у зображеннях може привести до часткового зникнення контурів або до появи помилкових.

Ще один підхід до пошуку спряжених точок спирається на попередній роздільний аналіз зображень, що дозволяє виділити на них деякі характерні об’єкти або особливості. Так на аерознімках міських територій можна спро-

ВПЗ

бувати виділити перехрестя, окремі будинки або їхні фрагменти, дерева і т.п., а потім виконати їхнє ототожнення між знімками.

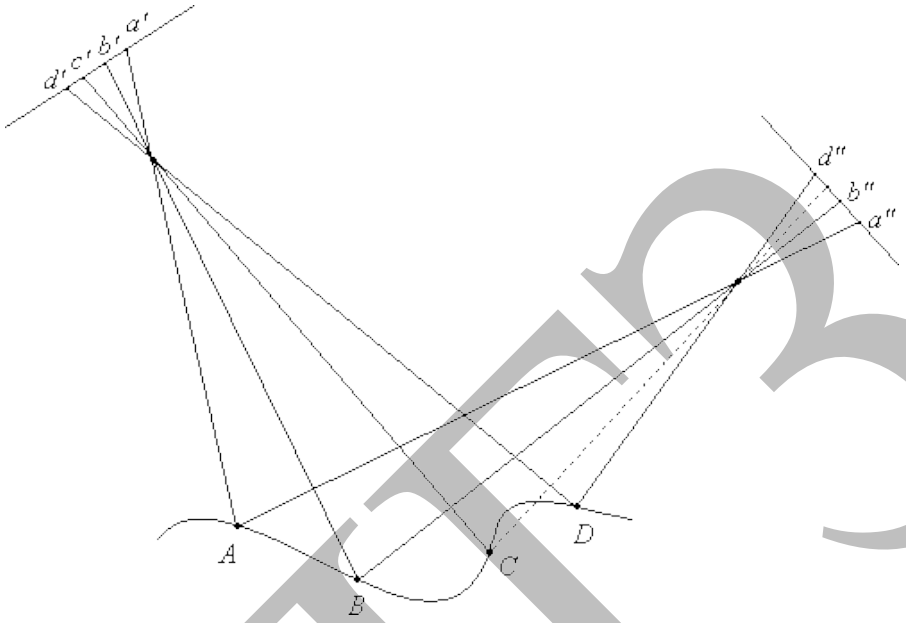


Рис**. 2.14.** Упорядкування спряжених точок у випадку безперервних поверхонь

Очевидно, найбільш вдалих результатів дає комбіноване використання всіх цих методів і застосування ітеративної схеми, коли по знайдених спряжених точках будується оцінка поверхні, з врахуванням якої зображення піддаються масштабної корекції і виконується пошук нових спряжених точок.

Можливості оптико-електронної знімальної апаратури, встановленої на борту космічних апаратів дистанційного зондування Землі, дозволяють розв'язувати задачу створення тривимірних ЦМР. Більшість космічних апаратів оснащено апаратурою, яка дозволяє виконувати знімання в стереоскопічному режимі з одного витка шляхом відхилення вісі візування або використовуючи додаткові об'єктиви, встановлені під кутом відносно надира. Знімання в стереорежимі першим способом характерна для космічних апаратів, які надають дані надвисокого розрізнення, таких як IKONOS, WorldView-1 та GeoEye-1. Другий – застосовується на космічних апаратах

ВГЗ

ALOS, SPOT-5, CARTOSAT-1 та ASTER, які дозволяють отримувати дані високого та середнього розрізнення. Перший та другий типи стереознімання називають конвергентним, він характеризується співвідношенням базиса та висоти фотографування супутника або кутом конвергенції. Перевагу мають ті космічні апарати, які можуть змінювати кут конвергенції, що дозволяє витримувати задану точність по висоті у отримуваних моделей рельєфу незалежно від типу місцевості.

В залежності від вигляду висотної інформації, яку необхідно отримати, використовуючи матеріали космічного знімання, застосовують різні підходи до обробки стереопар – від повністю автоматизованого до ручного. При створення ЦМР в основному використовуються напівавтоматичні та ручні методи в ході інтерактивної обробки стереопари оператором. Даний вид обробки застосовують до матеріалів космічного знімання надвисокого просторового розрізнення, де інтерактивна робота зі стереопарою виконується на сучасних цифрових стереоплотерах. Виходячи з просторового розрізнення знімальної апаратури, створені на базі стереопар цифрові моделі рельєфу можна умовно розділити на три типи:

- високодетальні (відстань між точками на місцевості, висоти яких визначаються, складає 1–5 м);
- детальні (крок на місцевості складає 5–10 м);
- середньодетальні (крок на місцевості складає 10–20 м);

Розглянемо види висотної інформації, яку можна здобути із даних деяких сучасних стереопар космічних знімків.

В результаті стереофотограмметричної обробки зображень із супутника WorldView-1 можуть бути отримані ЦМР із кроком від 1 до 5 м, створені як з використанням наземних опорних точок, так і без них (у першому випадку точність отриманої моделі в плані складає 1 м, абсолютна точність по висоті – 1 м, а відносна точність по висоті – 1 м; у другому випадку, відповідно, 5 м, 5 м і 1 м).

ВПЗ

При фотограмметричній обробці стереопар з КА GeoEye-1 можуть бути отримані ЦМР із кроком від 1 до 5 м. При використанні опорних точок точність отриманої моделі в плані складає 0,8 м, абсолютна точність по висоті – 1 м, а відносна точність по висоті – 1 м. У другому випадку, відповідно, 5 м, 3 м і 1 м.

Точність створеної ЦМР, отриманої по стереопарі із кроком на місцевості 5 м з супутника IKONOS-1 із кроком на місцевості 5 м з використанням опорних точок складає в плані 2,5 м, а абсолютна і відносна точність по висоті – 2 м.

Результатом обробки стереопар зображень із супутника ALOS PRISM є ЦМР із кроком від 5 до 10 м, створювані як з використанням наземних опорних точок, так і без них. Отримана з використанням опорних точок ЦМР має планову точність 5 м, абсолютну і відносну точності по висоті 5 м. Якщо опорні точки не використовуються, то цифрова модель рельєфу має точність у плані 10 м; абсолютну точність по висоті 8 м і відносну точність по висоті 5 м.

Компанія SPOT Image пропонує готові цифрові моделі поверхні SPOT DEM і Reference 3D, створені по стереопарі з супутника SPOT-5 без використання опорних точок. Точність цих моделей, отриманих по стереопарі із кроком на місцевості 20 м поверхні, становить: для SPOT DEM 8–15 м (точність у плані), 6–12 м (абсолютна точність по висоті) і 6 м (відносна точність по висоті); для Reference 3D 8 м (точність у плані), 6 м (абсолютна точність по висоті) і 6 м (відносна точність по висоті).

Високодетальні ЦМР мають унікальне просторове розрізнення (крок на місцевості) і значні геометричні характеристики, такі як точність у плані і по висоті. Дані характеристики уможливлюють застосування цих моделей для побудови горизонталей при створенні топографічних карт у масштабі 1:25 000, у яких вимоги до точності по висоті становлять 1,6 м.

Висока роздільна здатність стереопар космічних зображень надвисоко-

ВПЗ

го просторового розрізнення як у плані, так і по висоті, дозволяє створювати тривимірні моделі міст, де спільно використовуються модель рельєфу і модель об’єктів забудови у вигляді контурів дахів будинків, оцифрованих по стереопарі.

Детальні та середньодетальні моделі знаходять застосування в картографічних цілях, в основному, при створенні ортофотопланів або при генерації шару горизонталей з перетином рельєфу 20 м і більше, що обумовлено методом їхнього одержання і низкою точністю по висоті, яка порівнянна з висотою більшості включених у них висот об’єктів місцевості (будинків, рослинності і т.д.). Основна перевага детальних і середньодетальних моделей полягає в більш високій економічній ефективності їхнього створення при реалізації тематичних проектів, тому що їхнє одержання не вимагає інтерактивної обробки стереопари в стереорежимі. Створені в автоматичному режимі моделі місцевості широко використовуються для аналізу висоти рослинного покриву, антропогенного впливу на ландшафт, первинного проектуванні протяжних об'єктів і тривимірній візуалізації.

ВПЗ

Розділ **3.** ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ ЗАСОБАМИ ПАКЕТІВ **ARCGIS** ТА **SURFER**

3.1. Загальна характеристика засобів пакету **ArcGIS,** призначених для роботи з рельєфом

Пакет ArcGIS, розроблений американським Інститутом досліджень систем навколишнього середовища (Environmental Systems Research Institute - ESRI), відноситься до класу повнофункціонального програмного забезпечення ГІС і вважається одним із кращих програмних комплексів. До складу пакета ArcGIS входять наступні основні програми:

- ArcCatalog – для керування просторовими даними
- ArcMap – для створення картографічних документів і редагування просторових даних;
- ArcScene – для створення і роботи із тривимірними моделями рельєфу;
- ArcGlobe – для роботи із глобальними тривимірними даними.

ArcGIS має розвинені засоби для створення і роботи зі ЦМР, підтримуючи як растрову модель подання даних про рельєф (у форматі GRID), так і модель TIN.

Крім самостійних програмних продуктів, до складу сімейства ArcGIS входить ряд додаткових модулів. Можливість проведення просторового аналізу, реалізована на рівні трьох додаткових модулів: Spatial Analyst, 3D Analyst і Geostatistical Analyst.

Модуль 3D Analyst вводить революційну технологію для відображення і аналізу великих наборів тривимірних географічних даних у локальній або глобальній перспективі. Ці можливості надає новий додаток, що називається ArcGlobe. ArcGlobe дозволяє працювати з ГІС-даними в 3D-перспективах із продуктивністю, значно перевищуючої можливості традиційної двовимірної картографії. Просторово прив'язані дані розташовуються на тривимірному глобусі, імітуючи відображення об'єктів у реальному світі. ArcGlobe дозво-

ВІЗ

ляє створювати тривимірні види, у яких можна робити різні дії з даними геоінформаційних систем, зокрема переглядати, аналізувати і створювати анімації. Обробка даних різної складності і обсягу в ArcGlobe уможливлює відображення простих або комплексних даних, скомпонованих в екстенті всієї поверхні землі або локальної області. Використовуючи стандартні інтерактивні картографічні інструменти, користувачі можуть переміщатися по карті, будувати запити і аналізувати дані будь-якого масштабу, а також збільшувати будь-яку область і переглядати просторові дані у високому дозволі, наприклад, земельні ділянки або детальні аерофотознімки областей, що цікавлять. Для формування на глобусі висотної поверхні використовуються цифрові моделі рельєфу. Дані рельєфу являють собою джерело базових висот для "натягування" на них інших даних. Різні набори даних рельєфу можуть бути використані в сполученні з будь-якими іншими даними. Докладні дані на невеликі території можуть комбінуватися із глобальними і регіональними даними для формування єдиної складеної висотної поверхні. При додаванні більше докладних даних виходить більше деталізована поверхня. Рельєф поверхні може обчислюватися з різноманітних растрових даних, що мають просторову прив'язку, включаючи ESRI GRIDS і Digital Elevation Models (DEMs). В ArcGlobe можна довантажувати зображення, що мають просторову прив'язку, наприклад дані дистанційного зондування (результати аерокосмічної зйомки). В ArcGlobe можуть завантажуватися і векторні дані із просторовою прив'язкою. Можна зробити просторові об'єкти тривимірними, установивши висоти і задавши деякі властивості. Далі із цими даними можна виконувати аналітичні операції, наприклад, будувати запити, або знаходити об'єкти, що задовольняють певним умовам.

Модуль 3D Analyst додає до ArcMap функціональність генерації поверхонь відповідно до двох типів моделей поверхні: растрової моделі і TIN. Можна працювати із уже існуючими поверхнями або створювати нові по різноманітних джерелах даних за допомогою різних методів. Растрові поверхні

ВІЛЬ

в 3D Analyst можна побудувати за допомогою різних типів інтерполяції: Сплайна, методу назад зважених відстаней (ОВР), методу природної околиці, методу кригинга (ординарного, загального). Моделі TIN створюються звичайно по комбінації декількох джерел векторних даних і використовуються, в основному, для точного моделювання невеликих по площі областей. Поверхні можна просто переглядати, щоб скласти загальне уявлення про даний, а можна проводити по них всілякий аналіз, наприклад, розрахунок ухилів і експозицій, швидкості зміни яких-небудь характеристик, визначення видимості і т.д. Також можна зробити розрахунок об’ємів насипів і виїмок за даними поверхні і побудувати профіль уздовж тривимірної лінії, проведеної на поверхні. Якщо виникне необхідність одержати тривимірні об'єкти з існуючих двовимірних, можна легко це зробити, також як і створити нові 3D векторні об'єкти, для яких значення висоти береться, наприклад, з підстилаючої поверхні.

Додаток ArcScene дозволяє створювати багатошарові сцени і управляти властивостями відображення кожного із шарів і його положенням у тривимірному просторі. Наприклад, можна задати базові висоти при відображенні векторних об'єктів і растрових шарів, або «витягнути» двовимірні векторні об'єкти по висоті. Якщо говорити про растри, то поверхні, що містять інформацію про третю координату, можна відображати, варіюючи символи, колір, прозорість, тіні і дозвіл. У 3D Analyst додана підтримка повноцінних тривимірних символів, що дозволяє поліпшити техніку візуалізації і симуляції об'єктів. За допомогою інструментів анімації ArcGlobe можна створити демонстраційний політ, анімувати об'єкти, визуализировать зміни в часі та ін. Анімації можна експортувати у відео формат QuickTime (.mov) або Audio Video Interleave (.avi), що дозволяє використовувати їх нарівні з іншими файлами, створеними поза системою ArcGIS.

Модуль Geostatistical Analyst розширює можливості ArcMap за рахунок появи додаткових інструментів, призначених для дослідницького аналізу

ВДЗ

просторових даних, а також майстер операцій геостатистики, за допомогою якого будуються статистично достовірні поверхні. Поверхні, створювані за допомогою модуля Geostatistical Analyst, можуть бути згодом використані в моделях ГІС і для візуалізації, у тому числі з використанням модулів Spatial Analyst і 3D Analyst. В ArcGIS у вікні ArcToolbox міститься набір інструментів Geostatistical Analyst Tools. У цьому наборі перебуває інструмент GA Layer to Grid для конвертації геостатистичної поверхні в растр, який можна використовувати для аналізу в інших додатках ArcGIS. Геостатистика пропонує методи опису безперервності в просторі багатьох природних процесів і явищ і забезпечує настроювання інструментів регресійного аналізу на врахування цієї безперервності. Побудова безперервних поверхонь для подання просторового розподілу конкретних особливостей природних явищ потрібно в багатьох дослідженнях. Найбільш відома модель такого типу – це рельєф Землі, представлений у вигляді безперервної поверхні даних висот (ЦМР). Такі статистичні поверхні можна побудувати для безлічі природних або соціальних явищ: густини населення, забруднення повітря і ґрунтів, температури повітря і т.п. Використовуючи обмірювані значення в опорних точках, за допомогою модуля Geostatistical Analyst можна інтерполювати значення в інших точках у межах даної території, для яких виміри не проводилися; виконувати оцінку статистичних властивостей даних, таких як мінливість просторових даних, їхній взаємозв'язок і глобальні тренди. З використанням Geostatistical Analyst можуть бути створені різні картографічні шари, включаючи карти інтерпольованих значень, карти квантилей, карти ймовірностей, карти стандартної помилки інтерполяції. Аналіз вихідних даних здійснюється набором наявних в Geostatistical Analyst засобів, об'єднаних у зручному і простому для інтуїтивного розуміння інтерфейсі ESDA (Exploratory Spatial Data Analysis – Дослідницький аналіз просторових даних). Завдання аналізу даних полягають у найбільш глибокому розумінні глобальних і локальних закономірностей поширення явища і його трендів, екстремальних значеннях

ВПЗ

взаємозалежностей (коваріацій) з іншими наборами даних (явищами). ESDA має у своєму розпорядженні широкий спектр можливостей для виконання цих і багатьох інших завдань дослідження даних шляхом побудови різних гістограм, варіограм, графіків залежностей і розподілів. Вся графіка ESDA відображається в окремі взаємозалежні між собою вікнах і графічному вікні ArcMap, що дозволяє відслідковувати закономірності розподілу даних у просторі. Ціль даного кроку – вибір найбільш підходящого методу інтерполяції для побудови поверхні і його параметрів. У модулі Geostatistical Analyst можливе застосування двох груп методів інтерполяції: детерміністських і геостатистичних. Всі методи побудови поверхні засновані на подібності точок, які розташовані близько до опорного. Геостатистика опирається як на статистичні, так і на математичні методи, які можуть бути використані для побудови поверхні і для оцінки помилки інтерполяції. Детерміністські методи інтерполяції будують поверхня по опорних точках, грунтуючись або на ступені схожості точок вибірки (наприклад, метод зважених відстаней), або на ступені згладжування (наприклад, радіальні базисні функції). Геостатистичні методи будують поверхні з урахуванням статистичних властивостей використовуваних даних. У цю групу входять методи Крайгінга та коКрайгінга, які використовують при різних умовах різні алгоритми інтерполяції. В Geost-?tistical Analyst можливе використання ординарного, простого, універсального, імовірнісного, індикаторного і диз'юнктивного Крайгінга. Крім побудови поверхні интерпольованих значень і помилок, ці методи можуть використовуватися для створення карт імовірності і квантилей. Крайгінг підрозділяється на два окремі завдання: кількісна оцінка просторової структури даних і обчислення шуканих значень. Можна побудувати чотири типи поверхонь: поверхня даних (або прогнозну поверхню), квантильна поверхня, поверхня помилок і поверхня ймовірності прогнозованих значень.

Геостатистичні поверхні є звичайними шарами, які можуть бути відображені у вікні ArcMap. Відмінність даних шарів від інших шарів полягає в

ВІП

тому, що вони створюються винятково засобами Geostatistical Analyst. Ці шари зберігають посилання на джерела даних, по яких вони створені, а також на параметри моделі інтерполяції, які були використані при їхньому створенні. Геостатистичні шари можуть відображатися чотирма різними способами: ізолініями, «зафарбованими» ізолініями, як гріди або способом відмивання рельєфу. Можливе сполучення цих методів для досягнення більше виразного візуального ефекту.

3.2. Візуалізація рельєфу Полтавської області в середовищі **ArcGIS**

Для роботи з моделлю рельєфу Полтавської області нами були використані висотні дані [64], отримані місією STRM (Shuttle radar topographic mission).

Дані містилися у файлі формату GeoTIFF, зміст якого являв собі растр розміром 2826×3471 комірок, який мав просторову прив’язку: растр відповідав ділянці земної поверхні, обмеженої широтами 49° 10' 36.4265" і 51° 31' 51.4265" та довготами 29° 16' 2.8996" і 32° 09' 32.8996". Таким чином, окремій комірці растру відповідала ділянка розміром 3"×3", що для широти м.Києва відповідає лінійним розмірам приблизно 93×93 м. Значення висот в GeoTIFF -файлі були представлені беззнаковими 16-бітовими цілими значеннями і лежали в межах від 0 до 279 м.

Опишемо послідовність основних дій, які були виконані нами в середовищі ArcGIS.

1. В середовищі ArcCatalog створюємо нову файлову базу геоданих під назвою “База геоданих для рель’єфу”. Всередині цієї бази геоданих створюємо набір даних мозаїки під назвою “MainMosaic”. В якості проекції вибираємо GCS_WGS_1984, а тип пікселя задаємо як 16_BIT_UNSIGNED, що відповідає беззнаковому 16-бітовому цілому значенню.

ВІЗ

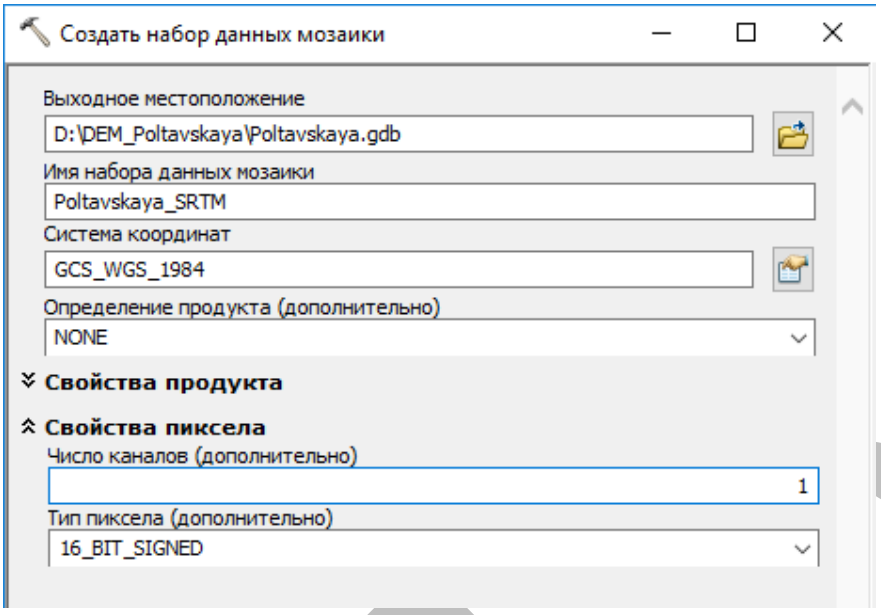


Рис. 3.1. Створення набору даних мозаїки в ArcGIS

2. Клацнувши правою кнопкою мишки на наборі даних мозаїки Polta-?skaya_SRTM, в локальному меню вибираємо пункт Add Rasters... (Додати растри).

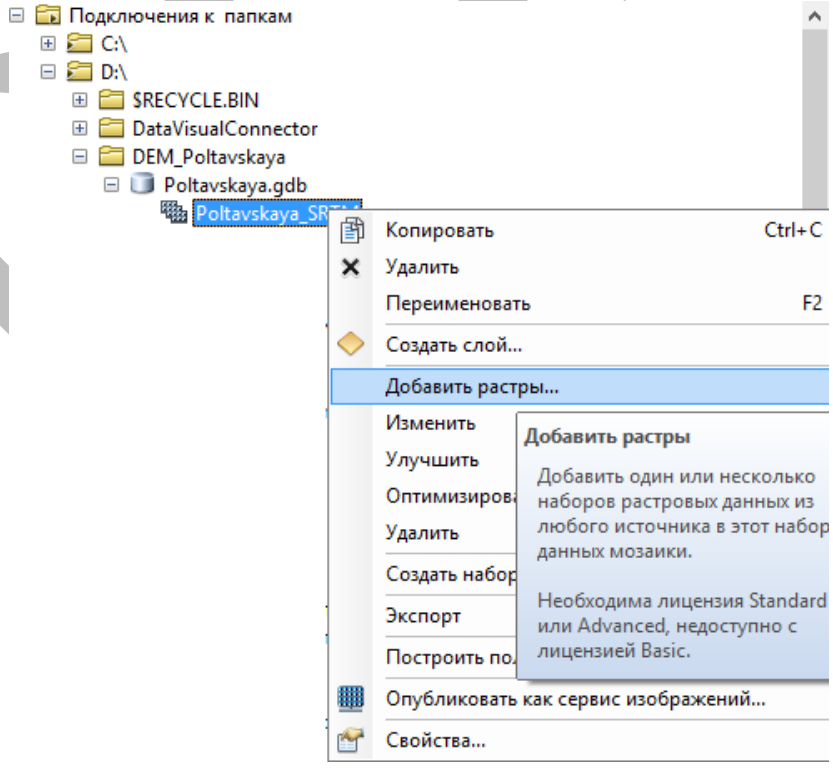


Рис. 3.2. Додавання растрів до набору даних мозаїки

Після цього додаємо у набір даних мозаїки в якості растру файл Poltavskaya_srtm.tif.

3. Запускаємо програму ArcMap. Через пункт меню View → Layout View переходимо в режим перегляду макета карти, а через Insert → Data Frame вставляємо на карту кадр з даними. За допомогою кнопки  додаємо на карту растрові дані з набору MainMosaic.

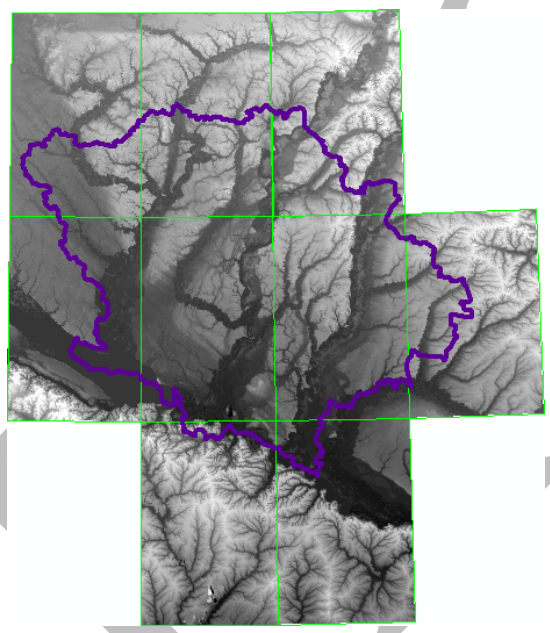


Рис. 3.3. Набір даних мозаїки з SRTM в ArcMap

4. Виконуємо настройку відображення растру в градаціях сірого, задавши параметри відображення, як це показано на малюнку нижче.

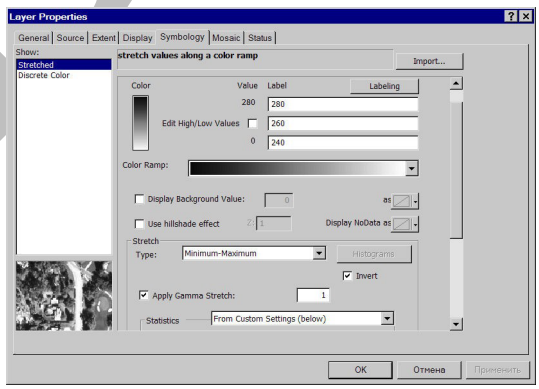


Рис. 3.4. Налаштування растру

5. Через пункт меню Insert → Legend додаємо на макет легенду та здійснюємо настроювання її зовнішнього вигляду.

В результаті отримуємо карту, на якій рельєф відображається в градаціях сірого кольору, причому більшим висотам відповідають світліші кольори.

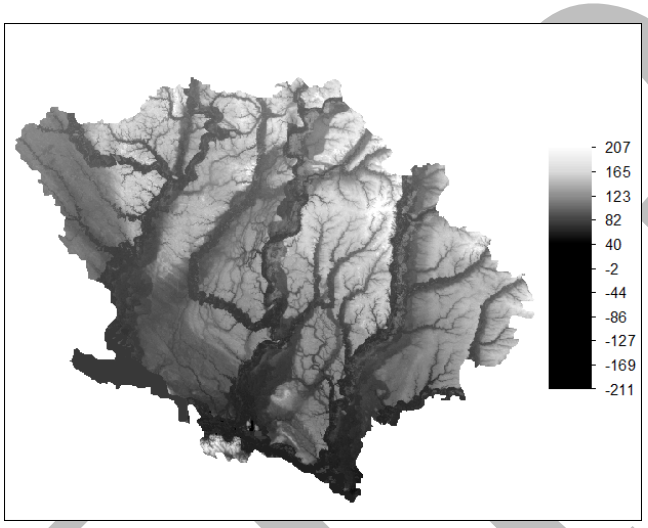


Рис. 3.5. ЦМР Полтавської області в градаціях сірого (SRTM, 30x30 м)

6. Діючи аналогічно, але змінивши спосіб розфарбовування рельєфу у вікні Layer Properties, отримуємо рельєф у псевдокольорах.

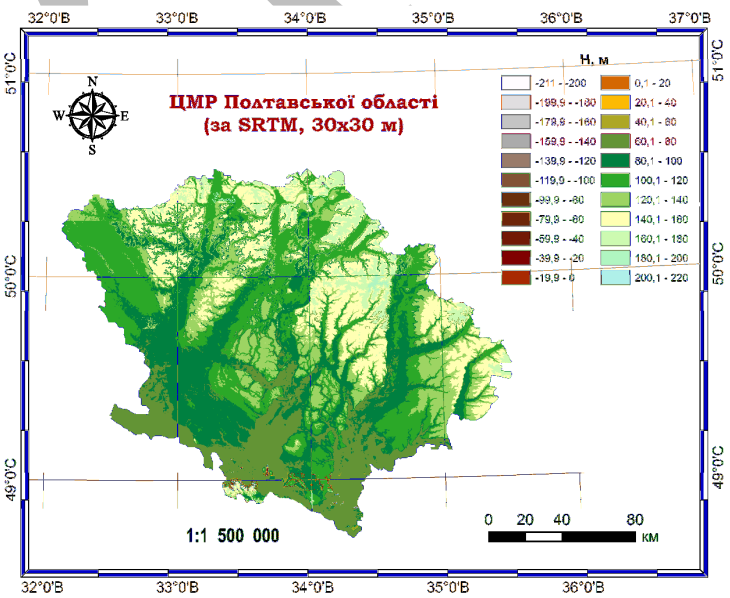


Рис. 3.6. ЦМР Полтавської області у псвдокольорах (SRTM, 30x30 м)

7. У програмі ArcCatalog робимо копію набору MainMosaic та називаємо її Mosaic_for_hillshade. Через локальне меню викликаємо для цього набору вікно з властивостями і на вкладці Functions додаємо функцію Hillshade (Відмивання). Ця функція на основі існуючого растру, який описує висоти, “на льоту” генерує інший растр, який описує рельєф, зображений методом відмивання.

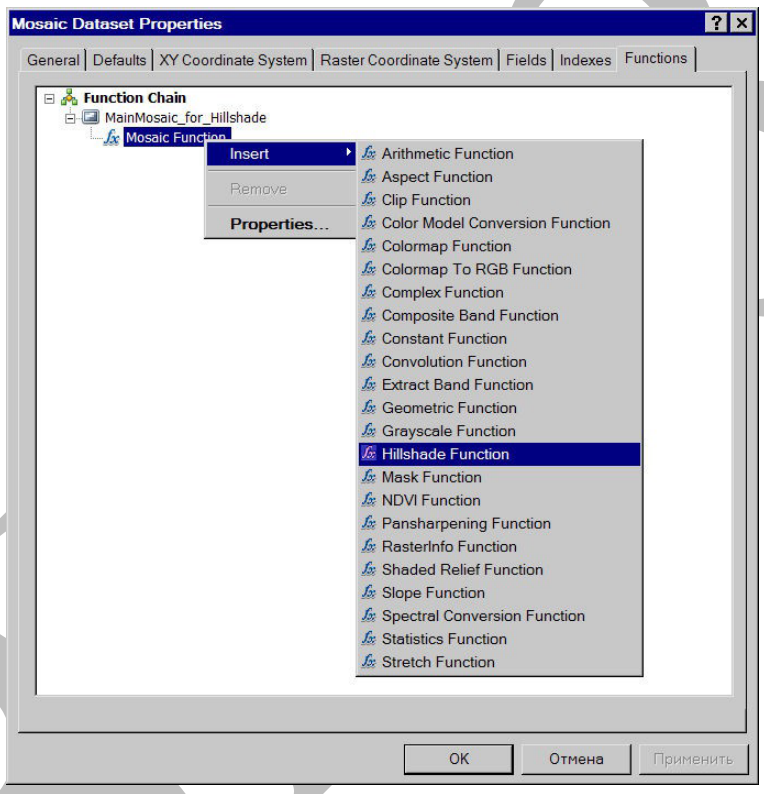


Рис. 3.7. Запуск функції Hillshade (Відмивка)

8. Переходимо у програму ArcMap та додаємо на карту дані з набору Mosaic_for_hillshade. В результаті отримаємо растр, який зображує рельєф методом відмивання.

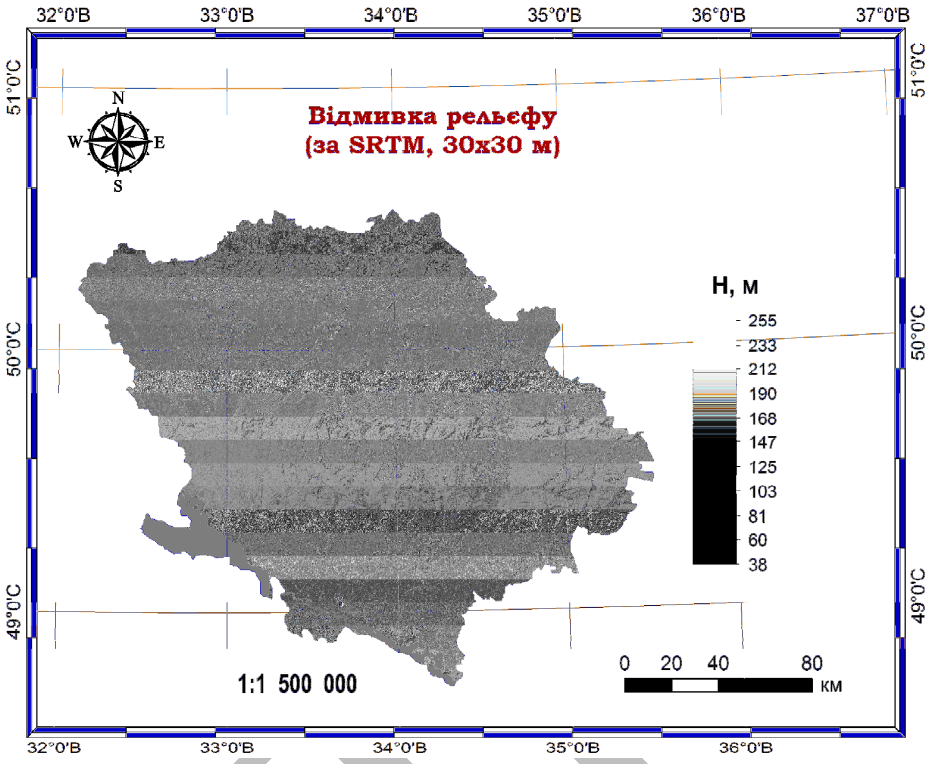


Рис. 3.8. ЦМР Полтавської області з відмивкою рельєфу

В разі необхідності у вікні властивостей фрейму даних на макеті карти на вкладці Illumination можемо змінити параметри освітлення – азимут та висоту над горизонтом джерела світла.

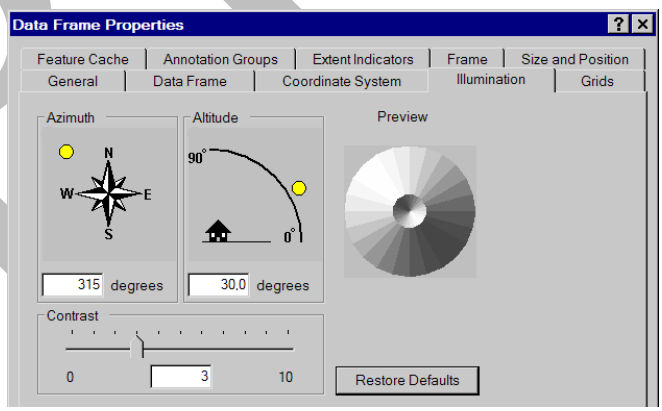


Рис. **3.1**

9. У програмі ArcCatalog робимо копію набору MainMosaic та називаємо її Mosaic_for_slope. Через локальне меню викликаємо для цього набору вікно з

властивостями і на вкладці Functions додаємо функцію Slope function (Ухил). Ця функція на основі існуючого растру, який описує висоти, генерує інший растр, комірки якого містять значення, які відповідають нахилам в окремих комірках вихідного рельєфу.

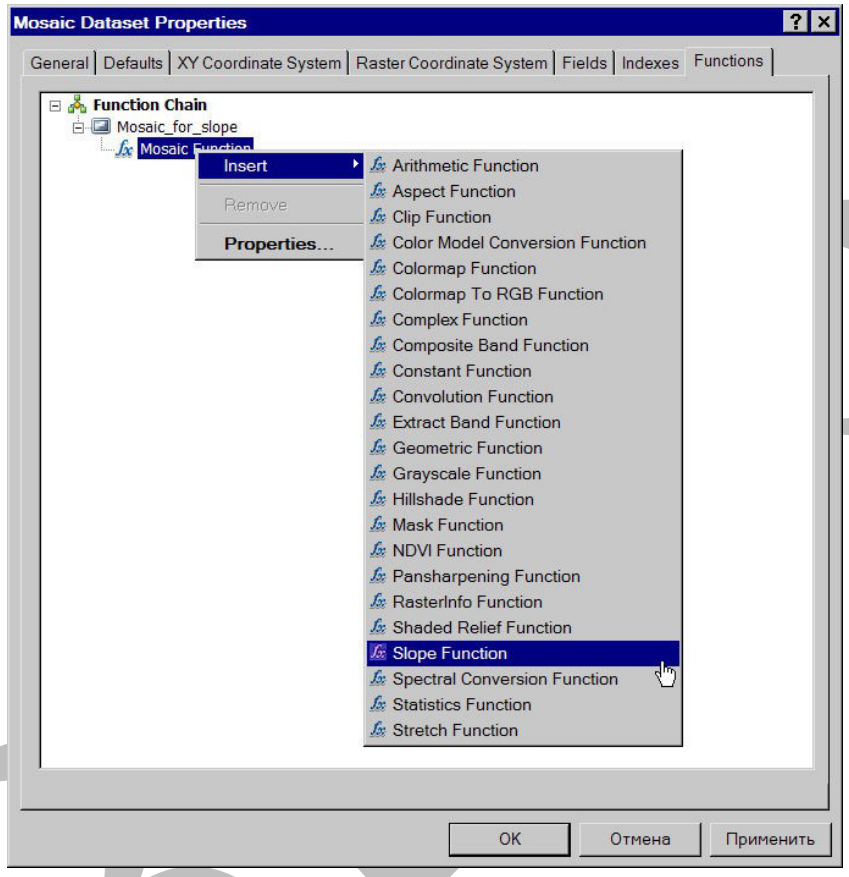


Рис. 3.10. Запуск функції Slope function (Ухил)

10. Переходимо у програму ArcMap та додаємо на карту дані з набору Mosaic_for_slope. Отримуємо зображення растру, який при відображенні на карті за допомогою кольору показує розподіл значень нахилу рельєфу.

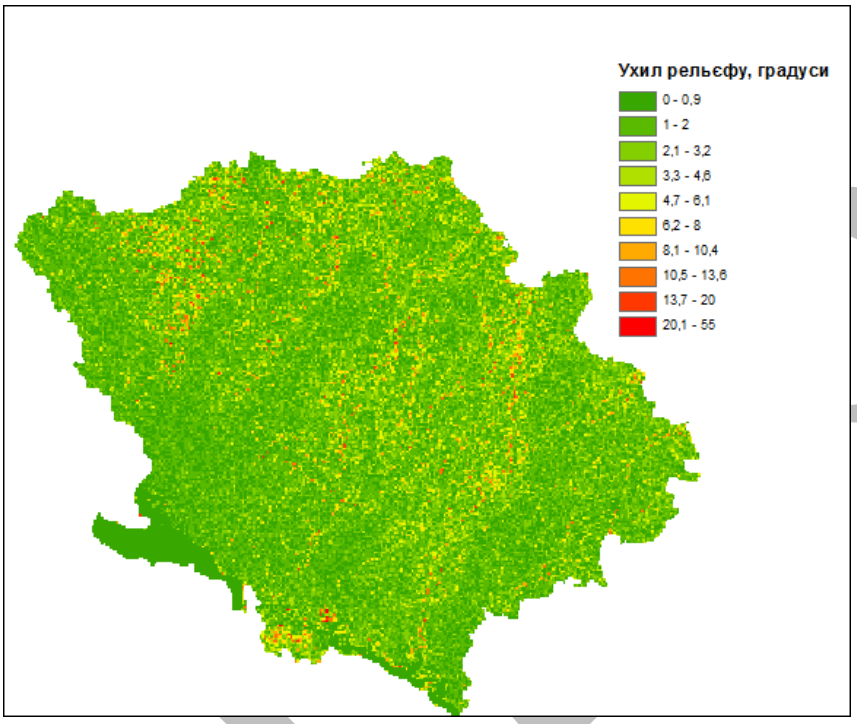


Рис. 3.11.Карта ухилу рельєфу в градусах

11. У програмі ArcCatalog робимо копію набору MainMosaic та називаємо її Mosaic_for_aspect. Через локальне меню викликаємо для цього набору вікно з властивостями і на вкладці Functions додаємо функцію Aspect function (Експозиція). Ця функція на основі існуючого растру, який описує висоти, генерує інший растр, комірки якого містять значення, які відповідають значенню експозиції в окремих точках вихідного рельєфа. В програмі ArcMap та додаємо на карту дані з набору Mosaic_for_aspect.

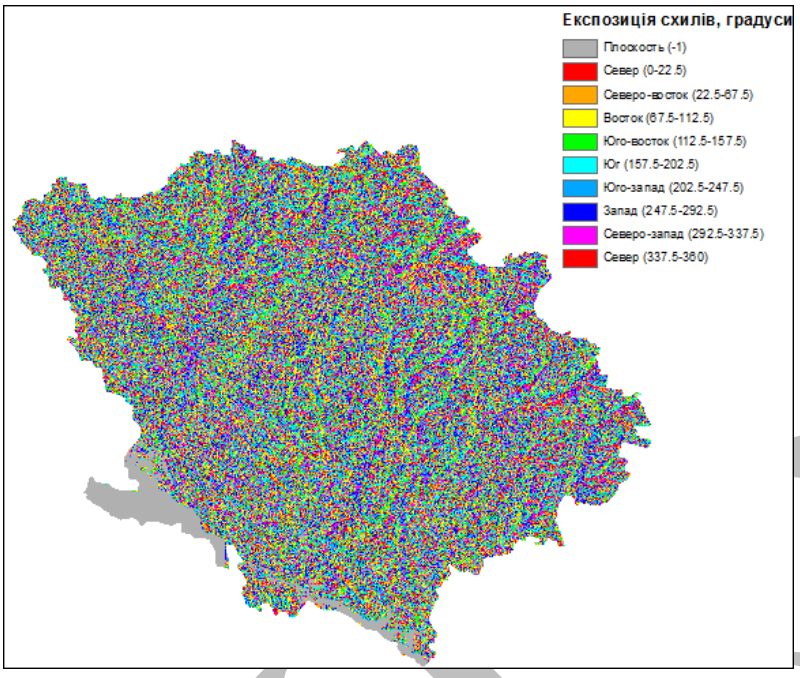


Рис. 3.12.Карта експозицій схилів

11. Запускаємо програму ArcScene. За допомогою кнопки  додаємо растровий шар, який створюється безпосередньо на основі файла Polta-?skaya_srtm.tif. У вікні настроювання властивостей відображення растру на вкладці Symbology виберемо настройки, як це показано на малюнку нижче.

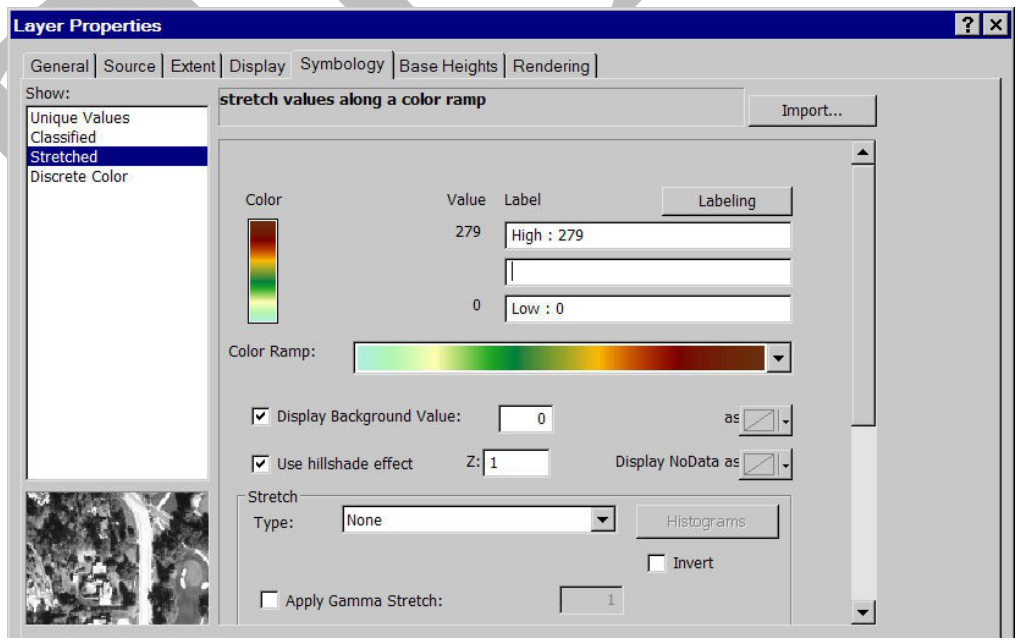


Рис. **3.2**

Крім того, на вкладці Base Heights вкажемо, що числові дані про значення висот потрібно брати безпосередньо з файлу Poltavskaya_srtm.tif, а також задамо множник для висот.

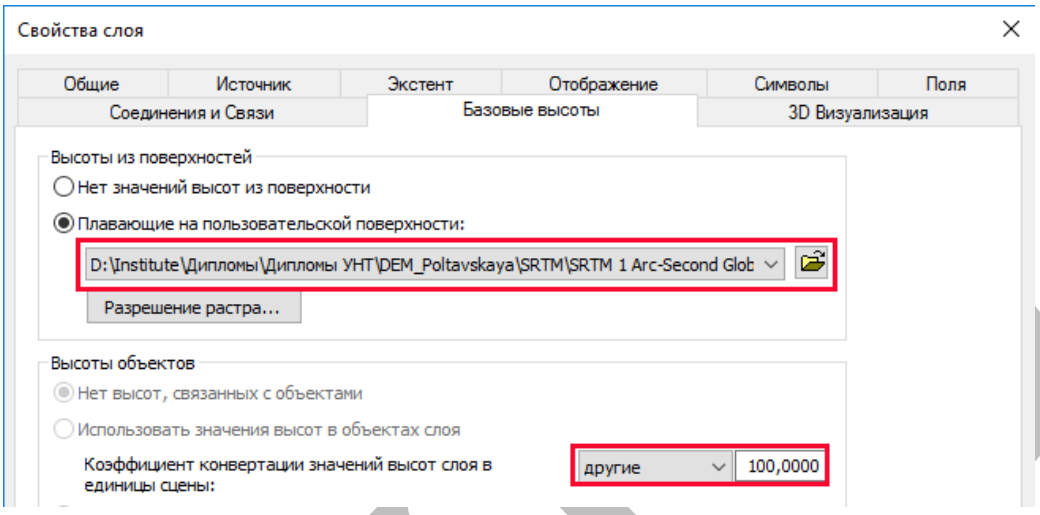


Рис. 3.14. Налаштування в ArcScene

Отримаємо зображення 3D-моделі рельєфу, нахиленої під певним кутом до спостерігача, на якій різні значення висот додатково відображаються псевдокольорами.

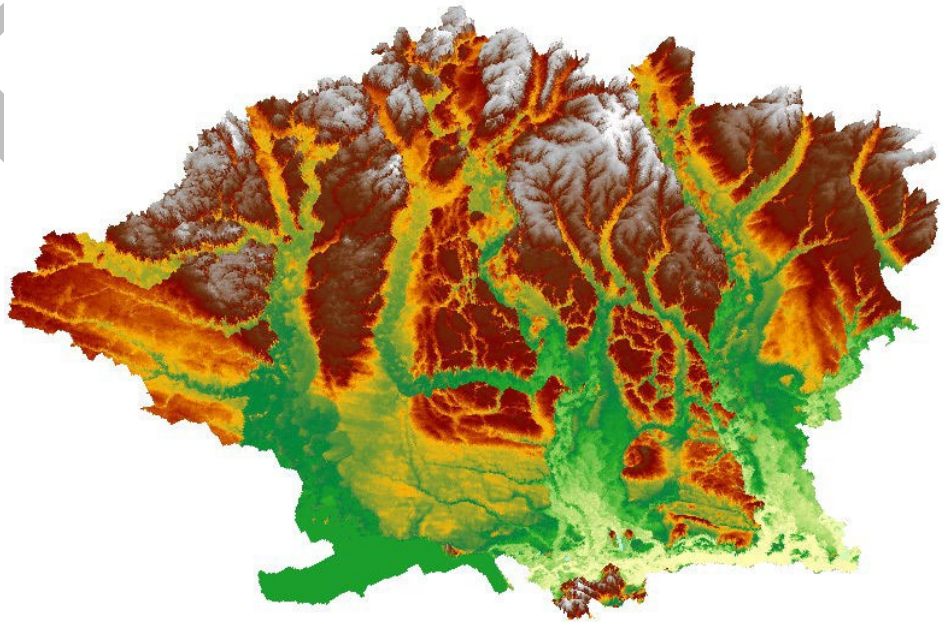


Рис. 3.15. ЦМР Полтавської області в ArcScene

3.3. Загальна характеристика програмного пакета **Surfer**

Геоінформаційна система Golden Software Surfer [62] в даний час є галузевим стандартом побудови графічних зображень функцій двох змінних. Перевагою цього програмного пакета є реалізовані в ньому алгоритми інтерполяції, які дозволяються з високою якістю створювати цифрові моделі поверхні по нерівномірно розподіленими в просторі даним. Незважаючи на досить гостру конкуренцію, програми фірми Golden Software (у першу чергу Surfer) продовжують залишатися дуже популярними як у США, так і в інших країнах. Посилання на них є майже в кожному науковому виданні або програмному продукті, пов'язаному із чисельним моделюванням і обробкою експериментальних даних.

Логіку роботи з пакетом можна представити у вигляді трьох основних функціональних блоків:

1) побудова цифрової моделі поверхні;

2) допоміжні операції із цифровими моделями поверхні;

3) візуалізація поверхні.

Цифрова модель поверхні традиційно представляється у вигляді значень у вузлах прямокутної регулярної сітки, дискретність якої визначається залежно від конкретного розв'язуваного завдання. Для зберігання таких значень Surfer використовує власні файли типу GRD (двійкового або текстового формату), які вже давно стали стандартом для пакетів математичного моделювання. Можливі три варіанти одержання значень у вузлах сітки:

1) за вихідним даними, заданими у довільних точках області (у вузлах нерегулярної сітки), з використанням алгоритмів інтерполяції двовимірних функцій;

2) обчислення значень функції, заданої користувачем у явному виді. До складу програми Surfer входить досить широкий набір функцій – тригонометричних, Бесселя, експонентних, статистичних і деяких інших;

ВІПЗ

3) перехід від однієї регулярної сітки до іншої, наприклад при зміні дискретності сітки (тут, як правило, використовуються досить прості алгоритми інтерполяції і згладжування, тому що вважається, що перехід виконується від однієї гладкої поверхні до іншої).

Крім того, можна використовувати готову цифрову модель поверхні, отриману користувачем, наприклад, у результаті чисельного моделювання.

Пакет Surfer пропонує користувачам багато алгоритмів інтерполяції: Крайгінг (Kriging), степінь зворотної відстані (Inverse Distance to a Power), мінімізація кривизни (Minimum Curvature), радіальні базові функції (Radial Basis Functions), поліноміальна регресія (Polynomial Regression), модифікований метод Шепарда (Modified Shepard's Method), тріангуляція (Triangulation) та ін. Розрахунок регулярної сітки може виконуватися для файлів наборів даних *X*, *Y*, *Z* будь-якого розміру, а сама сітка може мати розміри 10 000 × 10 000 вузлів. При цьому забезпечуються широкі можливості по керуванню методами інтерполяції з боку користувача. Зокрема, найбільш популярний в обробці експериментальних даних геостатистичний метод Криге включає можливість застосування різних моделей варіограм, використання різновиду алгоритму зі зносом, а також врахування анізотропії. При розрахунку поверхні та її зображення можна також задавати границю території довільної конфігурації.

В Surfer реалізований великий набір додаткових засобів перетворення поверхонь і різних операцій з ними:

- обчислення об’єму між двома поверхнями;
- перехід від однієї регулярної сітки до іншої;
- перетворення поверхні за допомогою математичних операцій з матрицями;
- розрізання поверхні (розрахунок профілю);
- обчислення площі поверхні;

ВПЗ

– згладжування поверхонь із використанням матричних або сплайн-методів;

– перетворення форматів файлів та ін.

Оцінку якості інтерполяції можна зробити за допомогою статистичної оцінки відхилень вихідних точкових значень від результуючої поверхні. Крім того, для будь-якої підмножини даних можна зробити статистичні розрахунки або математичні перетворення, у тому числі з використанням функціональних виразів, які задаються користувачем.

При побудові поверхні в основі роботи Surfer лежать наступні принципи:

1) одержання зображення шляхом накладання декількох прозорих і непрозорих графічних шарів;
2) імпорт готових зображень, у тому числі отриманих в інших додатках;
3) використання спеціальних інструментів малювання, а також нанесення текстової інформації і формул для створення нових і редагування старих зображень.

В Surfer як основні елементи зображення використовуються наступні типи карт.

1. Контурна карта (contour map). На додаток до звичайних засобів керування режимами виводу ізоліній, осей, рамок, розмітки, легенди та ін. є можливість створення карт за допомогою заливання кольором або різними візерунками окремих зон. Крім того, зображення плоскої карти можна обертати і нахиляти, використовувати незалежне масштабування по осях *X* та *Y*.

2. Тривимірне зображення поверхні: каркасна карта (wireframe map), тривимірна поверхня (surface map). Для таких карт використовуються різні типи проекції, при цьому зображення можна повертати і нахиляти, використовуючи простий графічний інтерфейс. На них можна також наносити лінії

ВГЗ

розрізів, ізоліній, встановлювати незалежне масштабування по осях *X*, *Y*, *Z*, заповнювати кольором або візерунком окремі сіткові елементи поверхні.

3. Карта вихідних даних (post map). Ці карти використовуються для зображення точкових даних у вигляді спеціальних символів і текстових підписів до них. При цьому для відображення числового значення в точці можна управляти розміром символу (лінійна або квадратична залежність) або застосовувати різні символи відповідно до діапазону даних. Побудова однієї карти може виконуватися за допомогою декількох файлів.

4. Карта-основа (base map). Це може бути практично будь-яке плоске зображення, отримане за допомогою імпорту файлів різних графічних форматів: AutoCAD (.DXF), Windows Metafile (.WMF), Bitmap Graphics (.TIF, .BMP, .PCX, .GIF, .JPG і деяких інших). Ці карти можуть бути використані не тільки для простого виведення зображення, але також, наприклад, для виведення деяких областей порожніми.

За допомогою різноманітних варіантів накладання цих основних видів карт, їхнього різного розміщення на одній сторінці можна одержати всілякі варіанти подання складних об'єктів і процесів. Зокрема, дуже просто одержати різноманітні варіанти комплексних карт зі сполученим зображенням розподілу відразу декількох параметрів. Всі типи карт користувач може відредагувати за допомогою вбудованих інструментів малювання самого Surfer. Всі ці можливості подання зображень можуть бути дуже корисні при порівняльному аналізі впливу різних методів інтерполяції або їхніх окремих параметрів на вигляд результуючої поверхні.

Отримані графічні зображення можна вивести на будь-який друкуючий пристрій, що підтримується ОС Windows. Двосторонній обмін даними і графікою з іншими Windows-додатками може виконуватися також через системний буфер обміну Windows.

ВНТУ

3.4. Візуалізація рельєфу Полтавської області в середовищі **Surfer**

Опишемо послідовність основних дій, які були виконані нами в середовищі Surfer для візуалізації рельєфу Полтавської області.

1. Спочатку побудуємо карту висот в ізолініях. Для цього виберемо команду меню Map → New → Contour Map, відкриємо файл Poltavskaya_srtm.tif. Здійснимо настройку зовнішнього вигляду контурів, як це показано на рисунку нижче. Зокрема, укажемо, що ізолінії відповідають значенням висот, рівномірно розподілених з кроком 20 м в інтервалі від 0 до 280 м.

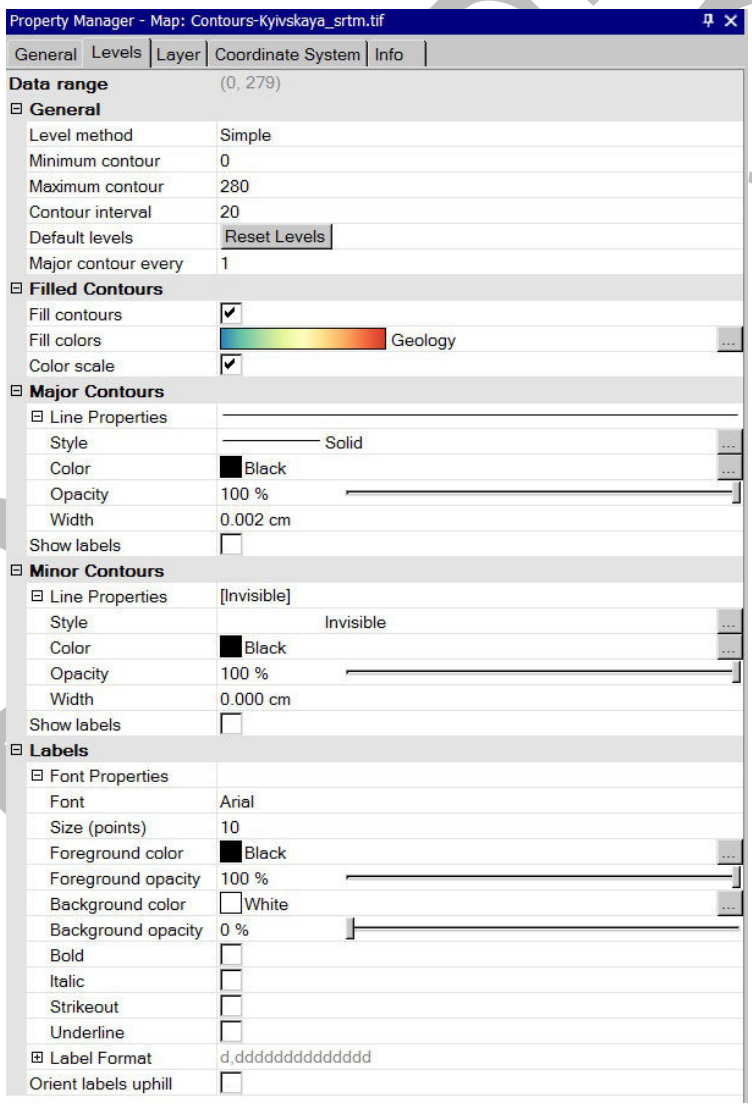


Рис. **3.3**

Результат побудови показано на рисунку нижче.

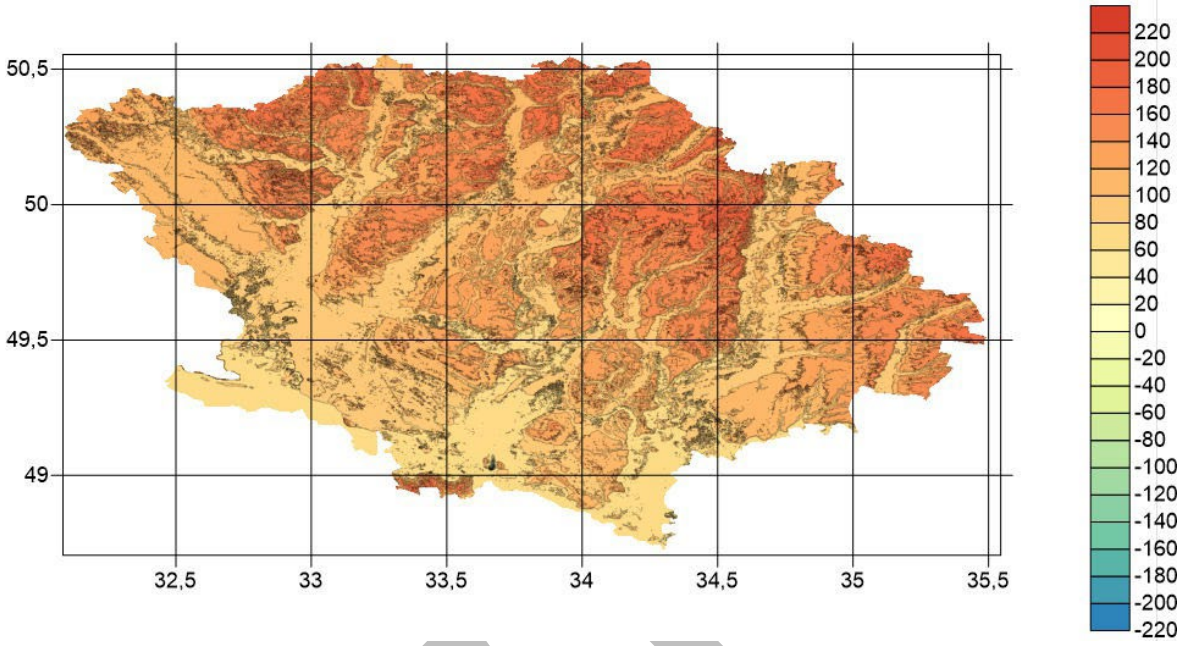


Рис.3.17. ЦМР Полтавської області в програмі Surfer

2. Побудуємо профіль рельєфу вздовж заданої лінії розрізу. Для цього у вікні карти активізуємо карту в ізолініях, а потім виберемо пункт меню Map → Add → Profile. Клацнемо мишкою в точці, якій відповідають координати на карті 50° півн.ш., 33° сх.д., тим самим вказавши початок лінії розрізу, а потім подвійним кліком на точці з координатами 50° півн.ш., 33,5° сх.д. позначимо кінець лінії розрізу, яка проходить вздовж паралелі.

В результаті отримаємо профіль висот вздовж заданої лінії розрізу. На діаграмі по вісі ординат відкладено значення висот, виражені в метрах, а по вісі абсцис – виражене в градусах зміщення відносно початкової точки вздовж лінії розрізу.

ВШ

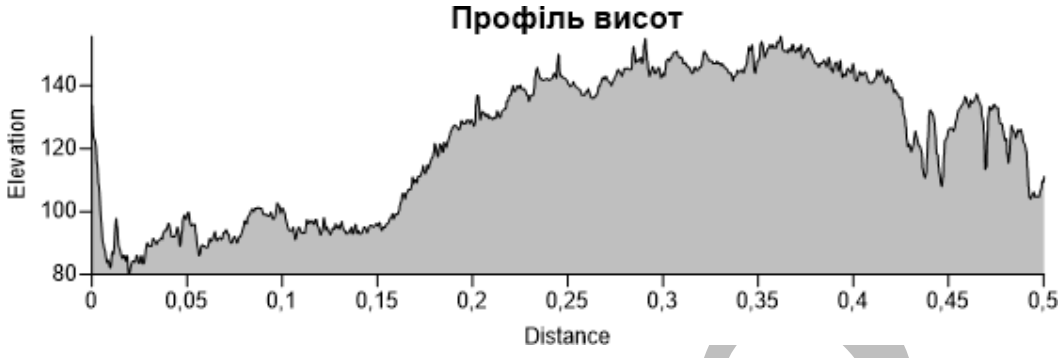


Рис. 3.18. Профіль висот в Surfer

ВПТ'3

Розділ 4. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ВЕЛИКИХ МАСИВІВ ДАНИХ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ, ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

4.1. Загальна характеристика лідарних даних та їх роль у моделюванні рельєфу

Лідарне (LiDAR) знімання є однією з найбільш сучасних та високоточних технологій отримання геопросторової інформації про земну поверхню. Принцип роботи полягає у вимірюванні часу проходження лазерного імпульсу від джерела до об’єкта та назад, що дозволяє отримувати тривимірні координати точок з високою точністю. У результаті формується **хмара точок**, яка містить мільйони або навіть мільярди елементів, що відображають особливості рельєфу, рослинності, інженерних споруд та інших об’єктів.

Особливістю лідарних даних є **велика щільність** (від 2–5 до 50–100 точок/м²) залежно від платформи) та **висока деталізація**, що забезпечує можливість створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з мінімальними похибками. Обсяг даних, отриманих у межах одного польоту або наземного знімання, може досягати десятків гігабайт, що потребує застосування спеціалізованих методів зберігання, обробки й аналізу.

Таким чином, лідарні технології стали важливою складовою сучасної геодезії, оскільки забезпечують можливість отримання точних та повних просторових моделей, необхідних для будівництва, кадастрів, моніторингу навколишнього середовища та управління територіями.

ВІТ

4.2 Особливості та виклики роботи з великими масивами лідарних даних

Обробка великих обсягів лідарної інформації пов’язана з низкою технічних та алгоритмічних проблем. До основних викликів належать:

1. **Висока обчислювальна складність**. Робота з мільйонами точок потребує значних ресурсів центрального та графічного процесорів. Стандартні методи аналізу, які застосовуються до звичайних геоданих, виявляються малоефективними.

2. **Необхідність фільтрації шумів**. У масиві точок завжди присутні помилкові вимірювання, викликані атмосферними явищами, відбиттями від дрібних об’єктів або похибками навігаційних систем.

3. **Складність класифікації точок**. Для побудови моделі земної поверхні важливо відокремити точки землі від рослинності, будівель та інженерних конструкцій. Це вимагає застосування адаптивних алгоритмів і машинного навчання.

4. **Потреба у стандартизованих форматах та оптимізації обсягів**. Найпоширенішими є формати LAS та LAZ, які забезпечують швидку обробку та стиснення без втрати якості.

Наявність цих викликів зумовлює необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення та компетентних методів аналізу.

Попередня обробка лідарних даних для моделювання земної поверхні. Формування цифрової моделі земної поверхні передбачає багатоступеневий процес попередньої обробки даних:

1. Перевірка якості та очищення даних. На цьому етапі проводять:

- вилучення помилкових точок;
- корекцію геометричних та радіометричних параметрів;

ВІЗ

- перевірку точності позиціювання платформи.

Фільтрація є критично важливою, оскільки навіть незначна кількість помилкових точок може суттєво спотворити модель рельєфу.

2. Класифікація хмари точок. Залежно від завдання виділяють такі класи:

- ґрунт,
- низька, середня та висока рослинність,
- будівлі,
- транспортні засоби,
- водні об’єкти.

Для автоматизації класифікації застосовують алгоритми розпізнавання рельєфу, наприклад Progressive Morphological Filter, Cloth Simulation Filter тощо.

3. Вирівнювання та геоприв’язка. Дані узгоджують з координатною системою, коригують згідно з GNSS/INS-навігацією, усувають систематичні зсуви, спричинені рухом носія.

4.3 Методи побудови моделі земної поверхні

1. Використання точок класу «земля»

Основою моделювання є точки, що відображають реальний рельєф, без впливу рослинності чи споруд.

2. Інтерполяція даних

Для перетворення точкової хмари на неперервну поверхню застосовують інтерполяційні методи:

- **TIN** (неприв’язана трикутна нерегулярна мережа) — забезпечує високу точність та гнучкість;

ВІТЗ

- **IDW** — метод зваженого інверсного відстаннього впливу;
- **Kriging** — статистичний підхід, що враховує просторові залежності між точками.

Вибір методу залежить від щільності точок, характеру рельєфу та необхідної точності.

3. Побудова цифрової моделі рельєфу та поверхні

- **Цифрова модель рельєфу (ЦМР)** — показує лише форму поверхні ґрунту.
- **Цифрова модель поверхні (ЦМП)** — включає всі об'єкти, які розташовані над рельєфом.

Лідарні дані дозволяють формувати обидві моделі з високою деталізацією.

Програмні рішення для обробки великих лідарних масивів.

Для обробки лідарних даних застосовуються такі програмні комплекси:

- **LAStools** — набір високоефективних інструментів для фільтрації, класифікації та стиснення.
- **ArcGIS Pro** — містить розвинуті засоби створення ЦМР та аналізу рельєфу.
- **QGIS та Плагін LiDAR Tools** — відкриті інструменти для первинної обробки.
- **CloudCompare** — потужний інструмент для візуалізації й аналізу хмар точок.
- **Global Mapper** — дає можливість працювати з великими масивами даних та здійснювати 3D-моделювання.

Застосування хмарних технологій та GPU-обчислень дозволяє значно прискорити обробку великих масивів.

ВІТЗ

4.4 Оцінка точності побудованої моделі земної поверхні

Після створення моделі проводять її перевірку за допомогою: контрольних геодезичних точок, порівняння з іншими джерелами даних (GNSS, фотограмметрія), статистичних показників (RMSE, стандартне відхилення).

На точність впливають: щільність хмари точок; рельєф місцевості; якість класифікації; параметри інтерполяції.

Правильна оцінка точності є обов'язковою умовою використання моделі у проєктних або аналітичних цілях.

ЦМР та ЦМП, отримані з лідарних даних, знайшли широке застосування у таких сферах: інженерні вишукування та будівництво; проектування транспортної інфраструктури; гідрологічний та ерозійний аналіз; моніторинг зсувних процесів; визначення меж земельних ділянок та кадастрові роботи; моделювання підтоплень, стоку води та схилових процесів; створення 3D-візуалізацій територій.

Висока точність та деталізація забезпечують можливість прийняття обґрунтованих рішень у сфері управління територіями та природокористування.

Аналіз показує, що великі масиви даних, отримані за допомогою лідарного знімання, є надзвичайно ефективним інструментом для моделювання земної поверхні. Технологія забезпечує високу точність, деталізацію та повноту інформації, що робить її незамінною у сучасних геодезичних та інженерних дослідженнях. Попри значні обчислювальні вимоги, сучасні програмні комплекси та алгоритми дозволяють ефективно обробляти великі хмари точок і формувати якісні цифрові моделі рельєфу. Перспективними напрямами подальшого розвитку є впровадження штучного інтелекту, хмарних обчислень та автоматизованих систем аналізу геопросторових даних.

ВІГЗ

ВИСНОВКИ

Розширений аналіз підтверджує, що лідарні дані є одним з найефективніших джерел інформації для моделювання земної поверхні. Незважаючи на складність роботи з великими масивами, сучасні обчислювальні методи дозволяють отримувати високоточні моделі рельєфу, що широко застосовуються у геодезії, будівництві, гідрології та екології.

Подальший розвиток технології LiDAR пов’язаний з використанням штучного інтелекту, автокласифікації, хмарних платформ та інтеграції з безпілотними апаратами.

У результаті виконання кваліфікаційної роботи магістра:

1. Охарактеризовано основні способи цифрового представлення рельєфу та методи його інтерполяції.

2. Описано особливості використання даних лазерного зондування, радарного знімання та аерофотознімання для побудови цифрових моделей рельєфу.

3. Охарактеризовано основні можливості програмних пакетів ArcGIS та Surfer щодо візуалізації та аналізу цифрових моделей рельєфу.

4. На прикладі Полтавської області за допомогою програмних пакетів ArcGIS та Surfer побудовано тривимірну карту рельєфу, карту рельєфу із затіненням, карту ухилів та експозиції рельєфу, карту в ізолініях, профіль висот вздовж заданого розрізу.

5. Проаналізовано використання великих масивів даних, отриманих за до помогою лідарного знімання, для побудови моделі земної поверхні.

ВІТЗ

Список використаних джерел

1. Балабанов, І. Т., Дмитрієв, О. В. Геоінформаційні системи та технології: навч. посібник. – Київ: Ліра-К, 2020. – 312 с.

2. Болюх, В. М., Пічкур, О. М. Лазерне сканування місцевості: технології та застосування. – Львів: Вид-во ЛНАУ, 2019. – 248 с.

3. Глотов, В. М., Самойленко, В. М. Основи дистанційного зондування Землі. – Київ: КНЕУ, 2018. – 296 с.

4. Гуцол, О. В. Обробка та аналіз лідарних даних у ГІС-середовищі: монографія. – Київ: НУБіП України, 2021. – 210 с.

5. Державна служба геодезії, картографії та кадастру. Методичні рекомендації щодо використання даних лазерного сканування. Київ, 2020. с.54

6. Jensen, J. R. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. – 2nd ed. – Pearson, 2018. – 784 p.

7. Vosselman, G., Maas, H.-G. (Eds.). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. – CRC Press, 2010. – 318 p.

8. Shan, J., Toth, C. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. – CRC Press, 2018. – 638 p.

9. Axelsson, P. Processing of laser scanner data—Algorithms and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 54(2–3), 138–147.

10. Petrie, G. Airborne Topographic Laser Scanning: Principles, Applications and Benefits. GeoInformatics, 2019, 22(5), 14–20.

11. Open Topography. LiDAR Data, Tools and Resources. – Access: https://opentopography.org (дата звернення: 2025).

12. LAStools Documentation. Rapid LiDAR Data Processing Toolkit. – Access: https://rapidlasso.com (дата звернення: 2025).

13. Esri. ArcGIS Pro: Working with LAS Datasets. – Esri Documentation Portal, 2024.

14. CloudCompare Team. CloudCompare Open-Source 3D Point Cloud Processing Software. – Documentation, 2024.

15. Moudrý, V., et al. Methods of LiDAR Data Processing for Digital Terrain Models: A Review. Remote Sensing, 2020, 12(18), 30–45.

16. Baltsavias, E. P. “Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas.” ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54(2), 1999, pp. 199–214.

17. Wehr, A., & Lohr, U. “Airborne Laser Scanning—An Introduction and Overview.” ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, 1999, pp. 68–82.

18. Гладкий, А. В. «Використання даних лазерного сканування для моделювання рельєфу». Геодезія, картографія і аерофотознімання, №89, 2019, с. 45–51.

19. Корнієнко, В. П., & Ляшенко, В. І. Сучасні методи лазерного сканування поверхні для завдань геомоніторингу. Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва, №2(42), 2020, с. 22–29.

20. Мазур, М. Т., & Слободян, О. М. Технологія LiDAR у дослідженнях рельєфу та природних процесів. Вісник геодезії та картографії, №4, 2020, с. 11–19.

21. Ніколаєв, В. Основи цифрового моделювання рельєфу. Київ: Основа, 2019.

ВШЗ

22. Педченко, М. Г., та ін. «Опрацювання великих масивів просторових даних у задачах моніторингу довкілля». Системи обробки інформації, №3, 2021, с. 34–41.

23. Шевчук, О. П. «Використання хмар точок LiDAR у кадастрових роботах». Землевпорядний вісник, №2, 2019, с. 58–65.

24. Liu, X. “Airborne LiDAR for DEM Generation: Some Critical Issues.” Progress in Physical Geography, 32(1), 2008, pp. 31–49.

25. Innovative Methods of Using Laser Scanning and Geoinformation Systems for Design of Communication Routes / Sergii Panchenko, Ievgeniia Ugnenko; Valentina Yurchenko, Elena Uzhviieva; Nataliia Sorochuk; Yevhen Korostelov / 12th International Conference “Environmental Engineering”, Transportation Science and Technology, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania, April 27–28, 2023, article number: enviro.2023.843, DOI: 10.3846/enviro.2023.843.

26. Geoinformation systems design of repairs of connection roads on the basis of laser scanning / Ievgeniia Ugnenko; Elena Uzhviieva; Nataliia Sorochuk; Valentina Yurchenko; Gintas Viselga // AIP Conference ProceedingsThis link is disabled., AIP Conf. Proc. 2684, 020012 (2023), DOI: 10.1063/5.0121327.

27. Використання методики лазерного сканування поверхні лінійних об’єктів при створенні проектів будівництва / Є.Б. Угненко, Н.І. Сорочук, О.Н. Ужвієва, Ю.О. Сорочук // Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Сучасні проблеми містобудування. Перспективи та пріоритети розвитку», Україна, м. Луцьк, ЛНТУ, 19 листопада 2021 р., Тези доповідей конференції, с.120-123.

28. Навчальна геодезична практика: Навч. посібник, 2-ге вид. / Угненко Є.Б., Шевченко А.О., Ужвієва О.М., Коростельов Є.М., Бєлікова Н.В., Сорочук Н.І. - Київ: Видавничий дім «Кондор», 2024. - 228 с.