

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ**

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

На правах рукопису

ЛАФЕТА ІВАН ФЕДОРОВИЧ

**МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ТРИВИМІРНИХ
ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ ЗАСОБАМИ ГІС**

Спеціальність: 193 Геодезія та землеустрій
Освітня програма Геодезія та землеустрій
Робота на здобуття першого (бакалаврського) освітнього рівня

Науковий керівник:
Іванчук Олег Михайлович
доктор технічних наук, професор

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ
Протокол №
засідання кафедри геодезії,
землевпорядкування і кадастру
Від . . 2025 р.

Завідувач кафедри
д.т.н., проф. А.В. Уль _____

ЛУЦЬК - 2025

Анотація

Лафета І.Ф. Методика побудови тривимірних цифрових моделей рельєфу засобами ГІС. Кваліфікаційна робота на правах рукопису. –ВНУ імені Лесі Українки, МОН України, Луцьк, –2025. -73 с.

У кваліфікаційній роботі досліджено методику побудови тривимірних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) із застосуванням сучасних геоінформаційних систем. Проаналізовано теоретичні основи представлення земної поверхні як поля висот та особливості растрових (GRID) і векторних (TIN) моделей рельєфу. Висвітлено принципи просторової інтерполяції геопросторових даних та різні алгоритми для створення ЦМР. Розглянуто фактори, що впливають на точність цифрових моделей рельєфу, включаючи джерела даних та методи їх обробки. Відпрацьовано технологію побудови 3D моделей на тестовій ділянці з використанням програмних продуктів ArcGIS та MapInfo Professional. Порівняльний аналіз показав переваги ArcGIS для створення деталізованих TIN-моделей та візуалізації складних 3D-сцен.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу, ГІС, ArcGIS, MapInfo, TIN, GRID, інтерполяція, точність ЦМР.

Annotation

Lafeta I.F. Methodology for constructing three-dimensional digital surface models by GIS. Qualification work on the rights of the manuscript. -Lesya Ukrainka National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lutsk, -2025. -73 с.

The qualification work investigates the methodology for constructing three-dimensional digital elevation models (DEMs) using modern geographic information systems. The theoretical foundations of representation of the earth's surface as a field of heights and features of raster (GRID) and vector (TIN) relief models are analyzed. The principles of spatial interpolation of geospatial data and various algorithms for creating DEMs are highlighted. The factors affecting the accuracy of digital elevation models, including data sources and methods of their processing, are considered. The technology for building 3D models on a test site using ArcGIS and MapInfo

Professional software products was developed. A comparative analysis showed the advantages of ArcGIS for creating detailed TIN models and visualizing complex 3D scenes.

Keywords: *digital elevation model, GIS, ArcGIS, MapInfo, TIN, GRID, interpolation, DEM accuracy.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. Цифрові моделі рельєфу у ГІС	8
1.1. Огляд сучасних гіс.....	8
1.2. Представлення земної поверхні як поля висот.....	13
1.3. Цифрові моделі рельєфу	18
1.4. Області застосування цифрових моделей рельєфу	28
РОЗДІЛ 2. Принципи побудови тривимірних зображень засобами комп'ютерної графіки	33
2.1. Растрові моделі.....	33
2.2. Векторні моделі.....	38
2.3. Інтерполяція геопросторових даних	41
РОЗДІЛ 3. Створення і візуалізація тривимірної моделі рельєфу тестової ділянки.....	48
3.1. Підготовка вихідних даних для побудови ЦМР.....	48
3.2. Створення та візуалізація тривимірних моделей рельєфу засобами ГІС: Моделі Grid та TIN, методи інтерполяції.....	53
3.3. Створення тривимірних поверхонь у MapInfo Professional.....	64
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

Вступ

Актуальність теми. Монітор комп'ютера або аркуш паперу, де відтворене тривимірне зображення місцевості, - це плоскі (двовимірні) поверхні. Відображення тривимірних об'єктів у комп'ютерній графіці відбувається за рахунок спеціальних перетворень двовимірних об'єктів, які зображаються під різними кутами, утворюючи грані багатовимірних фігур та зменшуються, створюючи ефект віддалення від точки спостереження. При створенні тривимірних об'єктів застосовуються декілька моделей растрової і векторної графіки. У геоінформаційних системах (ГІС) найбільшого поширення набули регулярна растрова модель GRID та нерегулярні моделі, коли зображення формується з трикутників (TIN) або багатокутників (полігони Тіссена, полігони Вороного).

Процес відображення тривимірної моделі на моніторі комп'ютера складається з двох стадій:

1) геометричних обчислень, в результаті яких відбувається апроксимація тривимірного об'єкту, що буде складатися зі згаданих трикутників, багатокутників або інших поверхонь;

2) процесу рендерингу – тобто візуалізації отриманих фігур на плоскій поверхні, заповнення їх кольором чи певною текстурою, розподіл яскравості за рівнем “освітленості”.

Велика кількість операцій зі створення тривимірних об'єктів, поверхонь, відтворення освітлення, текстури зображень тощо реалізовано у графічних бібліотеках Direct3D та OpenGL.

Сучасні ГІС мають достатньо розвинений апарат тривимірної графіки, що здатний з достатньою точністю відтворювати різноманітні тривимірні зображення, як от рельєф земної поверхні, топографічна ситуація з урахуванням висоти об'єктів, поверхні та об'єми верств та пластів у земних надрах тощо.

Практично кожна сучасна ГІС з розряду багатоцільових має у своєму розпорядженні вбудовані або додаткові модулі для створення тривимірних карт, просторового аналізу тривимірних величин (наприклад, об'ємів, проєктивних

покриттів) та операцій із цифровими моделями рельєфу (ЦМР). ArcInfo первісно створювався як пакет програм, де об'єкт описувався значеннями X, Y, Z (та m), таким чином в ньому чи не вперше була реалізована побудова тривимірних карт, система “вирощування” будівель з проекції площини і таке інше. Аналогічний за типом і часом створення модуль Virtual GIS дозволив виконувати аналогічні операції в ERDAS Imagine.

Згодом для багатоцільових ГІС середнього класу – ArcView та MapInfo – були розроблені модулі для тривимірного аналізу, які виявилися в деяких аспектах навіть функціональнішими та зручнішими порівняно із вище згаданими. Пакет 3D Analyst постачається як окремий модуль, що надбудовується над базовою версією ArcGIS. В ньому реалізована TIN-модель побудови тривимірних карт. Версії 3D Analyst під ArcGIS сучасних поколінь дозволяють ефективно працювати з ЦМР (DEM) – будувати карти крутизни схилів, експозиції, розраховувати покриття для систем радіозв'язку, зони затоплення тощо; разом із тим останні мають поліпшені можливості для відображення будівель різної висоти та обрисів, дерев та інших об'єктів місцевості, що зазвичай використовуються при створенні 3D-моделей місцевості крупного масштабу при проектно-вишукувальних роботах, у містобудуванні, ландшафтній архітектурі.

Модулі для створення 3D-зображень у MapInfo – канадський Vertical Mapper та Surface використовуються принципово іншу схему побудову растрових зображень на основі традиційного для MapInfo ґриду (MIG – MapInfo GRID). За можливостями обидва модулі на даному етапі поступаються 3D Analyst, проте все ж таки мають деякі вигідні особливості і не такі вибагливі до системних ресурсів. Явний недолік тривимірних ГІС для MapInfo, принаймні на даному етапі, – неможливість створювати тривимірні зображення будівель, інших інженерних споруд, дерев тощо різної висоти або ж “сажати” їх на поверхню землі, як це реалізовано у пакетах ESRI чи CAD.

Побудова тривимірних моделей як експонованого, так і “підземного” рельєфу (тобто поверхонь і підшів пластів) неодмінно включаються до функцій цільових гірничо-геологічних ГІС, наприклад, GemCom, Geo Xmap тощо.

Об’єкт дослідження – сучасний інструментарій прикладних геоінформаційних систем для побудови тривимірних моделей рельєфу.

Предмет дослідження - методи побудови тривимірних моделей рельєфу засобами ГІС.

Мета дослідження – дослідити методику побудови тривимірних моделей рельєфу засобами ГІС.

Мета цієї роботи передбачає виконання наступних **завдань**:

- проаналізувати ефективність алгоритмів комп’ютерної графіки, які використовуються у ГІС при створенні тривимірних моделей рельєфу;
- порівняти інформативність, функціональність та хоча б у першому наближенні оцінити точність тривимірних моделей рельєфу, що створюються на основі растрових і векторних моделей, описаних вище;
- відпрацювати технологію побудови 3D карт на ділянці з різко розчленованим і великою різноманітністю форм рельєфу, на основі використання програмних продуктів "ArcGIS/3D Analyst" та "MapInfo"/"Surface".

Методи дослідження — методологія дослідження базується на наукових досягненнях, які мають фундаментальне і прикладне значення для вирішення поставлених завдань і забезпечують комплексний погляд на проблеми землеустрою.

Практичне значення одержаних результатів – встановлені особливості побудови тривимірних цифрових моделей рельєфу можуть бути корисними як в наукових дослідженнях так і в практичній діяльності на виробництвах.

Структура і обсяг роботи - Випускна кваліфікаційна робота складається із вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 29 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 74 сторінки основного тексту, у тому числі 1 таблиця та 12 рисунків

РОЗДІЛ 1. ЦИФРОВІ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ У ГІС

1.1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГІС

Визначення геоінформаційних систем (ГІС) [1–4] зустрічаються як у географічній, так і в комп'ютерній літературі, часто звучать на конференціях та стали звичними для фахівців різних галузей. Відомо чимало варіантів цих визначень, оскільки нерідко намагаються одним реченням охопити всю суть ГІС. Якщо ж дати спрощене пояснення, то ГІС — це комп'ютерні системи, які відображають об'єкти двовимірного й тривимірного простору та забезпечують їхній аналіз.

Отже, ГІС можна визначити як системи, призначені для обробки географічних даних. Їх важливою особливістю є здатність одночасно працювати з різними наборами просторової інформації, які організовуються у вигляді тематичних шарів. Це дає змогу комплексно аналізувати, наприклад, рельєф, геологічну будову та геофізичні характеристики при пошуку корисних копалин, або ж враховувати рельєф, ґрунти й наявну забудову під час землевпорядних робіт.

Ще 12–15 років тому переважна більшість ГІС (близько 95%) обмежувалися двовимірними моделями. Проте зі зростанням обчислювальних потужностей почали з'являтися, а згодом і активно впроваджуватися тривимірні ГІС. Іноді вживається термін «2,5-вимірна ГІС», що означає відображення об'єктів, для яких у плані (X, Y) координати визначаються точно, а по вертикалі (Z) кожній точці призначається лише одне фіксоване значення. Це обмеження не дозволяє коректно моделювати складні форми — наприклад, будинок з двосхилим дахом або гору з гострим піком, тоді як плоскі дахи чи вершини передаються достовірно.

Сучасні тривимірні ГІС здатні детально відтворювати об'єкти будь-якої складності: рельєф місцевості, архітектурні споруди, інженерні конструкції, елементи інфраструктури тощо. Важливо розуміти, що тривимірна ГІС відрізняється від віртуальних тренажерів і симуляторів (як у комп'ютерних

іграх), оскільки кожен об'єкт у ГІС має географічні координати, прив'язаний до реальної місцевості, пов'язується з базами даних і дозволяє поєднувати просторову інформацію з реальними топографічними особливостями — западинами, пагорбами, долинами тощо.

На початкових етапах розвитку тривимірного картографування кількість ГІС, здатних працювати з 3D-візуалізацією, була досить обмеженою [5]. Першим успішним проектом у цій сфері став модуль Virtual GIS, створений для відомого програмного комплексу ERDAS Imagine. Розробники прагнули розширити можливості своєї системи для обробки растрових геоприв'язаних зображень, зокрема ортофотопланів і супутникових карт.

Незабаром два лідери світового ринку геоінформаційних технологій [6] — компанії ESRI та MapInfo Corp. — представили власні рішення для тривимірного моделювання: відповідно модулі 3D Analyst для ArcView та Vertical Mapper для MapInfo. Російські розробники також не залишилися осторонь: у системі ГІС «Панорама» з'явився функціонал для створення 3D-моделей. Однак більш вдалим продуктом для тривимірної візуалізації стала програма Surface — російськомовний аналог Vertical Mapper, який забезпечував роботу як з растровою, так і з векторною графікою [7].

На території України для моделювання рельєфу вже давно застосовується популярне програмне забезпечення Surfer, розроблене компанією Golden Software. Хоча цей продукт і не належить до класичних ГІС, його активно використовують завдяки потужним інструментам для аналізу просторових даних. Спочатку Surfer працював виключно з прямокутними координатними сітками, проте з виходом нових версій функціонал значно розширився. Програма пропонує широкі можливості чисельного аналізу та математичної статистики, які використовуються й під час тривимірної візуалізації. Водночас відображення інших елементів геосистем, окрім цифрових моделей поверхні, у Surfer реалізоване обмежено.

Найбільш потужним і комплексним рішенням для тривимірного моделювання залишається ArcInfo — система, яка однаково ефективно працює

як із 2D, так і з 3D об'єктами. Проте висока вартість ліцензії (від 8000 до 15000 доларів США) робить її малодоступною для пересічних користувачів. З огляду на це, компанія ESRI випустила спрощену версію своєї системи — ArcView (у складі пакету ArcGIS / ArcView 9.2), доповнивши її тривимірним модулем 3D Analyst, вартість якого становить близько 1000 доларів. Це рішення стало більш прийнятним для широкого кола користувачів.

Етапи створення тривимірних ГІС наведено на табл.1.

Таблиця 1

Етапи створення тривимірних ГІС, їх характеристики та особливості

Етап	Програмний продукт / компанія	Основні характеристики	Примітки
Початковий етап (1990-ті рр.)	Virtual GIS (ERDAS Imagine)	Перший модуль для 3D-візуалізації растрових геоданих (ортофотоплани, супутникові знімки)	Спрямований на розширення функцій роботи з растровими даними
Кінець 1990-х – початок 2000-х	3D Analyst (ESRI), Vertical Mapper (MapInfo Corp.)	Інструменти для тривимірного аналізу поверхні та побудови моделей рельєфу	Інтеграція в популярні ГІС-платформи (ArcView, MapInfo)
2000-ні	Surface (російськомовний аналог Vertical Mapper)	Підтримка 3D-візуалізації з використанням як растрової, так і векторної графіки	Орієнтований на регіональний ринок СНД
2000-ні – сучасність	Surfer (Golden Software)	Потужні інструменти для аналізу цифрових моделей рельєфу з елементами 3D-візуалізації	Не є класичною ГІС, популярний серед інженерів та геологів
Сучасні рішення	ArcInfo (ESRI)	Повнофункціональна ГІС без поділу на 2D і 3D об'єкти, високоточна просторова аналітика	Висока вартість ліцензії (8000–15000 \$)
Доступні альтернативи	ArcView з модулем 3D Analyst (ESRI)	Доступніший варіант тривимірного аналізу для користувачів з обмеженим бюджетом	Вартість пакета ~1000 \$
Етап розвитку веб-ГІС (2010-ті – сучасність)	ArcGIS Online (ESRI), Cesium, Google Earth, Mapbox	Веб-платформи для інтерактивної 3D-візуалізації просторових даних, робота в браузері без встановлення локального ПЗ	Висока доступність, інтеграція з хмарними сервісами, підтримка 3D Tiles, віртуальна та доповнена реальність

У процесі нашої роботи ми використали тривимірний модуль, інтегрований у сучасні ГІС-платформи. Його можливості щодо побудови цифрового рельєфу та 3D-картографування докладно розглянуті у розділах 3–5. Основна функція модуля — моделювання тривимірних об'єктів, таких як будівлі, на основі підкладок у вигляді цифрових моделей рельєфу (ЦМР), ортофотопланів або супутникових знімків високої роздільної здатності. Створену 3D-сцену можна масштабувати, обертати, змінювати кут огляду.

Практичне використання сучасних ГІС-модулів (наприклад, ArcGIS Pro 3.x [8–10] або QGIS 3.36 з підтримкою 3D-візуалізації) на обладнанні середнього рівня (16-32 ГБ ОЗП, відеокарти серії NVIDIA RTX або AMD Radeon RX) показує, що системи здатні обробляти десятки тисяч тривимірних об'єктів одночасно. Продуктивність візуалізації забезпечується на рівні 30–60 кадрів за секунду при роздільній здатності Full HD та вище.

У тривимірному моделюванні традиційно застосовуються регулярні та нерегулярні моделі рельєфу. GRID-моделі (регулярні растрові сітки) зберігають значення висот у вузлах сітки, тоді як TIN (Triangulated Irregular Network) будується з нерегулярних трикутників, що детальніше описують складний рельєф. Усі інші об'єкти сцени задаються у векторній формі з координатами X, Y, Z для кожної вершини.

У сфері тривимірної картографії досі залишаються актуальними продукти від ESRI. Їхня сучасна платформа ArcGIS Pro інтегрує модуль 3D Analyst, що дозволяє створювати і аналізувати тривимірні сцени, цифрові моделі поверхні, візуалізувати будівлі, ландшафти, інженерні об'єкти. На відміну від попередніх поколінь, нинішні версії забезпечують роботу з великими наборами даних, включаючи лазерне сканування (LiDAR) та фотограмметрію.

Розробник MapInfo [11–13], компанія Precisely (раніше — Pitney Bowes), також пропонує засоби тривимірної візуалізації. Продукт MapInfo Pro v2023 має інтеграцію з модулем Vertical Mapper, що нині виконує функції аналізу висот, побудови ізоліній та просторового аналізу, проте в плані тривимірної візуалізації він істотно поступається платформам від ESRI чи Bentley Systems. Наприклад,

пряме моделювання 3D-об'єктів типу будівель або дерев залишається обмеженим.

Водночас модуль Surface Analysis (попередник модуля Vertical Mapper) був значно вдосконалений, отримав підтримку інтерполяції за алгоритмами Делоне, побудову TIN- і Вороного-полігонів, що дозволяє відтворювати детальні цифрові моделі поверхні. Проте такі рішення більше орієнтовані на аналіз рельєфу, ніж на повноцінну 3D-візуалізацію складних об'єктів.

Для аналізу рельєфу та побудови тривимірних моделей продовжують широко використовувати програму Surfer 25 від Golden Software. Хоча цей пакет формально не є ГІС, його функціонал для роботи з цифровими моделями рельєфу, інтерполяцією даних та візуалізацією 3D-поверхонь залишається актуальним завдяки простоті використання і потужному математичному апарату.

Одним із найпотужніших рішень у сфері тривимірної візуалізації геопросторових даних є розробка компанії Leica Geosystems (Hexagon) — модуль ERDAS IMAGINE Virtual Explorer (сучасна назва наступника Virtual GIS). Від аналогічних рішень, таких як 3D Analyst від ESRI чи Vertical Mapper для MapInfo, ця платформа вирізняється високою продуктивністю рендерингу та деталізацією тривимірних сцен.

Основна перевага ERDAS Virtual Explorer полягає в здатності інтерактивно працювати з великими обсягами просторової інформації. Це стосується як високодеталізованих ортофотопланів, супутникових або аерознімків, накладених на цифрову модель рельєфу (ЦМР), так і векторних даних, імпортованих з середовищ ArcGIS Pro або інших ГІС-систем. Особливістю рішення є можливість інтегрувати складні 3D-об'єкти, розроблені в програмах типу Autodesk 3ds Max чи Blender, без втрати якості та прив'язки до місцевості.

На відміну від інших продуктів, які застосовують базові текстурні заливки для поверхонь (наприклад, Vertical Mapper або базовий 3D Analyst), ERDAS використовує реалістичну драпірування супутниковими знімками та

фотоматеріалами з високою роздільною здатністю, забезпечуючи правдоподібне візуальне сприйняття рельєфу та об'єктів.

Разом з тим, подібний рівень деталізації вимагає суттєвих апаратних ресурсів. Сучасні версії Virtual Explorer орієнтовані на робочі станції, обладнані відеокартами серій NVIDIA RTX A5000/6000 або AMD Radeon Pro, з обсягом відеопам'яті від 16 ГБ, а також з не менш ніж 32–64 ГБ оперативної пам'яті. В минулому, до 2000-х років, такі системи встановлювалися виключно на професійних графічних станціях, але сьогодні їх уже можна використовувати й на потужних персональних комп'ютерах.

Тривимірні геоінформаційні системи активно застосовуються не лише у сфері геодезії, картографії чи дистанційного зондування, а й в архітектурному проектуванні, урбаністиці, інженерній геології, екомоніторингу, плануванні інфраструктури та навіть економічному моделюванні територій. Основою більшості таких 3D-карт залишається цифровий рельєф, поверх якого накладаються тематичні шари й тривимірні об'єкти.

Особливості застосування сучасних тривимірних ГІС для побудови цифрових моделей рельєфу, а також порівняння можливостей різних програмних рішень будуть детально розглянуті у наступних розділах.

1.2. ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЯК ПОЛЯ ВИСОТ

Для відображення рельєфу земної поверхні в геоінформаційних системах та картографії широко використовуються числові проекції, які ґрунтуються на ортогональному проектуванні об'єктів на площину, що вважається базовою (основною). При цьому об'єкти проєктуються променями, перпендикулярними до цієї площини, в результаті чого формується їх двовимірне зображення. Третій вимір — висотна відмітка або абсолютна висота — фіксується у вигляді числових значень для кожної проєктованої точки.

У випадку моделювання рельєфу третім виміром виступає висота H , яка однозначно визначається своїм значенням у точках із заданими плановими

координатами (x, y) . Таким чином, висота поверхні розглядається як функція двох змінних:

$$H = H(x, y) \quad (1.1)$$

Класичними прикладами числових проекцій є батиметричні карти, де позначаються глибини за результатами промірів, та топографічні карти, на яких рельєф відображається через горизонталі — лінії рівної висоти, що з'єднують точки з однаковими числовими відмітками. Фактично, горизонталь є проекцією на площину лінії місцевості, всі точки якої мають однакову висоту над базовим рівнем.

Метод ізоліній (горизонталей) використовується й для візуалізації інших скалярних полів — температури, тиску, густини тощо. Скалярними величинами називають такі фізичні або математичні параметри, для опису яких достатньо вказати числове значення та знак. Область, у межах якої кожній точці відповідає певне значення такої величини, називається скалярним полем.

З певними припущеннями цифрову модель рельєфу можна також трактувати як скалярне поле, де кожній точці $M(x, y)$ ставиться у відповідність значення висоти H . Таким чином, висота розглядається як функція положення точки:

$$H = H(M). \quad (1.2)$$

Оскільки координати точки M задаються парою планових координат (x, y) , можемо записати:

$$M = M(x, y)$$

$$H = H(M) = H(x, y).$$

Отже, вирази (1.1) та (1.2) є математично еквівалентними. Такий підхід дозволяє інтерпретувати аналіз рельєфу як дослідження скалярного поля.

Основи цього підходу до моделювання рельєфу ще у 1932 році заклали вчений П.К. Соболевський. Він ввів поняття топографічної поверхні як особливого класу поверхонь, які можна аналізувати методами теорії полів [14]. Для можливості застосування математичних методів, така поверхня має

задовольняти певним вимогам гладкості та безперервності, що гарантують коректність її моделювання як функції від координат.

Перша умова полягає в тому, щоб кожній крапці M поля, або кожній парі значенні планових координат x, y , відповідало одне й тільки одне значення вертикальної координати H . Це є умову однозначності рівнянь (1.1) або (1.2). Поверхня землі підкоряється цій умові всюди, за винятком нависаючих обривів, ніш і печер.

Топографічна поверхня характеризується кількома важливими властивостями, що визначають її структуру та можливість аналізу із застосуванням методів теорії поля.

Умова неперервності вимагає, щоб при незначному переміщенні по поверхні в горизонтальній площині (від точки з координатами x, y до нескінченно близької точки $x + dx, y + dy$) зміна вертикальної координати (H) також була нескінченно малою (dH). Іншими словами, на ідеальній топографічній поверхні відсутні раптові "стрибки" висоти. Однак, реальна земна поверхня може порушувати цю умову, наприклад, у глибоких карстових проваллях або на крутих урвищах. У таких місцях точки, що мають однакові планові координати, можуть відповідати суттєво різним висотам (наприклад, брівка та підосва обриву).

Умова скінченності означає, що абсолютні значення висот на топографічній поверхні не можуть прямувати до нескінченності. Це виключає існування гір необмеженої висоти або бездонних западин. Земна поверхня повністю відповідає цьому обмеженню – усі висоти є скінченними величинами.

Умова плавності передбачає відсутність на топографічній поверхні гострих зламів або різких змін нахилу. Це означає, що функція, яка описує поверхню, повинна бути диференційованою, а її перші похідні — неперервними. На практиці земна поверхня не завжди ідеально гладка; порушення цієї умови спостерігаються на виразних брівках уступів, гострих гребенях хребтів або на дні V-подібних тальвегів.

Попри ці локальні відхилення, у більшості випадків земна поверхня, за винятком окремих ліній і точок, відповідає критеріям топографічної поверхні. Це дозволяє ефективно застосовувати до її вивчення методи теорії поля. Розглянемо, зокрема, визначення ухилу поверхні, використовуючи ці підходи.

Виберемо довільну точку M на поверхні та розглянемо пряму, що проходить через неї у певному напрямку l . Якщо обрати іншу точку M_1 , розташовану дуже близько до M у напрямку l , то відношення зміни висоти функції поля H (при переході від M до M_1) до відстані між цими точками (MM_1), коли ця відстань прямує до нуля, називається похідною функції H за напрямком l (1.3):

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \lim_{MM_1 \rightarrow 0} \frac{H(M_1) - H(M)}{MM_1} \quad (1.3)$$

Використання часткової похідної пояснюється тим, що через будь-яку точку можна провести безліч прямих у різних напрямках, і для кожного такого напрямку функція висоти матиме свою похідну.

Серед усіх можливих напрямків існує один, де висота змінюється з найбільшою швидкістю. Цей напрямок перпендикулярний (нормальний) до горизонталей (ізоліній висот), оскільки саме в цьому напрямку горизонталі розташовані найщільніше, а зміна висоти на одиницю відстані є максимальною. Похідна функції поля у напрямку її найшвидшої зміни (тобто за нормаллю $\vec{n}$ до ізоліній) називається градієнтом функції поля (1.4):

$$\text{grad } H = \frac{\partial H}{\partial n} \quad (1.4)$$

Градієнт функції поля $H(x, y)$ виконує ту саму функцію, що й звичайна похідна $\frac{dH}{dx}$ для функції однієї змінної $H(x)$. Для поля висот градієнт вказує напрямок найстрімкішого зростання висоти, що протилежно напрямку найбільшого скату. Таким чином, ухил лінії найбільшого скату є градієнтом висоти, взятим з протилежним знаком:

$$i = -\text{grad } H$$

Важливо розуміти, що градієнт поля, а відповідно й ухил земної поверхні, є векторною величиною. Для їх повного опису необхідно вказати не лише

числове значення (модуль), але й напрямок. Наприклад, для визначення ухилу лінії найбільшого скату потрібно знати не лише величину зміни висоти вздовж цієї лінії, а й точний напрямок цього скату.

Подібно до того, як для опису руху об'єкта, наприклад, репера на активному зсуві чи льодовику, недостатньо знати лише його швидкість у числових одиницях (скажімо, метрах на рік), необхідно також вказувати напрямок цього руху. Це пояснюється тим, що швидкість є векторною величиною, і навіть для сусідніх точок на об'єкті напрямок та/або величина швидкості можуть суттєво відрізнятися.

Висота точки земної поверхні, суворо кажучи, також є векторною величиною, оскільки вона визначається вздовж напрямку сили тяжіння Землі. Однак, оскільки напрямок цих силових ліній вважається відомим (приблизно вертикальним), для практичного визначення висоти достатньо вказати її числове значення та знак (додатне для висоти над рівнем відліку, від'ємне для глибини). Таким чином, на відміну від швидкості зміщення, поле висот зазвичай розглядається як скалярне поле.

На відміну від висоти, ухил поверхні в кожній точці є суто векторною характеристикою. Він має не тільки величину (крутизну), але й напрямок (найстрімкішого спаду). Отже, сукупність ухилів по всій поверхні утворює векторне поле. Історично графічним способом зображення цього поля на картах слугували гашюри — короткі штрихи, товщина яких передавала величину ухилу (тобто модуль градієнта висоти), а напрямок вказував на лінію найбільшого скату.

Методи теорії поля можуть бути ефективно застосовані для аналізу поля висот, особливо коли дані представлені у вигляді горизонталей на картах. Однак, найглибший аналіз та моделювання можливі, коли рельєф представлений в аналітичній формі, тобто за допомогою математичних функцій $H = H(x, y)$, що описують висоту як функцію планових координат. Сучасні підходи включають апроксимацію земної поверхні за допомогою різних математичних моделей та поліномів, що дозволяє описувати рельєф будь-якої складності.

Зазвичай, описуючи рельєф рівнянням $H = H(x, y)$, ми розглядаємо його як стаціонарне поле висот, тобто таке, що не змінюється з часом. Проте в дійсності земна поверхня є динамічною і з часом змінює свої обриси внаслідок геологічних процесів, ерозії, накопичення осадів тощо. Таким чином, поле висот є нестаціонарним полем, де висота залежить не лише від просторових координат x, y , а й від часу t (1.5):

$$H = H(x, y, t) \quad (1.5)$$

Зображення нестаціонарного поля висот традиційно здійснюється за допомогою серії топографічних карт на різні моменти часу $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, отриманих у результаті повторних зйомок. Кожна така карта є графічним відображенням функції $H(x, y)$ для конкретного моменту часу t_i .

Диференціювання рівняння $H = H(x, y, t)$ за часом дає змогу визначити швидкість вертикального переміщення поверхні в кожній точці:

$$\frac{\partial H}{\partial t}$$

У теорії поля доведено, що похідна від скалярного поля (яким є поле висот H) по скалярній змінній (часу t) також є скалярним полем. Отже, рівняння $\frac{\partial H}{\partial t}$ описує скалярне поле швидкостей вертикальних рухів земної поверхні. Прикладами графічного зображення таких полів є карти ізоліній швидкостей тектонічних піднять чи опускань, інтенсивності ерозії чи акумуляції, а також осідань.

1.3. ЦИФРОВІ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ

Просторова організація первинних даних про рельєф, що по суті є сукупністю точок з визначеними висотними позначками (Z -координатами), може бути надзвичайно різноманітною. Розташування цих точок залежить від методів та технологій їх збору, і може бути як регулярним (упорядкованим), так і нерегулярним (довільним), а також структурованим, що відображає особливості форм рельєфу.

З урахуванням сучасних технологій отримання та обробки геопросторових даних, можна виділити такі типові просторові структури вихідних даних про рельєф [15]:

1. Нерегулярно розподілені точки: Характерні для традиційних польових зйомок (наприклад, тахеометрія, GNSS-вимірювання окремих точок), а також при оцифруванні окремих висотних відміток зі сканованих карт. Розподіл точок може бути довільним або частково структурованим, якщо зйомка велася з урахуванням ключових форм рельєфу (наприклад, по лініях тальвегів, вододілів).

2. Точки у вузлах регулярних сіток: Отримуються при виконанні площинного нівелювання по заздалегідь визначеній регулярній сітці (квадратній, прямокутній) або як результат автоматизованої обробки деяких типів даних (наприклад, регулярний зразок з автоматизовано отриманих висот).

3. Точки, впорядковані вздовж ліній: Цей тип даних виникає при оцифруванні горизонталей (ізогіпс) з карт, польових зйомках по профілях або маршрутах, а також є типовим для даних лазерного сканування (Lidar), отриманих з повітряних чи наземних платформ, або даних супутникової альтиметрії, де точки збираються вздовж треків супутника.

4. Щільні, часто нерегулярно розподілені хмари точок: Генеруються сучасними методами, такими як повітряне або наземне лазерне сканування (Lidar) та фотограмметрія з використанням технології Structure from Motion (SfM) за аеро- або космознімками. Ці набори даних є дуже деталізованими, але потребують подальшої обробки для класифікації та формування поверхні.

5. Точки, пов'язані зі структурними лініями рельєфу: Це можуть бути точки, що визначають положення ліній перегину схилів (брівки, підосви), вододілів, тальвегів, що є критично важливими для точного моделювання форм рельєфу, особливо при побудові TIN-моделей (Triangulated Irregular Network).

Таким чином, вихідні набори даних можуть мати нерегулярне розміщення (довільні польові точки), нерегулярне, але пов'язане зі структурою рельєфу

(точки на структурних лініях), регулярно розміщені вздовж ліній (оцифровані горизонталі, профілі) або регулярно розміщені у вигляді сітки.

На основі цих первинних даних створюються Цифрові Моделі Рельєфу (ЦМР), широко відомі як Digital Elevation Models (DEM). Це цифрове представлення поверхні Землі у вигляді масиву значень висот або глибин. ЦМР може бути представлена у растровому форматі (регулярна сітка пікселів, кожен з яких зберігає значення висоти) або векторному форматі (наприклад, нерегулярна трикутна сітка - TIN, або набір ізоліній).

Часто розрізняють Цифрові Моделі Місцевості (ЦММ) або Digital Terrain Models (DTM). Тоді як ЦМР може включати висоти над рівнем моря над рослинністю чи забудовою (Surface Model), ЦММ зазвичай представляє чисту земну поверхню (bare earth), виключаючи будівлі, дерева та інші об'єкти. ЦММ також часто включає додаткову інформацію про структурні лінії рельєфу (лінії водотоків, гребені, перегини схилів), що покращує її топологічну точність.

Традиційно, карти були одним із головних масових джерел даних для побудови ЦМР. Топографічні карти для суші та батиметричні карти для акваторій містять ізолінії (горизонталі, ізобати), висотні та глибинні відмітки, а також інші умовні знаки, що відображають мікрорельєф (яри, обриви, насипи, скелі, карстові форми). Типовий процес створення ЦМР з карти полягає в оцифруванні горизонталей, відміток та структурних елементів рельєфу з подальшою інтерполяцією для створення регулярної сітки висот або TIN-моделі.

Однак, у сучасному світі роль даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) як первинного джерела для створення ЦМР/ЦММ неухильно зростає, тоді як частка традиційних карт як основного джерела для великомасштабного моделювання зменшується. Це зумовлено низкою технічних та технологічних факторів:

- Значне підвищення просторової роздільної здатності знімків (аерофотознімків, супутникових оптичних та радарних даних) до метра і навіть десятків сантиметрів.

- Широке розповсюдження доступних цифрових фотограмметричних робочих станцій та програмного забезпечення, включаючи рішення на базі персональних комп'ютерів.
- Розвиток нових методів отримання висотної інформації, таких як інтерферометрія (зокрема, радарна інтерферометрія - InSAR) та, особливо, активні методи, як лазерне сканування (Lidar), що здатне проникати крізь рослинність і надавати дані безпосередньо про поверхню землі.
- Поява спеціалізованих супутникових місій для створення глобальних ЦМР високої точності (наприклад, SRTM, ASTER, TanDEM-X, Copernicus DEM).
- Активне використання безпілотних літальних апаратів (дронів) з фотокамерами або лідарами для детальної зйомки невеликих територій та створення надзвичайно точних ЦМР/ЦММ за технологією SfM або Lidar.

Незважаючи на ці переваги, дані дистанційного зондування та процедури їх обробки також мають певні обмеження. В умовах щільної міської забудови або густих лісових масивів (особливо при використанні оптичних або деяких радарних даних), автоматизовано отримана модель часто відображає поверхню будівель або полог лісу (що є моделлю поверхні об'єктів - DSM, Digital Surface Model), а не власне рельєф землі (bare earth DTM). Це вимагає значної ручної або напівавтоматичної постобробки для фільтрації та класифікації точок (наземні, рослинність, будівлі) та побудови істинної ЦММ. Аерозйомка та високоточні наземні вимірювання також продовжують використовуватися для контролю якості та верифікації ЦМР, отриманих з інших джерел.

Таким чином, хоча роль традиційних карт як єдиного чи головного джерела для створення нових ЦМР/ЦММ у великих масштабах зменшується на користь ДЗЗ, вони залишаються цінним джерелом для:

- Оцифрування історичних даних про рельєф.
- Отримання даних для територій з обмеженим покриттям ДЗЗ або для специфічних завдань.

- Вилучення структурних елементів рельєфу (гідрографія, лінії перегину), які часто точніше відображені картографами.
- Використання вже існуючих цифрових топографічних карт.

На загальногеографічних картах рельєф традиційно зображується комплексною системою засобів: основними є горизонталі (ізолінії рівних висот), доповнені висотними відмітками для ключових точок (вершини, сідловини, точки перегину). Крім того, для кращого візуального сприйняття та відображення деталей рельєфу використовуються умовні знаки (точкові, лінійні, площинні), що позначають специфічні форми: яри, вимоїни, обриви, вали, насипи, скелі, карстові воронки, кургани, полігони, льодовики тощо. Вся ця інформація є цінною для побудови максимально точних та деталізованих цифрових моделей рельєфу та місцевості.

Хоча топографічні карти історично були одним із головних джерел інформації для створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) і мають значні переваги завдяки повноті покриття та стандартизації, вони також мають низку притаманних їм недоліків, що впливають на точність та якість похідних цифрових моделей.

Одним із ключових обмежень є сам спосіб зображення рельєфу за допомогою горизонталей (ізогіпс). Існує внутрішнє протиріччя між двома основними функціями горизонталей: бути суто математичними лініями рівних висот і одночасно слугувати засобом візуально правильної, географічно достовірної передачі форм рельєфу. Важливо бачити в горизонталях не лише математичні лінії, а й елементи, що "малюють" форми рельєфу – плавні для м'яких обрисів, звивисті чи нерівні для різких. Правила картографічного складання та редагування карт часто наголошують на необхідності зберігати або навіть підкреслювати ці "морфологічні" властивості малюнка горизонталей, що може призводити до навмисних зміщень їх метрично точного положення заради наочності та пластичності зображення.

Баланс між метричною точністю та пластичністю (наочністю) зображення рельєфу горизонталями неоднаковий для карт різних масштабів. Для великомасштабних топографічних карт (наприклад, 1:10 000, 1:25 000) пріоритетом є забезпечення можливості точного визначення абсолютних та відносних висот. Однак, навіть на цих масштабах допускається певне зміщення горизонталей для узгодження з іншими елементами карти та кращої передачі форм рельєфу. З переходом до середніх та дрібних масштабів (від 1:100 000 і дрібніше) головним завданням стає правильне відображення географічної подібності топографічних форм, їх загальної конфігурації, а не точне метричне положення кожної горизонталі. Генералізація зображення рельєфу зростає, акцент зміщується на виявлення характерних рис морфології та ступеня розчленування рельєфу різних типів. Це означає, що дрібномасштабні загальногеографічні карти масштабу 1:500 000 і дрібніше, як правило, непридатні для створення детальних та метрично точних ЦМР.

По-друге, як і будь-який інший елемент картографічного зображення, горизонталі на карті проведені з певною точністю, яка нерівномірна по всій площі карти і залежить від складності рельєфу, методу зйомки та генералізації. Принципово важливо, що самі нормативні документи картографування визначають карту як нерівноточну в частині зображення рельєфу. Відповідно, і ЦМР, побудована на її основі шляхом оцифрування та інтерполяції, успадкує цю нерівномірну точність, до того ж до неї додадуться похибки процесу аналогово-цифрового перетворення (наприклад, похибки ручного чи автоматизованого оцифрування, похибки інтерполяції).

По-третє, окрім основних горизонталей (проведених через стандартний інтервал висот), топографічні карти можуть містити додаткові (наприклад, на половині основного інтервалу) та допоміжні горизонталі (на довільній висоті). Додаткові горизонталі, як правило, мають таку ж метричну точність, як і основні. Однак допоміжні горизонталі проводяться на нестандартних висотах і повинні бути підписані своїм числовим значенням. Якщо ці підписи відсутні або

нерозбірливі, автоматизоване включення таких горизонталей у процес побудови ЦМР стає неможливим без ручного коригування.

По-четверте, топографічні карти не містять детального зображення рельєфу дна внутрішніх водоймів (озер, водосховищ) або морських/океанічних акваторій, якщо це не спеціалізовані батиметричні карти. У типовому випадку акваторії на топографічній карті позначаються лише контуром урізу води. При створенні ЦМР це часто призводить до спрощеного представлення водойм як "плоскої" поверхні на одній висоті. Можливі також розбіжності у відмітках урізів води на суміжних аркушах карти, що вимагає процедур узгодження для забезпечення безперервності цифрової моделі.

Нарешті, існують графічні обмеження самого картографічного зображення. Фізична товщина лінії горизонталі та мінімально допустима відстань між ними на папері обмежують можливість детального відображення рельєфу на крутих схилах. При високій крутизні схилу горизонталі розташовуються настільки щільно, що на карті вони зливаються в суцільну лінію. Картографічні інструкції допускають штучне злиття горизонталей або їх "укладку" (штучне збільшення відстані між ними) для збереження читабельності карти. З точки зору створення ЦМР, обидва ці прийоми є "шкідливими": область злиття в цифровій моделі інтерпретується як вертикальна "стінка" (що може спричинити топологічні помилки), а штучно розсунуті горизонталі спотворюють справжню крутизну та форму схилу. Ці графічні артефакти, особливо виражені в середньогір'ї та високогір'ї, можуть значно знизити точність ЦМР порівняно з її нормативними показниками.

З огляду на ці недоліки, програмне забезпечення для створення ЦМР шляхом оцифрування горизонталей повинно мати вбудовані механізми контролю геометричної та топологічної коректності вхідних даних. Зокрема, необхідно перевіряти, щоб:

1. Горизонталі (як однойменні, так і різнойменні) не перетиналися та не зливалися (крім випадків навмисного злиття, що потребує спеціальної обробки).

2. Кожна горизонталь утворювала замкнену лінію або завершувалася виключно на межі картографічного зображення (наприклад, рамці карти).

Дотримання цих умов є критично важливим для уникнення топологічних помилок (наприклад, "складок" або розривів поверхні) у цифровій моделі рельєфу, отриманій на основі картографічних джерел.

Незважаючи на ці обмеження, топографічні карти залишаються цінним джерелом даних, особливо для архівних ЦМР, територій з обмеженим покриттям сучасними даними ДЗЗ, а також для вилучення структурних ліній рельєфу, які є важливими для побудови високоякісних ЦММ.

Недоліки топографічних карт у детальному та метрично точному зображенні рельєфу виключно горизонталями можуть бути частково нівельовані за рахунок інших графічних елементів, присутніх на карті. Ці елементи використовуються для відображення деталей рельєфу та специфічних форм, які або недостатньо виразні на горизонталях, або взагалі не можуть бути ними показані через графічні чи змістовні обмеження.

Наприклад, топографічні карти містять широкий спектр умовних знаків для природних та штучних форм рельєфу. До них належать:

- Висотні відмітки: Точні цифрові значення висоти окремих точок (вершин, сідловин, точок перегину схилів, перехресть доріг тощо). Ці точки є надзвичайно важливими як опорні при побудові ЦМР, оскільки надають точні значення висот у конкретних локаціях.
- Відмітки зрізів води: Вказують абсолютну висоту рівня води у водоймах, що є критично важливим для моделювання гідрографічної мережі та прилеглих низовин.
- Знаки ярів, промоїн, обривів, осипів, скель: Відображають різкі форми рельєфу. Для ярів та обривів іноді вказується їхня глибина або висота.
- Знаки карстових вирв, курганів, териконів, насипів, виїмок: Представляють локальні форми рельєфу, як природного, так і антропогенного походження.

Ці додаткові елементи, особливо висотні відмітки та знаки з кількісними характеристиками (глибина ярів), а також ті, що вказують на структурні лінії (обриви, брівки), можуть суттєво покращити загальну метричну характеристику рельєфу, отриману з горизонталей. Їхнє врахування при побудові структурних ЦМР або Цифрових Моделей Місцевості (ЦММ), які інтегрують інформацію про характерні лінії та точки рельєфу (так звані "breaklines" та "spot heights"), дозволяє створити точнішу та морфологічно правильнішу модель, ніж модель, побудована лише на основі горизонталей.

Однак, у випадках, коли рельєф є дуже складним і схематично зображений на карті (наприклад, високогірні райони з льодовиками, фірновими полями, скелями та обривами, де горизонталі можуть бути фрагментарними або повністю заміщені умовними знаками), навіть сукупність усіх картографічних елементів може бути недостатньою для створення якісної та достовірної ЦМР. У таких ситуаціях необхідне залучення первинних некартографічних джерел, зокрема сучасних даних дистанційного зондування Землі, як-от високоточна аерофотозйомка, дані повітряного чи наземного лазерного сканування (Lidar), або радіолокаційної інтерферометрії (InSAR).

Точність є однією з найважливіших характеристик якості ЦМР. Її можна оцінювати двома основними способами:

1. Порівняння з "умовно-істинним" еталоном: Цей підхід передбачає оцінку точності ЦМР шляхом порівняння висот у вибіркових контрольних точках (положення та висота яких визначені за допомогою більш точних методів, наприклад, високоточного GNSS-вимірювання або нівелювання) зі значеннями висот, отриманими з ЦМР у цих же точках. На основі цих відхилень розраховуються статистичні показники, такі як середньоквадратична похибка (СКП або RMSE - Root Mean Square Error), медіана похибок, максимальні відхилення тощо. Отримані значення порівнюються зі стандартами якості для ЦМР.

2. Оцінка релевантності задачам ("Fitness for Purpose"): Цей підхід полягає у визначенні, наскільки ЦМР придатна для вирішення конкретних аналітичних

завдань, для яких вона створюється (наприклад, гідрологічне моделювання, аналіз видимості, планування інженерних комунікацій). Якщо результати аналізу, виконаного на основі ЦМР, відповідають вимогам поставленої задачі, модель вважається достатньо точною для цього застосування.

Обидва підходи є корисними як на етапі проєктування нової ЦМР (для визначення вимог до джерел даних та технології), так і при оцінці можливостей використання вже існуючої моделі. Важливо пам'ятати, що ЦМР, як будь-яка модель, не є абсолютною "істиною", але до неї цілком застосовне поняття придатності для використання (працездатності) – тобто її здатності забезпечувати отримання достовірних результатів для конкретних цілей.

1.3.1. Фактори, що впливають на точність ЦМР

Інтегральна (підсумкова) точність ЦМР є результатом дії багатьох чинників, серед яких основними є [16–18]:

- Масштаб та вік карти, метод її створення (польова зйомка, фотограмметрія, генералізація), точність вимірювань у польових умовах, роздільна здатність та тип сенсора ДЗЗ, точність фотограмметричної обробки або лідарного сканування. Це, як правило, найбільш значущий фактор.
- Якщо використовуються аналогові джерела (наприклад, паперові карти), процес оцифрування (ручне трасування, автоматизована векторизація сканованого зображення) вносить додаткові похибки, пов'язані з якістю сканування, роздільною здатністю, алгоритмами векторизації та суб'єктивним фактором оператора.
- При перетворенні набору розрізнених або лінійно впорядкованих висотних відміток (наприклад, оцифрованих горизонталей, точок польової зйомки, лідарної хмари точок) у регулярну растрову сітку або TIN-модель застосовуються алгоритми інтерполяції. Вибір алгоритму (IDW, Kriging, сплайни тощо) та його параметрів суттєво впливає на точність та достовірність змодельованої поверхні, особливо між вихідними точками/лініями.

- Растрове представлення (регулярна сітка) або векторне (TIN) по-різному зберігають та відображають інформацію про рельєф. Роздільна здатність растра (розмір комірки) або щільність та топологія TIN також прямо впливають на деталізацію та точність моделі.
- Складність рельєфу (крутизна, розчленованість, амплітуда) має значний вплив на похибку ЦМР. Як правило, на рівнинних ділянках точність вища, ніж на схилах, а на складних, сильно розчленованих територіях досягти високої точності складніше. Взаємозв'язок між морфологічними типами рельєфу та інтегральною точністю ЦМР досі не досліджений повною мірою, що є певним недоліком у методології створення та використання ЦМР.

Незалежно від первинного джерела даних та специфіки їх отримання, в сучасних геоінформаційних системах (ГІС) дані про рельєф найчастіше представляються в одному з двох основних форматів: растровому (як регулярна сітка висот) або векторному (як нерегулярна трикутна мережа TIN або набір ізоліній). Вибір формату залежить від конкретних завдань аналізу та візуалізації. Детальний опис цих форматів та методів їх отримання виходить за рамки даного розгляду.

1.4. ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ

Наявність готової цифрової моделі рельєфу (ЦМР) є фундаментом для вирішення надзвичайно широкого спектра наукових, прикладних та інженерних завдань. Це досягається завдяки потужному функціоналу, інтегрованому в сучасні повнофункціональні геоінформаційні системи (ГІС) та спеціалізоване програмне забезпечення для просторового аналізу. Модулі обробки ЦМР у складі цих програмних продуктів забезпечують виконання різноманітних аналітичних та візуалізаційних операцій [19, 21, 23]:

1. Розрахунок та аналіз морфометричних характеристик:

- Кут нахилу (крутизна) схилу: Визначення швидкості зміни висоти на одиницю відстані, що є ключовим показником для оцінки ерозійних процесів, планування будівництва, сільського господарства тощо.
- Експозиція (орієнтація) схилу: Розрахунок напрямку найбільшого спаду, що важливо для аналізу освітленості (інсоляції), вітрової експозиції, визначення зон видимості та моделювання мікроклімату.
- Кривизна поверхні: Аналіз вигнутості рельєфу (профільна та планова кривизна). Ці показники допомагають ідентифікувати ділянки концентрації або розсіювання поверхневого стоку, прискорення чи уповільнення потоку води, що є важливим для гідрологічного та геоморфологічного аналізу.
- Інші похідні показники: Розрахунок більш складних морфометричних індексів, таких як площа водозбору, фактор довжини та крутизни схилу (LS-фактор для ерозійного моделювання), топографічний індекс вологості (TWI) тощо.

2. Виділення структурних елементів рельєфу та гідрологічний аналіз:

- Автоматизована генерація мережі водотоків (тальвегів) та ліній вододілів.
- Визначення меж водозбірних басейнів (водозборів) різних порядків.
- Моделювання напрямку та акумуляції поверхневого стоку.
- Ідентифікація особливих точок та ліній рельєфу (піки, сідловини, лінії перегину схилів), що порушують його плавність і відіграють ключову роль у формуванні стоку та морфології.

3. Обчислення об'ємів:

- Визначення об'ємів земляних робіт (об'єми виїмки та насипу) при проєктуванні інженерних споруд, плануванні кар'єрів, будівництві доріг тощо.
- Розрахунок об'ємів води у водоймах при заданому рівні, що використовується в гідрології та управлінні водними ресурсами.
- Оцінка змін об'ємів рельєфу шляхом порівняння ЦМР, створених на різні моменти часу (наприклад, для моніторингу зсувів, ерозії, змін льодовиків).

4. Візуалізація та представлення рельєфу:

- Побудова профілів: Створення графіків зміни висоти вздовж довільної прямої або ламаної лінії, що дозволяє візуалізувати вертикальний розріз місцевості за певним маршрутом.
- Аналітична відмивка (Hillshade): Генерація затінених зображень рельєфу, що імітують освітлення поверхні джерелом світла з певним азимутом та висотою. Це один із найефективніших способів наочного відображення форм рельєфу, який широко використовується у картографії та для візуального аналізу.
- Тривимірна візуалізація: Створення об'ємних моделей рельєфу (наприклад, блок-діаграм, каркасних моделей), що дозволяє сприймати рельєф у трьох вимірах. Можливе накладання (драпірування) на поверхню ЦМР ортофотопланів, супутникових знімків, карт або інших геозображень для створення фотореалістичних 3D-сцен. Сучасні ГІС підтримують інтерактивну 3D-навігацію та віртуальну реальність.
- Генерація ізоліній: Побудова горизонталей або інших ізоліній (наприклад, ізобат) за даними ЦМР з бажаним інтервалом, що є важливим для створення або оновлення контурних карт.

5. Просторовий аналіз на основі рельєфу:

- Аналіз видимості (Viewshed Analysis): Визначення ділянок території, видимих з однієї або декількох заданих точок спостереження (наприклад, розташування веж мобільного зв'язку, оглядових майданчиків, планування маршрутів з певною вимогою до видимості).
- Аналіз придатності території: Використання похідних морфометричних показників (крутизна, експозиція, кривизна) для визначення ділянок, придатних для певних видів діяльності (сільське господарство, будівництво, розміщення об'єктів відновлюваної енергетики, екологічне зонування).

- Моделювання природних процесів: ЦМР є базовим шаром для моделей ерозії ґрунтів, зсувів, лавин, затоплень (гідрологічне та гідравлічне моделювання), розповсюдження забруднень, міграції тварин тощо.

6. Перетворення та маніпуляції з даними ЦМР:

- Інтерполяція: Побудова ЦМР з розріджених даних або збільшення деталізації (зменшення розміру комірки) існуючої моделі.
- Ресемплінг: Зміна просторової роздільної здатності растрової ЦМР (як на збільшення, так і на зменшення).
- Зміна системи координат: Перетворення ЦМР між різними геодезичними датурами та проєкціями.

7. Використання ЦМР в обробці зображень:

- Ортотрансформування: Корекція геометричних спотворень на аеро- та космічних знімках, спричинених рельєфом місцевості та перспективою зйомки, для створення геометрично точних ортофотопланів. ЦМР є обов'язковим компонентом цього процесу.

Таким чином (рис. 1.1), цифрові моделі рельєфу та інтегровані в ГІС інструменти їх аналізу становлять потужний комплекс для всебічного вивчення земної поверхні, моделювання природних процесів, просторового планування та вирішення складних інженерних завдань у найрізноманітніших галузях.



Рис. 1.1. Можливості застосування цифрових моделей рельєфу в ГІС

РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТРИВИМІРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ

2.1. РАСТРОВІ МОДЕЛІ

У геоінформаційних системах (ГІС) існує два основних підходи до цифрового представлення географічного простору загалом та рельєфу земної поверхні зокрема [1, 9]. Один з цих підходів — растровий метод, який базується на квантуванні (дискретизації) простору. Суть методу полягає у розбитті досліджуваної території на безліч невеликих, але чітко визначених елементів (комірок або елементів растра), кожен з яких охоплює певну ділянку земної поверхні.

Теоретично, елементи растра можуть мати різноманітну геометричну форму, наприклад, бути трикутними чи шестикутними. Головна вимога полягає в тому, щоб ці елементи могли щільно прилягати один до одного, повністю покриваючи картографовану область без пропусків і накладань, і утворювати суцільну поверхню. Однак на практиці найбільш зручними та широко використовуваними елементами є прямокутники, а ще частіше – квадрати, які називають растровими комірками (grid cells) або пікселями (особливо в контексті зображень).

У стандартних растрових моделях усі комірки мають однаковий розмір. Це спрощує структуру даних та алгоритми обробки. Однак існують і варіації растрового представлення, де розмір комірок може змінюватися залежно від деталізації інформації (наприклад, у структурах даних типу квадродерева), але в даному контексті ми зосереджуємося на моделях з однорідним розміром комірок.

Ключовою характеристикою растрової моделі, що відрізняє її від векторної, є те, що вона не зберігає точної інформації про геометричні координати об'єктів у класичному розумінні. Географічний простір тут дискретний, поділений на комірки кінцевого розміру. Натомість, ми оперуємо з окремими растровими комірками, які містять певне значення або представляють наявність об'єкта на своїй площі.

Це своєрідна зміна просторової розмірності: об'єкти, які в реальності можуть не мати розмірів (точки) або бути одновимірними (лінії), представляються двовимірними елементами – растровими комірками. Точка представляється коміркою, в яку вона потрапляє. Лінія зображується як послідовність суміжних комірок, що перетинаються цією лінією, а область – як набір комірок, що повністю або частково потрапляють у її межі. Таке представлення ліній та меж областей має "східчастий" або "блочний" вигляд через дискретність растра.

У растрових системах існують два основні способи пов'язування атрибутивної інформації з просторовим положенням (растровими комірками):

1. Присвоєння значення атрибута безпосередньо комірці: Це найпростіший та найпоширеніший підхід. Кожна растрова комірка зберігає одне значення, яке представляє характеристику території, що покривається цією коміркою (наприклад, абсолютну висоту, тип ґрунту, значення температури, код класу рослинності). У випадку рельєфу, кожна комірка може зберігати значення висоти над рівнем моря. Цей метод ефективний для представлення неперервних або тематичних полів, але кожна комірка може зберігати лише одне значення атрибута одночасно.

2. Пов'язування комірки з базою даних: Більш гнучкий підхід передбачає, що кожна растрова комірка має унікальний ідентифікатор, який слугує ключем для зв'язку із записом у зовнішній базі даних (СУБД) [20]. У базі даних може зберігатися будь-яка кількість атрибутів, пов'язаних з цією коміркою. Цей метод дозволяє зберігати більше інформації про кожен ділянку простору, зменшує надлишковість даних (якщо однакові атрибути повторюються для багатьох комірок) та полегшує інтеграцію з іншими даними, що також зберігаються у реляційних базах.

Хоча точне абсолютне місце розташування не є явною властивістю кожної окремої комірки в растровій структурі даних, геореференсування растра забезпечує його прив'язку до реального географічного простору. Це означає, що весь растр в цілому позиціонується у певній системі координат (географічній або

проєкційній), а положення кожної комірки може бути обчислене на основі її індексів у рядку та стовпці, розміру комірки та координат початкової точки растра (наприклад, лівого верхнього кута). Зазвичай, координати комірки представляють координати її центру або одного з кутів.

Розмір растрової комірки визначає просторову роздільну здатність (resolution) растра. Чим менший розмір комірки, тим більшу деталізацію рельєфу або іншого явища можна представити, і тим вищою потенційно є точність просторового розташування об'єктів, зображених на растрі. Однак, це також призводить до значного збільшення обсягу даних. Точність вимірювань відстаней, площ або положень на растрі обмежена його роздільною здатністю. Тому для завдань, що вимагають високої геометричної точності, перевага часто надається векторним моделям.

Незважаючи на обмеження у точній геометричній репрезентації меж об'єктів порівняно з векторними моделями, растрові структури даних мають значні переваги:

- Простота та інтуїтивність: Концепція сітки легко сприймається та інтерпретується.
- Сумісність із джерелами даних: Растровий формат ідеально підходить для прямого імпорту та обробки даних, отриманих методами дистанційного зондування (супутникових та аерофотознімків), а також сканованих карт.
- Ефективність операцій: Растрові дані дуже зручні та обчислювально ефективні для певних типів просторового аналізу, зокрема накладання (overlay analysis) для комбінування даних з різних тематичних шарів, та аналізу поверхонь (розрахунок похідних характеристик, таких як крутизна, експозиція, кривизна) безпосередньо з растрової моделі висот (ЦМР).
- Представлення неперервних явищ: Растрова модель чудово підходить для моделювання та візуалізації явищ, що неперервно змінюються у просторі (рельєф, температура, опади, концентрація забруднюючих речовин).

Растрові моделі даних, особливо для представлення висот земної поверхні (у вигляді растрових ЦМР), дуже широко використовуються в сучасних ГІС.

Більшість багатofункціональних ГІС-пакетів (наприклад, ArcGIS Pro, QGIS, GRASS GIS, а також згадані раніше MapInfo Professional, Панорама, Surfer та ER Mapper у своїх відповідних нішах) мають розвинені інструменти для роботи з растровими даними, що описують рельєф, і часто використовують їх як основу для 3D-візуалізації та просторового аналізу.

Один зі стандартних способів організації географічних даних у растровій моделі для створення тематичних карт полягає у формуванні двовимірного масиву комірок, де кожна комірка (піксель) представляє певну ділянку території та зберігає значення одного конкретного тематичного атрибута. Такий масив, що охоплює певну тему для усієї картографованої області, часто називається покриттям (coverage) або більш сучасно – растровим шаром чи растровим набором даних. Ці растрові шари можуть відображати різноманітні географічні явища та характеристики, такі як абсолютна висота над рівнем моря (для ЦМР), кут нахилу схилу, тип землекористування, вид рослинності, тип ґрунту тощо.

Історично, різні ГІС-системи розробляли власні способи ефективного зберігання та управління цими растровими тематичними покриттями. Наприклад, у ранніх версіях програмного забезпечення ArcInfo компанії ESRI (починаючи з ArcInfo 3.0) використовувалася система подачі даних IMGRID. Серед її характеристик, як зазначалося, були: структура, що візуально нагадує карту (зберігання даних у вигляді двовимірних масивів для різних шарів) та спрощення представлення даних, можливо, шляхом зменшення діапазону значень або використання бінарного представлення для певних типів даних, що потенційно мало спростити обчислення та усунути потребу в складних легендах для простих випадків. За рахунок ідентифікації кожної ознаки бітом, з'явилася можливість зберігати більше одного атрибута в комірці.

Поряд із цим, значний вплив мала модель даних MAP (Map Analysis Package), розроблена Д. Томліном [22]. У цій моделі кожне тематичне покриття розглядалося та ідентифікувалося окремо за унікальним іменем ("картографічна секція" у термінології Томліна). Значення атрибута в кожній комірці записувалося як числовий код або мітка, яка була пов'язана з елементом легенди

та відповідним символом. Цей підхід значно спростив маніпуляції зі значеннями атрибутів та операції над групами схожих комірок, оскільки зміна значення в комірці вимагала перезапису лише одного числового коду. Головна перевага моделі MAP полягала в її гнучкості та зручності для аналізу "багато до одного" (коли багато комірок відповідають одному класу атрибута) та легкості маніпуляцій з атрибутивною інформацією, що зробило її популярною, зокрема, в освітніх цілях та як основу для деяких растрових ГІС.

Хоча растрові ГІС традиційно фокусувалися на зберіганні одного атрибута в кожній комірці в межах самого растрового файлу, розвиток технологій призвів до суттєвих розширень растрової моделі даних. Сучасні растрові ГІС все частіше використовують прямі зв'язки з реляційними системами управління базами даних (СУБД) [24]. Це дозволяє пов'язувати кожен растр (або групи комірок) із записами в базі даних, де може зберігатися необмежена кількість атрибутів та їх детальні характеристики. Такий підхід значно розширює можливості аналізу, запитів та управління атрибутивними даними, пов'язаними з растровим простором.

Крім того, важливим етапом стало створення інтегрованих растрово-векторних систем ГІС. Ці системи підтримують одночасну роботу з обома основними моделями даних – растровою та векторною – і надають користувачеві інструменти для перетворення даних з однієї форми в іншу (растеризація векторних даних, векторизація растрових даних). Це дозволяє повною мірою використовувати переваги кожної структури даних: векторну для точного представлення дискретних об'єктів та мереж, а растрову – для моделювання поверхонь, аналізу неперервних явищ та ефективної обробки зображень дистанційного зондування. Можливість вільної взаємодії між растровими та векторними даними є ключовою для сучасного геопросторового аналізу, що інтегрує дані різних типів та джерел. Це також посилює взаємодію між програмним забезпеченням для "традиційної" обробки зображень (яке історично працювало переважно з растрами) та повноцінними ГІС.

Висоти земної поверхні, представлені у вигляді растрових файлів (растрові ЦМР), є одним із найпоширеніших типів даних у ГІС. Практично всі сучасні багатофункціональні ГІС-платформи (такі як ArcGIS Pro, QGIS, а також спеціалізоване програмне забезпечення типу Surfer) мають розвинені можливості для імпорту, обробки, аналізу та візуалізації растрових даних про рельєф, часто використовуючи їх як базовий шар для тривимірного моделювання та просторового аналізу.

2.2. ВЕКТОРНІ МОДЕЛІ

У ГІС, окрім растрової моделі, широко використовується векторна модель даних. Традиційно, саме векторний формат асоціюється з поняттям "цифрова карта", яка зазвичай представляється як багат шарова структура, де кожен шар містить певний тип географічних об'єктів (точки, лінії, полігони) з їх просторовими координатами та атрибутивною інформацією. Ці об'єкти прив'язані до реального географічного простору за допомогою системи координат.

Оскільки наша увага зосереджена на цифровому моделюванні та візуалізації тривимірного рельєфу, ми перейдемо безпосередньо до векторних моделей, призначених для 3D-представлення поверхні Землі. Для побудови цих моделей часто вихідними даними є набори розрізнених висотних відміток (наприклад, точки польових вимірювань, оцифровані вершини горизонталей) [25, 26]. Щоб отримати неперервну поверхню, яка дозволить визначати висоту в будь-якій точці, застосовуються різні методи просторової інтерполяції. Серед найбільш поширених технік для створення поверхні за множиною точок відомі триангуляція (зокрема, Делоне), крігінг, методи Шепарда, апроксимація радіально-базисними функціями, а також поліноміальне та частково-поліноміальне згладжування.

Однією з найпопулярніших та ефективних векторних моделей для представлення та візуалізації тривимірного рельєфу є модель TIN (Нерегулярна трикутна сітка). Як випливає з назви, її просторова структура складається з

мережі нерегулярно розташованих, непересічних трикутників. Вершини цих трикутників є вихідними точками з відомими тривимірними координатами (x, y, z). Модель TIN представляє поверхню рельєфу як сукупність цих плоских трикутних граней, формуючи багатогранну (поліедральну) поверхню.

Теоретичною основою багатьох TIN-моделей є тріангуляція Делоне [27, 28]. Цей метод побудови тріангуляції множини точок на площині має важливу властивість: для будь-якого трикутника Делоне коло, описане навколо його вершин, не містить у собі жодної іншої точки з вихідного набору. Ця властивість забезпечує, що трикутники, як правило, є "товстими", уникаючи появи довгих і вузьких трикутників. Така "максималізація мінімального кута" трикутників робить тріангуляцію Делоне оптимальною в декількох аспектах для інтерполяції та представлення поверхонь, забезпечуючи вищу точність порівняно з іншими тріангуляціями.

Незважаючи на теоретичні переваги тріангуляції Делоне, використання стандартних TIN-моделей, побудованих виключно на основі оцифрованих горизонталей з традиційних топографічних карт, виявило суттєвий недолік – "ефект терас". Цей морфологічний артефакт проявляється у вигляді появи на змодельованій поверхні нереалістично плоских ділянок, особливо помітних уздовж ліній, де на карті були горизонталі (наприклад, на схилах або вздовж тальвегів).

Основна причина цього ефекту криється в характері вихідних даних з горизонталей: точки оцифрування розташовані дуже щільно вздовж самих горизонталей (на одній висоті), але можуть бути відносно розрідженими між сусідніми горизонталями. При побудові стандартної тріангуляції Делоне, трикутники можуть утворюватися між точками однієї горизонталі або точками сусідніх горизонталей, не враховуючи реальної зміни нахилу між ними. Це призводить до моделювання рівних (терасоподібних) ділянок там, де в дійсності рельєф має неперервний нахил або виразну лінію перегину (наприклад, по днищу V-подібного яру). Такий "ефект терас" спотворює морфографію та морфометрію

рельєфу і знижує якість ЦМР та похідних від неї продуктів (наприклад, карт крутизни).

Для значного покращення якості та морфологічної достовірності ЦМР, побудованих на основі TIN, застосовується підхід структурування моделі. Це означає включення до вихідних даних, окрім точок висот, також структурних ліній (breaklines) та структурних точок, які відображають ключові елементи рельєфу, де відбувається виразна зміна нахилу або форми поверхні. До структурних ліній належать лінії вододілів, тальвегів, брівки та підосви уступів, обривів, осі терас тощо.

В алгоритмічному плані це реалізується за допомогою керуючої триангуляції Делоне (Constrained Delaunay Triangulation) [11]. На відміну від класичної триангуляції, керуюча гарантує, що структурні лінії будуть представлені як обов'язкові ребра утворених трикутників. Це змушує трикутники "орієнтуватися" вздовж цих структурних ліній, краще відтворюючи реальну морфологію рельєфу та усуваючи "ефект терас". Це один із ключових способів створення морфологічно правдоподібніших та точніших ЦМР.

Подальшим розвитком ідеї структурування є концепція структурно-цифрової моделі рельєфу (СЦМР). Видатний дослідник І. Г. Черваньов запропонував розглядати рельєф не просто як поверхню, а як структуру, "скелет" якої утворюють інваріантні лінії рельєфу — тальвеги та вододіли. Його структурно-лінгвістична модель рельєфу базується на цих лініях як на базисній та вершинній множинах відповідно. Така модель акцентує увагу на ієрархічній організації рельєфу та просторовому взаємозв'язку його елементів різного порядку (вертикальна та горизонтальна складові структури). Відмінність деяких типів СЦМР (як структурно-лінгвістична модель у чистому вигляді) від TIN полягає в тому, що вони не обов'язково вимагають наявності висотних відміток поза мережею інваріантних ліній, зосереджуючись насамперед на морфологічній структурі. Розробка таких моделей, як, наприклад, реалізована у програмному продукті "Рельєф-Процесор", спрямована на підвищення достовірності та

розширення аналітичних можливостей ЦМР за рахунок інтеграції знань про морфологічну структуру.

Подальший прогрес у цифровому моделюванні просторових даних пов'язаний з розробкою "істинно тривимірних" або об'ємних моделей. На відміну від "планіметричних" 2D-моделей або 2.5D-моделей (як ЦМР/TIN, що представляють лише поверхню), ці моделі здатні описувати не тільки поверхні, але й об'єми. Вони є тривимірним розширенням існуючих 2D-моделей:

- Вексельна модель (Voxel Model): Тривимірне розширення растрової моделі. Простір розбивається на регулярну сітку тривимірних елементів – векселів (voxels), кожен з яких має певні атрибути (наприклад, тип гірської породи, температура, вологість).
- Тетраедрична модель: Тривимірне розширення моделі TIN. Простір заповнюється сіткою нерегулярно розташованих тетраедрів (тривимірних пірамід). Вершини тетраедрів мають координати, а самі тетраедри можуть зберігати атрибути, що описують властивості об'єму.

Ці "істинно тривимірні" моделі запозичують підходи та алгоритми з твердотілого моделювання (Solid Modeling), що розвивається в комп'ютерній графіці та інженерії. Вони дозволяють моделювати геологічні шари, підземні води, атмосферні явища, міську забудову та інші просторові об'єкти як суцільні об'єми, що відкриває нові можливості для комплексного геопросторового аналізу, що виходить за межі лише поверхні рельєфу.

2.3. ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ

У роботах з використанням ArcInfo / ArcTIN, ArcGIS / 3D Analyst та MapInfo з модулем "Surface" для створення тривимірних моделей рельєфу застосовуються різні методи та алгоритми.

У випадках ArcInfo / ArcTIN та ArcGIS / 3D Analyst результатом є файли векторної графіки, що представляють модель TIN (Triangulated Irregular Network) – нерегулярну трикутну мережу.

Використання MapInfo з модулем "Surface" може включати побудову полігонів Вороного (також відомих як діаграми Вороного або полігони Тіссена) для представлення рельєфу, хоча частіше ці полігони використовуються для інших типів просторового аналізу.

Для розуміння принципів побудови цих зображень та оцінки їх точності важливо розглянути основні перетворення та алгоритми, що використовуються в ГІС для тріангуляції Делоне та побудови мережі трикутників (TIN) та полігонів Вороного/Тіссена [13].

Тріангуляція Делоне є ключовим алгоритмом у побудові TIN. Для заданої множини точок на площині (або у просторі) вона створює розбиття на трикутники (або тетраедри у 3D), що мають важливі властивості:

- Критерій порожнього кола (сфери): Для кожного трикутника Делоне коло (сфера), описане навколо його вершин, не містить жодної іншої точки з вихідної множини.
- Максимізація мінімального кута: Тріангуляція Делоне прагне уникати утворення "худих" трикутників, максимізуючи мінімальний кут серед усіх трикутників.
- Оптимальність форми У теорії, тріангуляція Делоне має найменший індекс гармонійності серед усіх можливих тріангуляцій.

Ці властивості роблять тріангуляцію Делоне оптимальною для інтерполяції висот та представлення поверхонь, оскільки вона забезпечує гладкі та передбачувані зміни висот між вихідними точками.

Полігони Вороного (Тіссена), також відомі як діаграми Вороного, є іншою структурою, тісно пов'язаною з тріангуляцією Делоне. Для кожної заданої точки (генератора) на площині полігон Вороного визначає область, усі точки якої знаходяться ближче до даного генератора, ніж до будь-якого іншого. Ребрами полігонів Вороного є бісектриси між сусідніми генераторами. Важливим є те, що полігони Вороного та трикутники Делоне є двоїстими графами: якщо з'єднати відрізками центри кіл, описаних навколо трикутників Делоне, то отримаємо полігони Вороного.

У контексті моделювання рельєфу, полігони Вороного можуть використовуватися для:

- Інтерполяції найближчого сусіда: Припустити, що висота в будь-якій точці полігону Вороного дорівнює висоті точки-генератора цього полігону. Це найпростіший, але часто не найточніший метод.
- Визначення зон впливу: Визначення областей, де висота певної вихідної точки має найбільший вплив на інтерполяцію.

Для ефективного зберігання та обробки триангуляцій (і, відповідно, TIN) використовуються різні структури даних. Основні елементи триангуляції: вершини (V), ребра (E) та трикутники (T). Між ними існують відносини суміжності (наприклад, які трикутники межують з певним ребром, які ребра виходять з певної вершини).

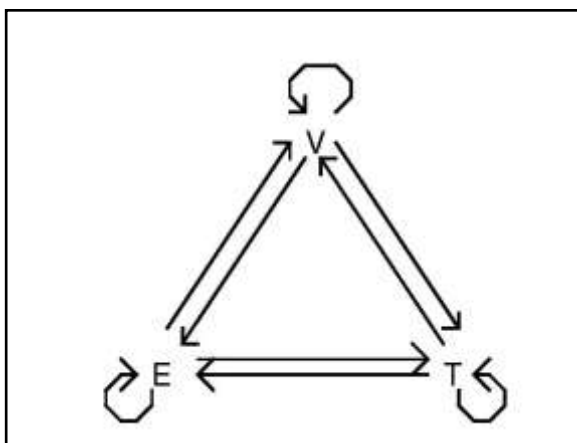


Рис. 3.1 Порядок виконання триангуляції поверхні

Найбільш поширені структури даних:

- Засновані на вершинах (Vertex-based): Кодують відношення суміжності V-V (яка вершина з'єднана з якою). Використовуються, наприклад, у файлах *.e00 (ArcInfo).
- Засновані на трикутниках (Triangle-based): Кодують відношення T-V (які вершини утворюють трикутник) та T-T (які трикутники є суміжними).
- Засновані на ребрах (Edge-based): Зберігають інформацію про ребра та їх зв'язки з вершинами та трикутниками. Приклад – структура MWER (modified winged-edge representation).

Вибір структури даних впливає на обсяг пам'яті, необхідний для зберігання триангуляції (ємнісна складність), та швидкість алгоритмів для отримання інформації про суміжні елементи (тимчасова складність).

Побудова тривимірних моделей рельєфу в ГІС вимагає застосування ефективних алгоритмів та структур даних. Триангуляція Делоне є потужним методом, що забезпечує якісну інтерполяцію. Полігони Вороного, хоч і рідше використовуються безпосередньо для представлення рельєфу, є важливою концепцією у просторовому аналізі. Розуміння принципів їх побудови та способів представлення даних є важливим для оцінки точності та вибору оптимальних методів створення тривимірних карт.

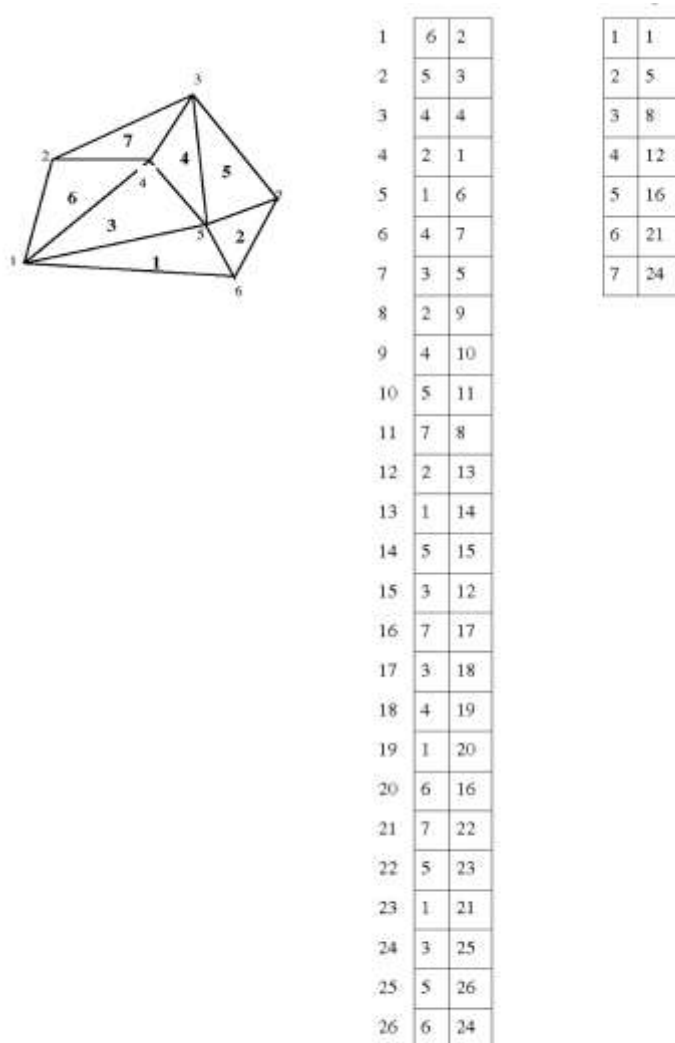


Рис. 3.2 Таблиця суміжності вершин та ребер, що пояснює механізми триангуляції

Тріангуляція Делоне (DT) множини точок V на площині є особливим типом тріангуляції, який має важливі властивості для просторового моделювання. Вона визначається як двоїстий граф до діаграми Вороного для цієї ж множини точок V . Це означає, що ребро існує між двома точками v_i та v_j у тріангуляції Делоне тоді і тільки тоді, коли відповідні цим точкам полігони Вороного є суміжними, тобто мають спільне ребро (Рис. 3.3).

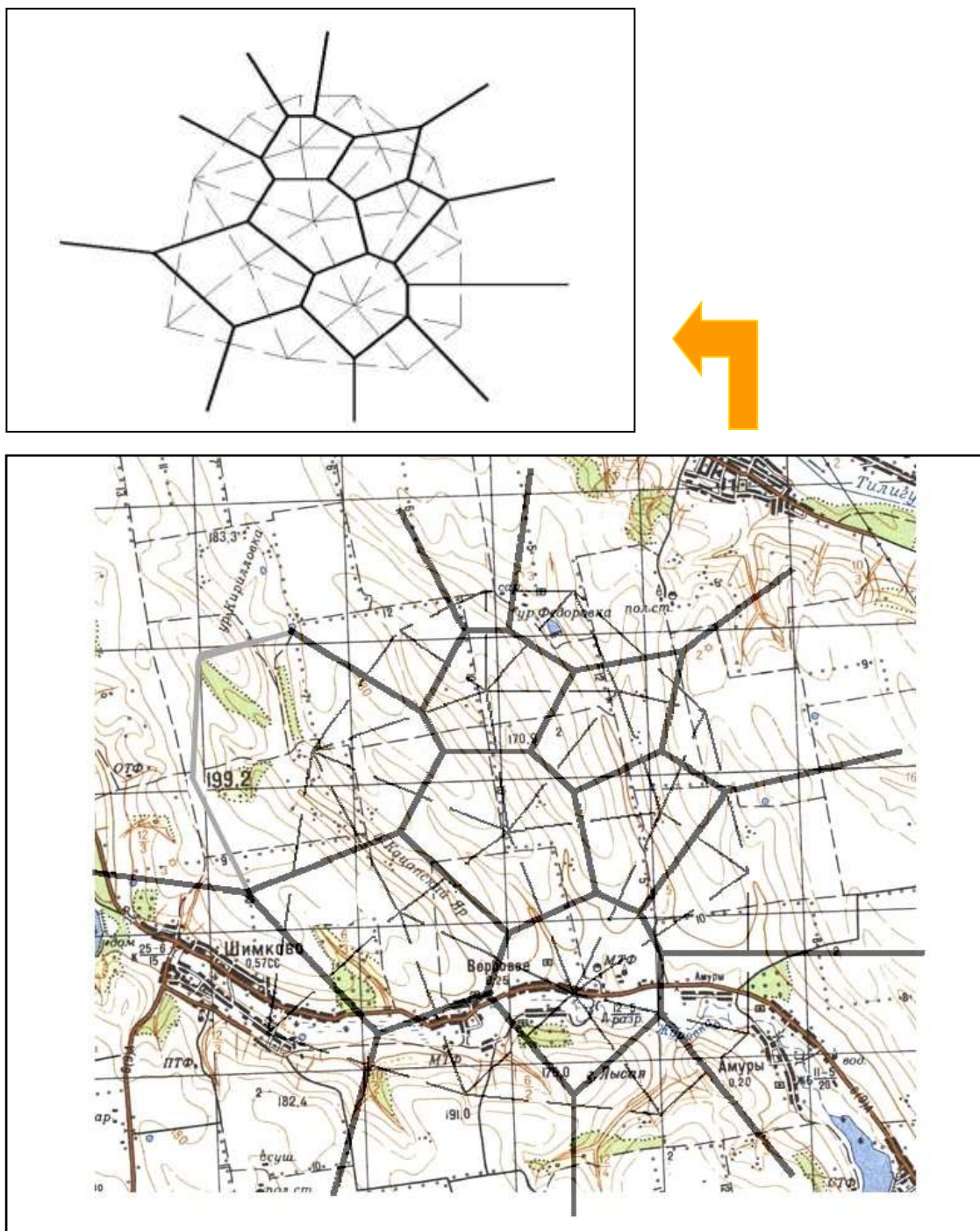


Рис. 3.3 Полігони Вороного (товсті лінії) та полігони TIN (тонкі пунктирні лінії) при побудові ЦМР у ГІС “Map Info”

Трикутники, що утворюють триангуляцію Делоне, мають дві ключові властивості, які роблять її особливо цінною:

1. Критерій порожнього описаного кола (Empty Circumcircle Criterion): Для будь-якого трикутника $TR(v_i, v_j, v_k)$, що є частиною триангуляції Делоне, коло, описане навколо його вершин, не містить у своїй внутрішній області жодної іншої точки з вихідної множини V . Цей критерій гарантує, що трикутники не "охоплюють" інші точки даних.

2. Критерій максимізації мінімального кута (Max-Min Angle Criterion): Серед усіх можливих триангуляцій заданої множини точок, триангуляція Делоне має властивість максимізувати мінімальний кут серед усіх кутів усіх трикутників у триангуляції. Ця властивість допомагає уникнути утворення так званих "худих" або вироджених трикутників, які є небажаними для точної інтерполяції та візуалізації поверхонь.

Важливо, що обидва ці критерії є еквівалентними: будь-який трикутник є трикутником Делоне тоді і тільки тоді, коли він задовольняє критерію порожнього описаного кола.

Існує кілька алгоритмів для побудови триангуляції Делоне. Одним з підходів є процедура локальної оптимізації (LOP - Local Optimization Procedure). Ця процедура є ітеративною і застосовується до внутрішніх ребер (тих, що не лежать на межі опуклої оболонки) деякої початкової триангуляції.

Суть LOP полягає у наступному: для внутрішнього ребра e , яке є спільною стороною двох трикутників, що утворюють чотирикутник Q , перевіряється "Делоне-властивість". Якщо четверта вершина чотирикутника (та, що не є кінцем ребра e) потрапляє всередину кола, описаного навколо будь-якого з двох трикутників, то ребро e не відповідає критерію порожнього кола і вважається "незаконним" (illegal). У цьому випадку ребро e замінюється (фліпується) на іншу діагональ цього ж чотирикутника. Якщо ж четверта вершина знаходиться поза обома описаними колами або точно на колі, ребро e залишається без змін і вважається локально-оптимальним (Делоне-ребром).

Доведено, що багаторазове (ітераційне) застосування процедури LOP до всіх внутрішніх ребер довільної початкової тріангуляції гарантовано призводить до отримання єдиної тріангуляції Делоне для даної множини точок (цей процес є збіжним).

Цей алгоритм, або його варіації, реалізовані в багатьох програмних продуктах для просторового аналізу та ГІС, зокрема в системах компаній ESRI та Mapinfo Corp., і є основою для побудови TIN-моделей рельєфу. Візуалізація етапів побудови полігонів Вороного та тріангуляції Делоне наочно демонструє, як із множини точок формується мережа трикутників, що лягає в основу моделі TIN.

Властивості тріангуляції Делоне, особливо максимізація мінімального кута, є надзвичайно важливими для створення якісних моделей рельєфу, оскільки вони сприяють кращій інтерполяції висот між вихідними точками та більш плавній та достовірній репрезентації поверхні порівняно з тріангуляціями, що містять багато "гострих" трикутників.

РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ І ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ ТЕСТОВОЇ ДІЛЯНКИ

3.1. ПІДГОТОВКА ВИХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦМР

Тестовою ділянкою, де застосовувалася методика відтворення поверхонь рельєфу засобами ГІС, була обрана територія поблизу с. Городниця, с. Передівання та с. Іване-Золоте на межі Тернопільської та Івано-Франківських областей.

Причинами вибору цієї ділянки були:

- 1) наявність детальних топографічних карт, зокрема карти районного відділу земельних ресурсів (в умовній місцевій проекції) масштабу 1:10 000 та карти масштабу 1:25 000 видавництва Польщі, рік складання 1939 (проекція Гауса-Крюгера DHDN 1927 р.); незважаючи на те, що топографічна карта створена майже 70 років тому, на ній з усією детальністю показаний рельєф Чорткова і прилеглої території, достовірно показані урвища, детально відображена долина р. Дністер, на берегах якої розташоване місто;
- 2) наявність космічного знімку на територію міста та іншої геопросторової інформації по ньому,
- 3) різкий, контрастний рельєф з перепадом висот майже 200 м;
- 4) велике різноманіття форм рельєфу, розташованій на одній невеликій території – каньйоноподібна долина, річкові тераси, долини малих водотоків та яри, урвища – виходи скельних порід, схили різної крутизни, платоподібна ділянка височини тощо.

У якості вихідної інформації для побудови тривимірних моделей використовувалися топографічна карта з перерізом горизонталей 20 м (допоміжних горизонталей – 10 м) і карта земель на територію міськради з перерізом горизонталей 10 м. У якості додаткового джерела інформації ми також користувалися космічним знімком Sentinel 2 [29] з роздільною здатністю 10 м.

Створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) часто починається з перетворення існуючих аналогових матеріалів, таких як паперові топографічні карти, у цифровий формат. Одним із традиційних і досі актуальних підходів є

сканування та векторизація картографічних зображень. Цей процес дозволяє отримати векторні дані (зокрема, горизонталі) для подальшого моделювання поверхні.

У контексті дослідження, як приклад, використовувалися програмні пакети, такі як "ArcGIS 9.1" з модулями "3D Analyst 9.0" та "Spatial Analyst 9.x", а також "MapInfo Professional 6.0" з модулем "Surface". Для автоматизованої векторизації ізоліній застосовувався програмний пакет MapEdit.

Процес отримання вихідних даних шляхом сканування та векторизації карти є багатоетапним:

Сканування карти: Паперова карта сканується за допомогою стандартного планшетного сканера (як, наприклад, MUSTEK Bear Paw 2448 CU) для отримання растрового зображення у відповідному форматі (наприклад, TIFF). Важливо забезпечити достатню роздільну здатність сканування для чіткого відтворення тонких ліній горизонталей.

Геореференсування растра. Отримане растрове зображення прив'язується до реальної географічної системи координат шляхом вказання координат щонайменше трьох-чотирьох добре ідентифікованих на карті точок (наприклад, кутів координатної сітки). Цей крок забезпечує правильне просторове розташування даних.

Підготовка растра до векторизації. Цей етап є критично важливим для якості автоматичної векторизації і може включати кілька кроків:

Виділення тематичного шару. Якщо сканувалася кольорова карта, необхідно ізолювати шар, що відповідає горизонталям (зазвичай, коричневого кольору), від інших елементів (синіх річок, чорних написів, сітки). Якість цього кроку суттєво впливає на подальшу обробку.

Бінаризація. Перетворення кольорового або напівтонового зображення горизонталей у чорно-біле (бінарне) зображення, де лінії представлені чорними пікселями на білому тлі.

Очищення растра (видалення "сміття"). Видалення сторонніх об'єктів, які можуть заважати векторизації, таких як елементи координатної сітки, написи, символи, які потрапили у шар горизонталей.

Фільтрація та згладжування. Застосування математичних фільтрів для видалення випадкового шуму (окремих пікселів) та часткового відновлення розірваних ліній горизонталей. Важливо правильно підібрати параметри фільтрів, щоб не втратити тонкі лінії або важливі деталі.

Скелетизація (тоншання). Перетворення ліній горизонталей до товщини в один піксель. Це необхідний крок для більшості алгоритмів автоматичного трасування ліній.

Автоматична векторизація. Програмне забезпечення автоматично "трасує" (слідкує за) растровими лініями, перетворюючи їх у векторні полілінії (послідовності сегментів).

Постобробка векторних даних. Результати автоматичної векторизації рідко є ідеальними і потребують ретельного редагування:

"Зшивка" кінців поліліній. З'єднання розірваних сегментів ліній (наприклад, у місцях, де була сітка або дефект растра). Автоматична зшивка за допуском відстані може призводити до некоректних з'єднань, включаючи зшивання кінців горизонталей з різними висотами або злами у плавних лініях. Потрібні інструменти для контрольованої або ручної зшивки.

Видалення "векторного сміття". Видалення коротких, небажаних поліліній, що утворилися внаслідок векторизації залишкового шуму на растрі. Зазвичай використовується фільтрація за довжиною або кількістю вершин.

Оптимізація форми ліній (спрощення/згладжування). Зменшення надлишкової кількості вершин у полілініях, що зберігає їхню форму, але зменшує обсяг даних. Може також включати згладжування ліній, але з обережністю, щоб не спотворити реальну форму рельєфу.

Виявлення та корекція помилок топології. Критичний етап, що включає перевірку векторних ліній на наявність топологічних помилок, неприпустимих для побудови ЦМР (наприклад, самоперетини горизонталей, перетини ліній з

різними висотами, розриви або недоведення ліній, які мають бути замкненими або доходити до межі карти). Сучасні векторизатори та ГІС мають інструменти для автоматичного виявлення та інтерактивного ручного виправлення цих помилок.

Присвоєння значень висот. Кожній полілінії-горизонталі необхідно присвоїти відповідне числове значення висоти. Це може робитися напівавтоматично (наприклад, за допомогою інструментів, що дозволяють клікнути на горизонталь та ввести її значення) або автоматично (якщо на растрі були підписи горизонталей, які розпізнаються, або за правилом інтервалу горизонталей від відомих опорних точок). Важливо мати інструменти для перевірки логічної послідовності та несуперечності присвоєних значень.

Якість отриманих векторних горизонталей та, відповідно, побудованої на їх основі ЦМР, значною мірою залежить від якості вихідного растра, можливостей та точності програмного забезпечення для векторизації, а також ретельності ручного редагування результатів. Навіть найсучасніші алгоритми автоматичної векторизації вимагають значного контролю та ручної корекції.

Окрім векторизації горизонталей, для створення ЦМР також можуть використовуватись інші джерела даних, зокрема, висотні відмітки окремих точок. У деяких випадках (як згадано у тексті), такі дані можуть вводиться вручну шляхом нанесення точок на цифрову копію карти та присвоєння їм відповідних висотних значень. Сукупність цих точок може використовуватися самостійно або в поєднанні з оцифрованими горизонталями для побудови TIN або растрової ЦМР шляхом інтерполяції.

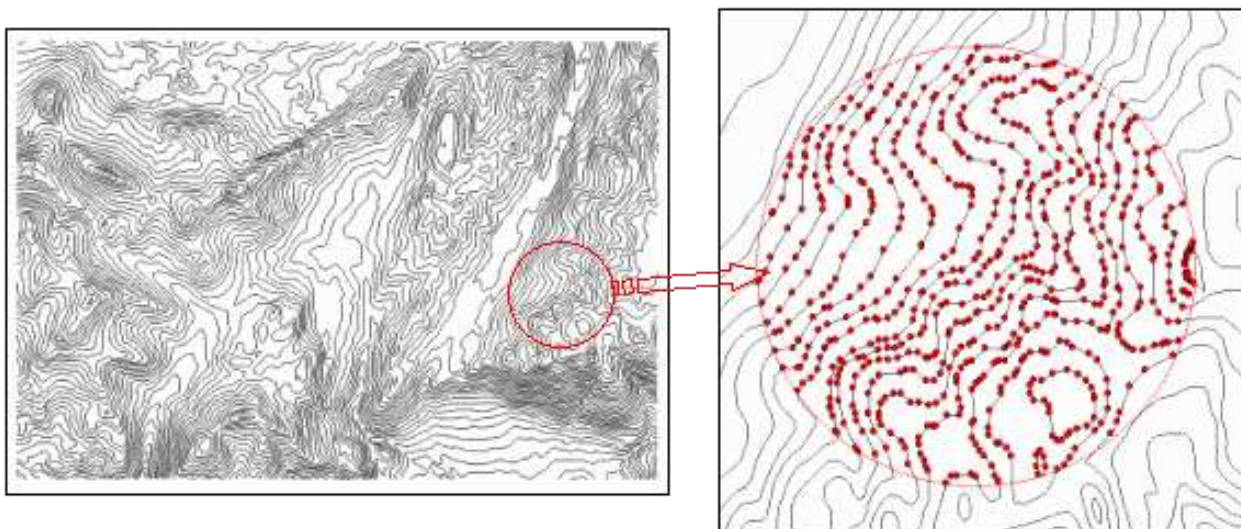


Рис. 4.1 Конвертація поліліній (горизонталей) у точки і отримання нерегулярного масиву точок для подальшої інтерполяції і побудови ЦМР

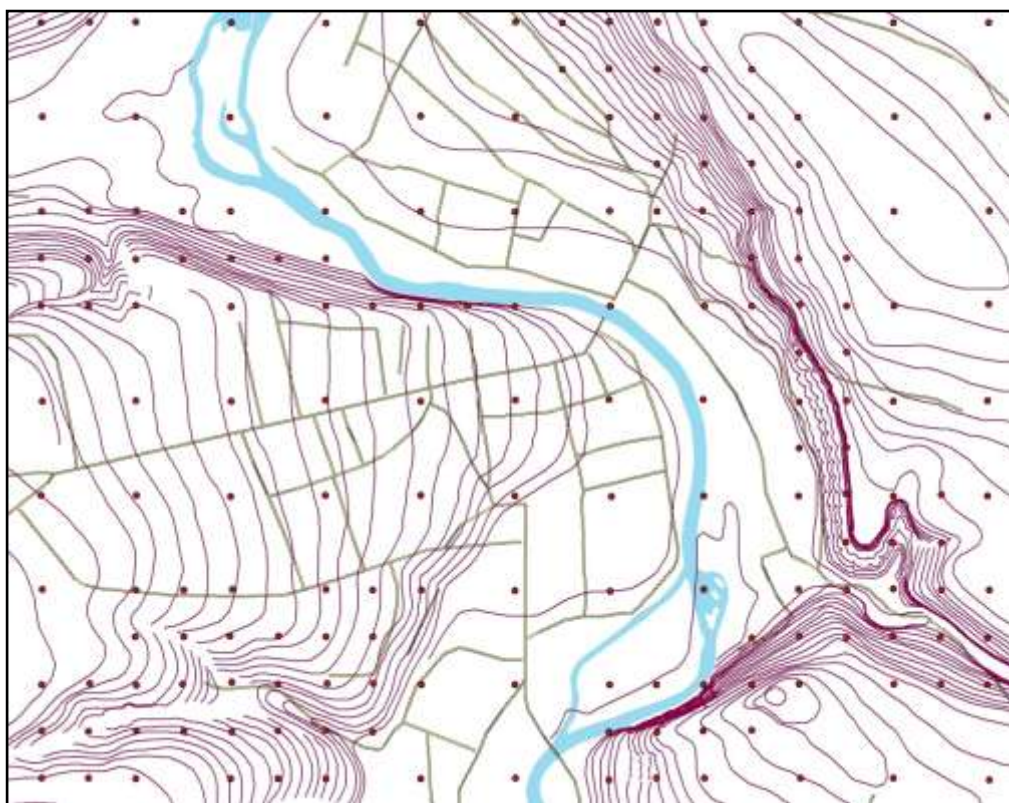


Рис. 4.2 Визначення висот за сіткою квадратів і отримання регулярного масиву точок для подальшої інтерпретації і побудови GRID та ЦМР.

На схилах точки навмисно проставлялися частіше

3.2. СТВОРЕННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ ЗАСОБАМИ ГІС: МОДЕЛІ GRID ТА TIN, МЕТОДИ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) надають потужні інструменти для створення та візуалізації тривимірних моделей рельєфу на основі різноманітних вихідних даних про висоту. У програмних пакетах, зокрема в сімействі продуктів ArcGIS (як у згаданих раніше версіях типу ArcGIS 9.1 з модулями 3D Analyst та Spatial Analyst, так і в сучасних реалізаціях), для представлення поверхонь рельєфу використовуються два основні типи моделей: Grid (растрова сітка) та TIN (нерегулярна трикутна мережа).

Модель Grid представляє поверхню рельєфу у вигляді регулярної сітки квадратних або прямокутних комірок (пікселів). Кожна комірка в цій сітці має асоційоване значення, яке в контексті моделювання рельєфу відповідає висоті земної поверхні в межах цієї комірки. Значення висоти для кожної комірки може бути отримане або безпосередньо з вихідних даних, що вже мають растрову структуру (наприклад, скан-копії карт висот, дані супутникової альтиметрії у растровому форматі), або шляхом інтерполяції значень висот з набору нерегулярно розподілених точок або ліній.

Модель Grid є відносно простою за структурою даних. Обробка та аналіз растрових сіток, як правило, ефективні, оскільки багато алгоритмів добре адаптовані з методів обробки растрових зображень. grid-моделі рельєфу (растрові ЦМР) є поширеними та часто доступні за нижчою вартістю, особливо для великих територій. Роздільна здатність grid-моделі визначається розміром комірки: менший розмір комірки відповідає вищій роздільній здатності та більшій деталізації моделі.

Однак регулярна структура растрових сіток має й певні обмеження. Вона може не повністю відповідати мінливості реального рельєфу, потенційно призводячи до втрати інформації про деталі між вихідними точками регулярної сітки (якщо дані були отримані саме так) або спрощення гострих перегинів.

Базова структура растрової сітки також не ідеально підходить для точного представлення лінійних об'єктів або різких меж у великомасштабних додатках. У прикладі з тексту, створення grid-моделі з розміром комірки 45x45 м на основі 2000 точок ілюструє типовий процес отримання растрової поверхні з дискретних вимірювань.

Нерегулярні трикутні мережі (TIN - Triangulated Irregular Networks) представляють поверхню рельєфу у вигляді безперервної сукупності неперекривних трикутних граней. Вершинами цих трикутників є вихідні точки з відомими тривимірними координатами (x, y, z). На відміну від Grid-моделей, розподіл вершин TIN є нерегулярним і відповідає розташуванню вихідних даних (точок польової зйомки, оцифрованих точок горизонталей, піків, западин, точок на структурних лініях). Значення поверхні в будь-якій точці в межах мережі TIN обчислюється шляхом лінійної інтерполяції на площині трикутника, що містить цю точку, використовуючи висоти його вершин.

Модель TIN має низку значних переваг. Вона дозволяє використовувати всі вихідні дані, на основі яких будується мережа, зберігаючи інформацію про кожен виміряну точку або лінію. Роздільна здатність моделі TIN може бути змінною: вона вища в областях зі складним рельєфом (де вихідних точок більше) і нижча на відносно рівних ділянках. TIN добре підходить для представлення лінійних об'єктів (наприклад, доріг, водотоків або структурних ліній рельєфу) шляхом включення їх у вигляді ребер трикутників (використання керуючої тріангуляції Делоне).

Проте, моделі TIN також мають свої недоліки. Їх створення, особливо з великих обсягів даних, та подальша обробка є більш обчислювально інтенсивними та можуть вимагати більше часу та ресурсів порівняно з грід-моделями. Вартість отримання високоякісних вихідних даних, необхідних для детальної TIN, може бути значною. У прикладі, наведеному в тексті, конвертація оцифрованих горизонталей у шар точок та подальша побудова TIN з 2150 трикутників ілюструє типовий процес, а порівняння розмірів файлів TIN (34 МБ

та 70 МБ залежно від методу інтерполяції або структури даних) з ґрид-моделлю (56 МБ) показує, що TIN може займати різний обсяг пам'яті.

Як для Grid-, так і для TIN-моделей, якщо вихідні дані не є готовою поверхнею (наприклад, це набір розрізнених висотних відміток або горизонталі), необхідний процес інтерполяції. Інтерполяція — це метод оцінки значень (висоти в даному випадку) у точках, де вони не були виміряні, на основі відомих значень у сусідніх точках. Правильний вибір методу інтерполяції є критично важливим для достовірності отриманої моделі поверхні. При виборі методу слід враховувати характеристики вихідних даних (розподіл, щільність, точність) та природу явища, що моделюється, а також вимоги до кінцевої моделі. Загальна тенденція така: чим більше вихідних точок з даними і чим рівномірніше вони розподілені, тим достовірнішим буде результат інтерполяції, незалежно від методу.

Розглянемо кілька поширених методів інтерполяції, доступних у ГІС (зокрема, згаданих для Spatial Analyst та 3D Analyst):

Метод зворотних зважених відстаней (IDW - Inverse Distance Weighted). Цей метод базується на припущенні, що вплив вихідної точки на інтерпольоване значення зменшується зі збільшенням відстані. Значенням ближчих точок надається більша "вага", а віддаленіших — менша. Значення в точці інтерполяції розраховується як середньозважене значення висот сусідніх точок. Можна використовувати фіксоване число найближчих точок або всі точки в межах заданого радіуса пошуку.

Метод інтерполяції сплайнами (Spline). Сплайн апроксимує поверхню, яка проходить точно через усі вихідні точки (або дуже близько до них, залежно від типу сплайна) і має мінімальну загальну кривизну. Це схоже на натягування гнучкої пластини через опорні точки. Метод сплайнів добре підходить для моделювання плавно змінюваних поверхонь, таких як рельєф, рівень ґрунтових вод. Він може давати менш точні результати в областях з різкими змінами поверхні або при екстраполяції за межі області вихідних даних.

Крігінг (Kriging). Це метод геостатистичної інтерполяції, який враховує не тільки відстань, але й просторову автокореляцію між вихідними точками – тобто, наскільки значення в одній точці просторово залежить від значень у сусідніх точках. Крігінг передбачає попередній статистичний аналіз даних (побудову варіограми) для моделювання просторової залежності. Він може забезпечити не тільки оцінку інтерпольованого значення, але й оцінку невизначеності цього значення. Крігінг підходить, коли є розуміння або можливість моделювання просторових закономірностей розподілу змінної.

Інтерполяція на основі функції тренду (Trend Surface Analysis / Polynomial). Цей метод підбирає просту математичну функцію (поліном певного порядку) для моделювання загальної, великомасштабної тенденції зміни висоти по всій території або її частині. Поліноміальна функція підбирається методом найменших квадратів для мінімізації сумарного відхилення від вихідних точок. Цей метод ефективний для виявлення загальних закономірностей, але часто не здатен відобразити деталі мікрорельєфу, оскільки "згладжує" локальні варіації.

Вибір та застосування відповідної моделі (Grid чи TIN) та методу інтерполяції є ключовими кроками у створенні якісної ЦМР, яка буде достовірно відображати рельєф та придатна для подальшого просторового аналізу та візуалізації. Сучасні ГІС-системи пропонують гнучкий набір інструментів та налаштувань для кожного з цих етапів.

Програмне забезпечення для геоінформаційних систем, зокрема модулі для 3D-аналізу (як-от 3D Analyst в ArcGIS), надає розширені можливості для створення тривимірних моделей рельєфу у форматі TIN (Triangulated Irregular Network). TIN-модель може бути побудована на основі різноманітних комбінацій вхідних просторових даних, що мають інформацію про висоту (Z-координату). Хоча не всі вхідні об'єкти обов'язково повинні мати Z-значення, щонайменше деякі з них мають визначати висотну основу поверхні.

Основними джерелами даних зі значеннями висот (Z) для створення TIN зазвичай є:

- Оцифровані картографічні матеріали: Точки висот (висотні відмітки) та ізолінії (горизонталі), отримані шляхом векторизації паперових карт.
- Дані дистанційного зондування: Точки з хмар точок (наприклад, з лідарної зйомки), висоти точок та структурних ліній (ліній перегинів, тальвегів, вододілів), отримані в процесі фотограмметричної обробки аерознімків або радарної інтерферометрії (InSAR).
- Дані регулярних сіток: Значення висот у вузлах регулярної сітки, отримані з радарної чи лазерної зйомки, або конвертовані з растрових ЦМР (гридів).
- Польові геодезичні вимірювання: Точки, отримані за допомогою тахеометрів, GNSS-приймачів, нівелювання.
- Дані з інших ГІС або систем автоматизованого проєктування (САПР)

У багатьох випадках, як згадано у попередньому тексті, вихідними даними є горизонталі, оцифровані за допомогою програм-векторизаторів, які потім використовуються для побудови TIN.

Створення TIN-моделі зазвичай здійснюється за допомогою спеціалізованих інструментів у ГІС-програмах. У програмному середовищі (наприклад, у вікні карти View або 3D View / ArcScene в ArcGIS) послідовність дій включає:

1. Додавання вхідних даних: Додавання векторних шарів (з точками, лініями або полігонами), які містять дані про висоту або визначають структурні особливості поверхні.
2. Вибір інструменту створення TIN: Активація відповідної функції, наприклад, "Створити TIN з об'єктів" (Create TIN From Features) у меню "Поверхня".
3. Налаштування параметрів вхідних даних: У діалоговому вікні користувач вказує, які саме шари будуть використовуватися для побудови TIN, та, що найважливіше, як об'єкти кожного шару повинні впливати на структуру створюваної поверхні (визначається "типом об'єкта поверхні" - "Input As").

Визначення типу об'єктів на поверхні. Цей крок є ключовим, оскільки він визначає роль кожного вхідного об'єкта у формуванні TIN-моделі. Для кожного

вхідного шару користувач вибирає тип об'єкта поверхні зі спадаючого списку. Доступні опції залежать від геометричного типу вхідного шару (точки, лінії, полігони).

Підтримувані типи об'єктів поверхні для TIN:

- 3D Точка (Mass Point) - це базові опорні точки, що стають вершинами трикутників TIN. Вони визначають висоту поверхні в конкретних місцях. Вхідний шар має бути точковим і містити значення Z (або брати його з іншого джерела).
- Лінія перегину (Breakline) - це лінійні об'єкти (полілінії), які обов'язково стають ребрами трикутників у TIN. Використання ліній перегинів є критично важливим для коректного моделювання морфології рельєфу та усунення "ефекту терас", оскільки вони "змушують" тріангуляцію слідувати вздовж виражених ліній зміни нахилу (вододілів, тальвегів, брівок, підошов уступів). Лінії перегинів можуть бути "різкими" (hard) або "нерізкими" (soft). Різкі перегини моделюють різкі зміни нахилу (наприклад, обриви, яри), де поверхня не є гладкою. Нерізкі перегини моделюють лінії, вздовж яких відбувається зміна форми, але сама поверхня залишається гладкою (наприклад, перегини схилів). Вхідний шар має бути лінійним і містити значення Z.
- Полігональні об'єкти (Polygon features) можуть використовуватися різними способами для впливу на TIN.
- Полігон, що заміняє (Replace Polygon) - область всередині цього полігона замінюється плоскою поверхнею на певній константній висоті (наприклад, висота урізу води для озера). Усі трикутники в межах полігона отримують цю одну висоту.
- Полігон, що стирає (Erase Polygon) - область всередині цього полігона виключається з поверхні TIN. У цій зоні не буде трикутників, і вона буде вважатися "дірою" в поверхні, де неможливо виконати аналітичні операції. Використовується для виключення територій (наприклад, водойм, забудови, ділянок без даних).

- Полігон, що відтинає (Clip Polygon) – це поверхня TIN створюється тільки в межах цього полігона. Усе, що знаходиться за межами полігона, виключається з моделі. Використовується для визначення області дослідження або експорту частини більшої TIN.
- Полігон, що заповнює (Fill Polygon) трикутниками TIN, що потрапляють всередину цього полігона, може бути присвоєне певне атрибутивне значення (наприклад, код типу території). Цей тип полігонів використовується для асоціювання тематичної інформації з частинами TIN, а не для зміни самої висотної поверхні.

Вибір відповідних типів об'єктів для кожного вхідного шару є вирішальним для отримання точної та морфологічно достовірної TIN-моделі. Використання структурних ліній (Breaklines) разом з точками висот (Mass points) дозволяє створити структуровану TIN, яка краще відображає реальну форму рельєфу порівняно з TIN, побудованою виключно на точках.

На рис. 4.3 показане розташування трикутників TIN на тестовій ділянці, на рис. 4.4 – тривимірну модель рельєфу, на рис. 4.5 – тривимірну модель із накладеними на неї значеннями крутизни схилів, на рис. 4.6 – із накладеними значеннями експозиції схилів.

Сучасні ГІС-системи значно спростили процес створення TIN завдяки зручним інтерфейсам та автоматизації тріангуляції, але якість кінцевої моделі все ще значною мірою залежить від якості та типу вхідних даних, а також правильного вибору параметрів побудови.

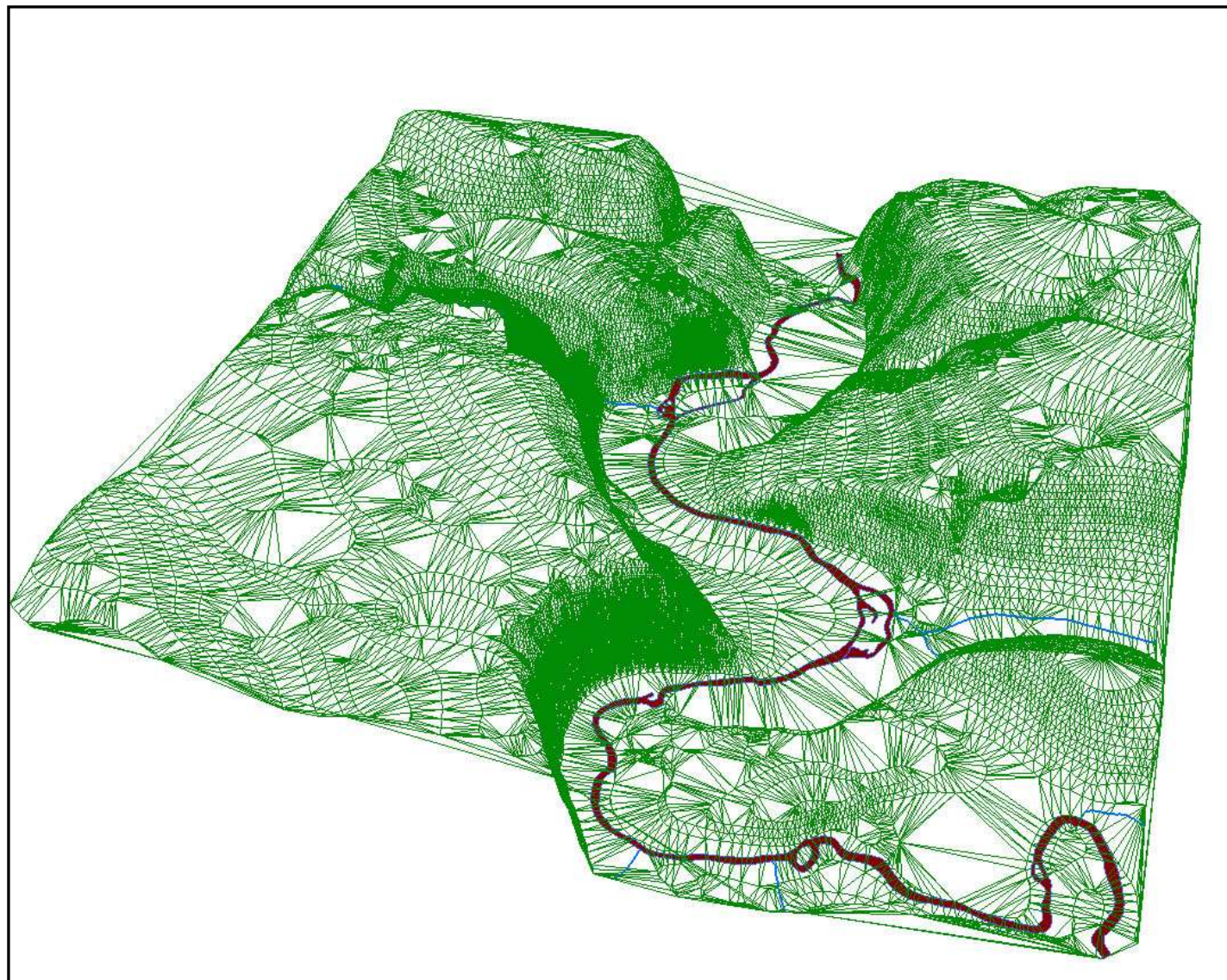


Рис. 4.3 Структура моделі рельєфу на тестову ділянку з трикутників мережі TIN, відтворена у ArcGIS/3D Analyst

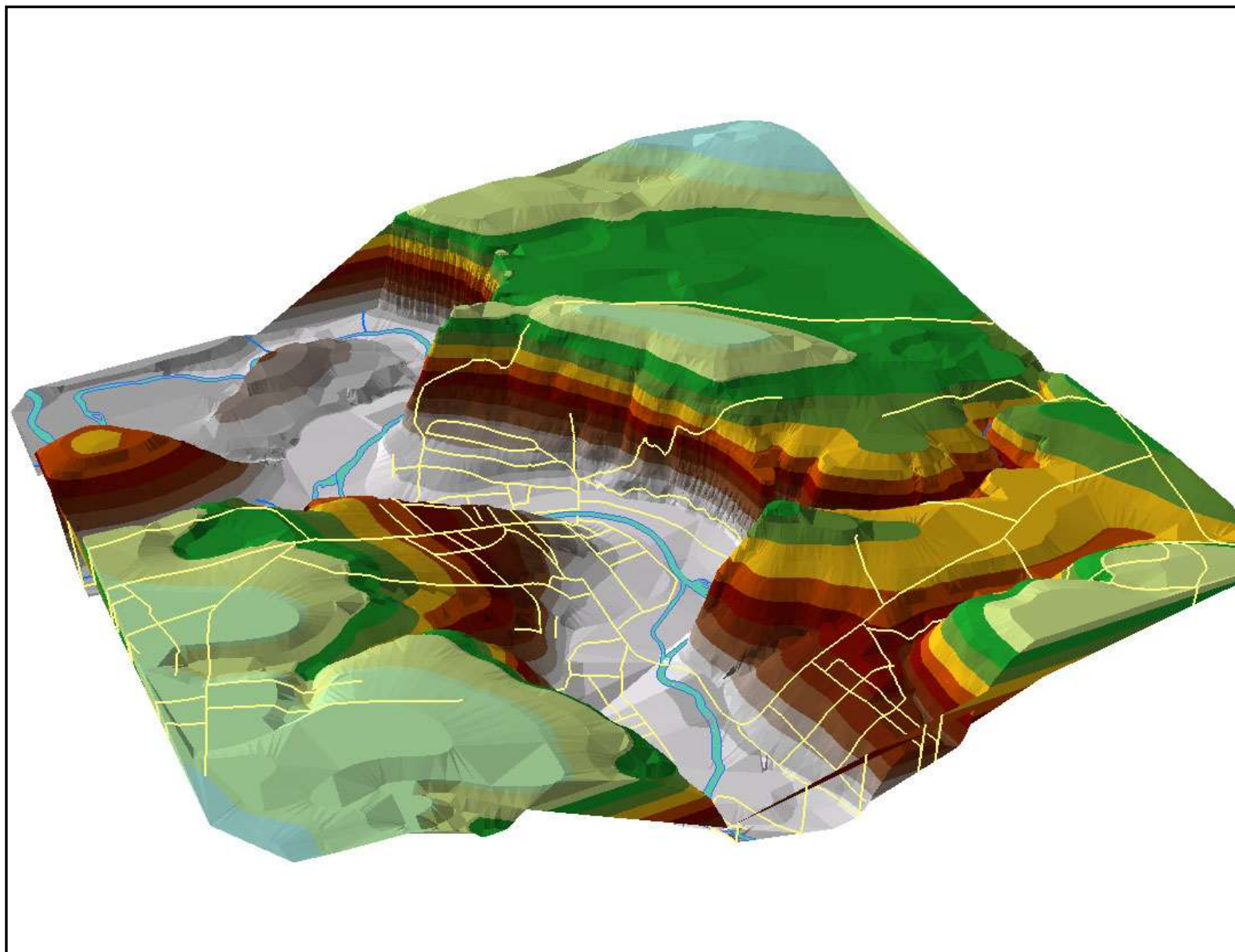


Рис. 4.4 Тривимірна модель рельєфу, відтворена за допомогою ArcGIS / 3D Analyst

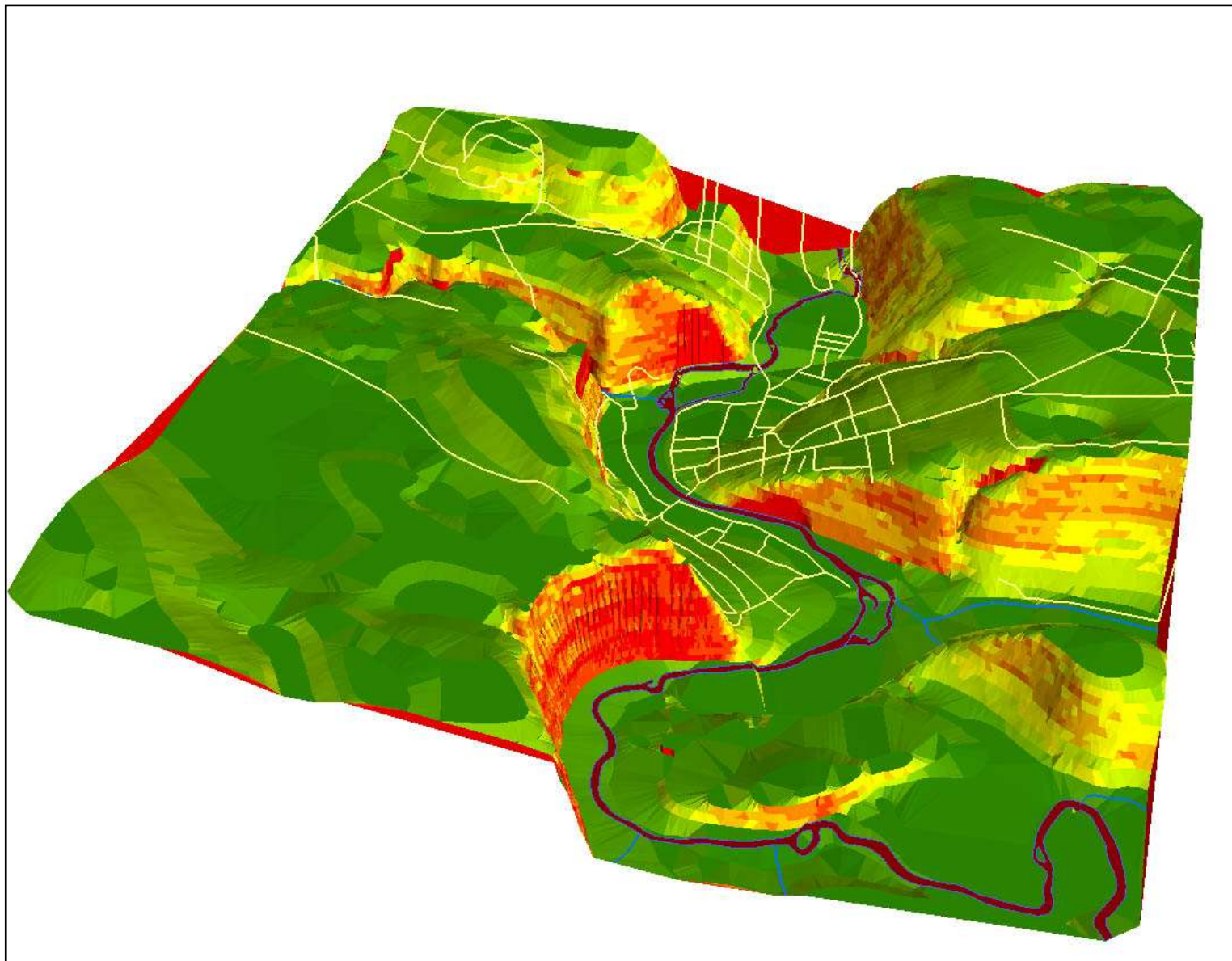


Рис. 4.5 Карта крутизни схилів, накладена на тривимірну модель рельєфу

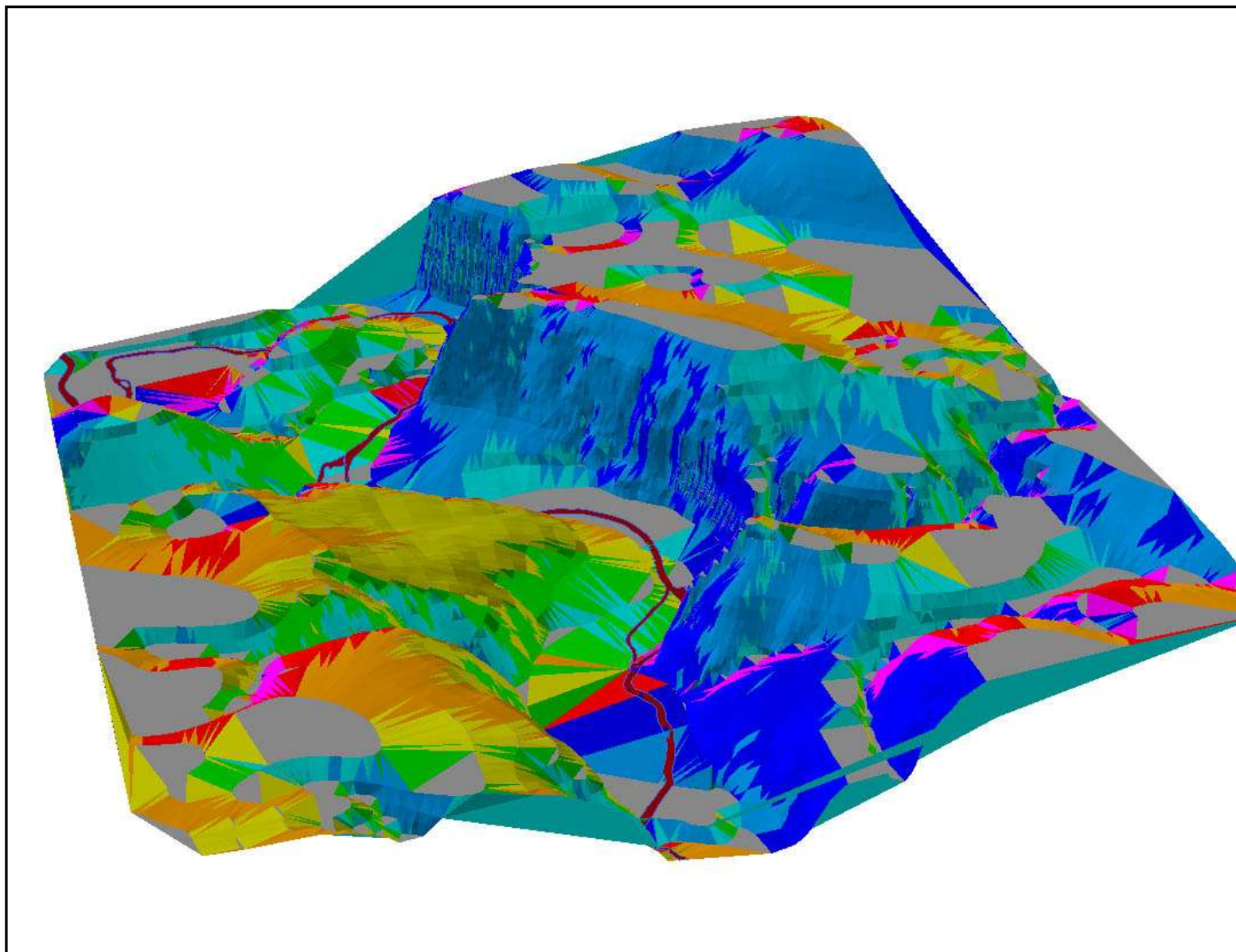


Рис. 4.6 Карта експозиції (напрямку) схилів, накладена на тривимірну модель рельєфу

3.3. СТВОРЕННЯ ТРИВИМІРНИХ ПОВЕРХОНЬ У MAPINFO PROFESSIONAL

На додаток до використання програмного забезпечення ArcGIS, у дослідженні також застосовувалися можливості програмного пакету MapInfo Professional [11] з його модулем "Surface" для створення тривимірних моделей рельєфу. Цей підхід запропонував альтернативний workflow для отримання цифрових моделей поверхні.

Першим кроком у MapInfo було створення ґрид-файлу для досліджуваної ділянки. Цей растровий файл з розширенням `*.grd` був побудований із застосуванням методів тріангуляції за методом Делоне для інтерполяції вихідних даних (імовірно, тих самих 2000 точок або оцифрованих горизонталей, що використовувалися для ArcGIS). Використання модуля "Surface" у MapInfo дозволило значною мірою автоматизувати цей процес інтерполяції. Розмір комірки отриманого ґрид-файлу було обрано аналогічним до розміру комірки ґрид-моделі, побудованої за допомогою ArcGIS.

Однак, файл ґрид, створений у MapInfo, продемонстрував два суттєві недоліки у згаданій версії:

1. Навантаження на відеокарту та швидкість роботи: Обробка цього файлу значно навантажувала графічний адаптер комп'ютера, що призводило до повільного виконання більшості операцій, навіть на потужному обладнанні.

2. Спотворення картографічної проєкції: При створенні ґрид-файлу виникало спотворення картографічної проєкції. Оскільки в MapInfo растровий шар може визначати проєкцію для всіх інших шарів у карті, це призводило до викривлення всієї картографічної основи. Цей недолік вимагав додаткових дій для його усунення на наступних етапах роботи.

Наступним етапом після отримання ґрид-файлу було створення тривимірної моделі рельєфу на його основі та її візуалізація. Отримана поверхня мала помітні відмінності від моделі, побудованої в ArcGIS/3D Analyst. Для згладжування спотворень рельєфу та покращення вигляду застосовувалася

процедура "переінтерполяції" простору між точками, ймовірно, із повторним використанням принципів Делоне або інших методів, доступних у модулі "Surface", щоб отримати більш плавну поверхню з вихідних даних або з вже існуючої ґрид-моделі.

Окрім ґрид-моделі, на основі вихідної нерегулярної мережі точок також проводилася побудова тривимірної поверхні, що складається з полігонів Вороного (Тіссена). У цьому представленні поверхня формується з багатокутних фасет, кожна з яких асоційована з однією вихідною точкою і представляє область, найближчу до цієї точки. Візуалізація такої тривимірної поверхні, складеної з полігонів Вороного (як це, ймовірно, показано на ілюстраціях Рис. 4.7 та Рис. 4.8), є альтернативним способом відображення рельєфу, що відрізняється від представлення у вигляді трикутників (TIN) чи регулярної сітки (Grid).

Цей досвід використання MapInfo Professional з модулем "Surface" продемонстрував, що, хоча програмне забезпечення надавало інструменти для автоматизованої інтерполяції та створення ґрид-моделей та поверхонь на основі полігонів Вороного, конкретна реалізація в згаданій версії мала певні технічні обмеження (продуктивність, проблеми з проєкцією), які впливали на якість та зручність роботи порівняно з іншими ГІС-пакетами.

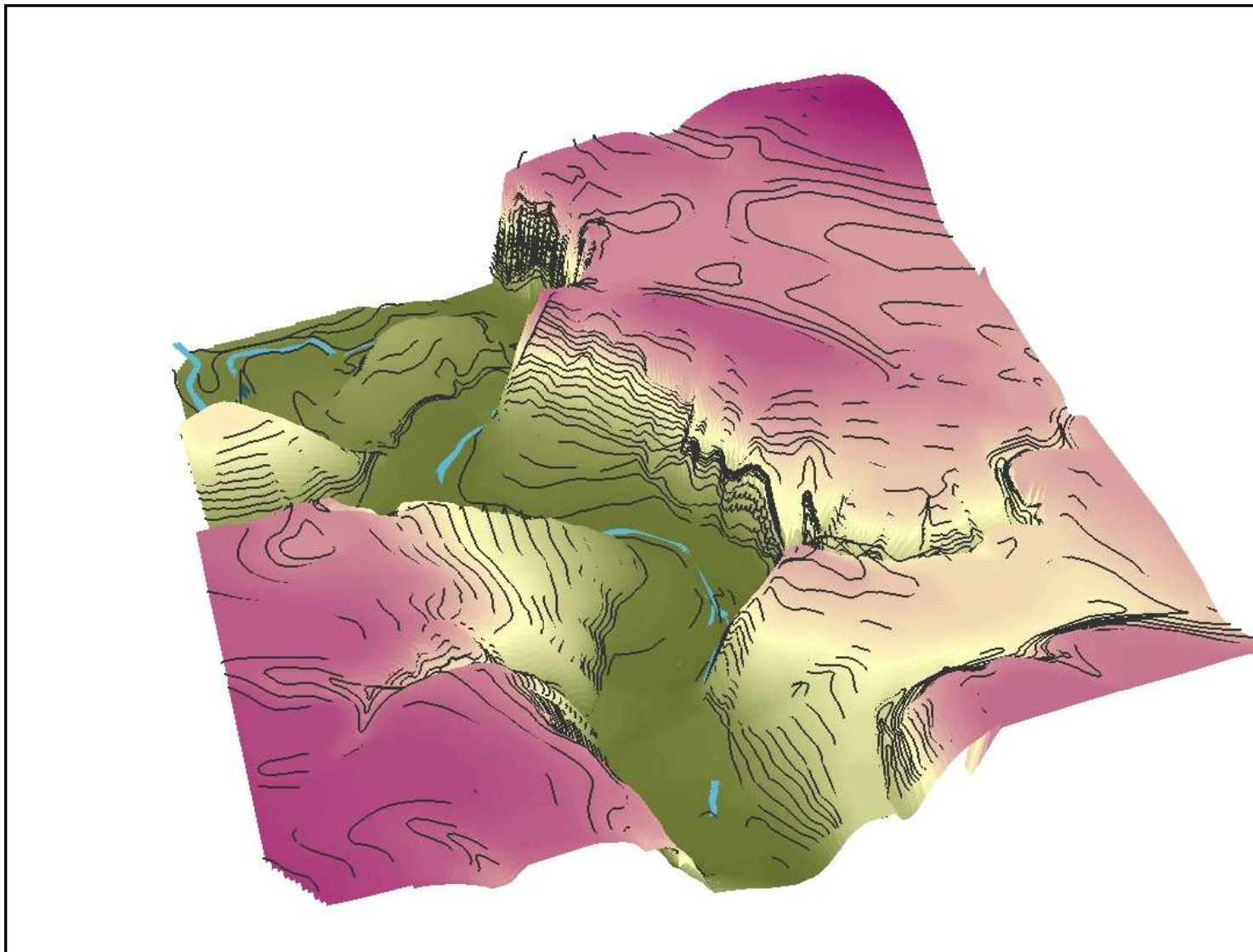


Рис. 4.7. Тривимірна модель рельєфу на тестову ділянку, відтворена з ґрид-файлу засобами „MapInfo Professional / Surface”



Рис. 4.8 Топографічна карта, „натягнута” на тривимірну модель рельєфу тестової ділянки. Тривимірна модель відтворена за допомогою файлу з полігонів Вороного (Voronoi diagrams)

Після розгляду методів побудови TIN-моделей рельєфу важливо оцінити якість отриманих цифрових поверхонь та порівняти результати, отримані за допомогою різних програмних засобів.

Нагадаємо, що Делоне-триангуляція (DT) множини точок V є основою для побудови TIN. Ця просторова структура є двоїстою до діаграми Вороного, побудованої для тих самих точок. Ключові особливості трикутників Делоне:

- Коло, проведене через три вершини будь-якого трикутника Делоне, не містить у своїй внутрішній області жодної іншої точки з вихідної множини V .
- Триангуляція Делоне прагне максимізувати мінімальний кут серед усіх кутів усіх трикутників, мінімізуючи таким чином кількість "гострих" або вироджених трикутників.

Ці властивості сприяють створенню TIN-моделей, які досить точно передають форми рельєфу, включаючи профілі схилів та увігнуті/опуклі ділянки. Однак, як згадувалося раніше, при використанні даних оцифрованих горизонталей, значна відстань між самими горизонталями може призвести до появи артефактів у вигляді хибних уступів або терасоподібних поверхонь, особливо помітних при візуалізації з накладеним шаром горизонталей.

Практичний досвід показує, що якість тривимірних моделей рельєфу (зокрема, TIN), побудованих у різних програмних пакетах, може суттєво відрізнятися. Згідно з аналізом, проведеним у тексті, 3D-карти, створені на основі TIN-моделі за допомогою "MapInfo/Surface", у багатьох випадках не могли конкурувати за якістю та точністю з аналогічними моделями, побудованими із застосуванням тривимірних ГІС-інструментів компанії "ESRI" (таких як ArcGIS/3D Analyst). Це може бути пов'язано з відмінностями в реалізації алгоритмів триангуляції, інтерполяції, обробки вхідних даних (наприклад, структурних ліній) та візуалізації в різних програмних середовищах.

Типовий робочий процес візуалізації тривимірної моделі рельєфу в ArcGIS/3D Analyst після створення TIN-моделі включає:

1. Класифікація та символізація: Визначення діапазонів значень висоти (або інших похідних параметрів, наприклад, крутизни) та присвоєння їм певних кольорів або символів для візуалізації.

2. Побудова тривимірної сцени: Відображення TIN-моделі у тривимірному вікні. На цьому етапі може відбуватися конвертація внутрішнього представлення "первинних трикутників" (простого графа вершин і ребер) у більш оптимізовані для візуалізації структури.

3. Накладання зображень (текстурування): Нанесення на поверхню TIN текстур, наприклад, ортофотопланів або супутникових знімків, для створення більш реалістичного вигляду.

Оцінка точності отриманої цифрової моделі рельєфу є необхідним етапом для підтвердження її достовірності та придатності для використання. Існують два основні підходи до верифікації:

1. Якісна (порівняльна) оцінка: Полягає у візуальному порівнянні отриманої моделі з іншими джерелами даних (наприклад, вихідною картою, іншими моделями, аерофотознімками) або з візуально сприйманою формою рельєфу. Це може включати візуальний аналіз тривимірної моделі, відмивки рельєфу, накладання горизонталей.

2. Кількісна оцінка: Передбачає отримання конкретних числових показників, що характеризують точність моделі, наприклад, розрахунок середньоквадратичної похибки (СКП) шляхом порівняння висот у вибіркових контрольних точках (визначених з більш високою точністю) зі значеннями висот у цих же точках на модельованій поверхні.

У згаданому дослідженні були реалізовані обидва підходи. Зокрема, проводився порівняльний аналіз профілів рельєфу. У ГІС ARC/INFO за допомогою команди STACKPROFILE (доступної в GRID Tools) будувалися профілі одночасно за кількома моделями (наприклад, грід-моделлю та TIN-моделлю). Порівняння цих профілів дозволяє візуально оцінити, наскільки схожими є форми рельєфу, відтворені різними моделями, та виявити ділянки найбільших розбіжностей. Для такого порівняльного аналізу бажано

використовувати як еталон модель, яка мінімально спотворена трансформаціями, наприклад, TIN, побудовану безпосередньо за найточнішими вихідними точками.

Результати порівняльного аналізу профілів у дослідженні показали, що інтерпольовані значення висот у цілому дуже близькі до вихідних даних. Незначні розбіжності (близько 4.5 м) були відзначені на ділянках з екстремальними формами рельєфу – на піках та в долинах (тальвегах), де зміни висоти є найбільш значними. Для області озера розбіжності були меншими (близько 1.2 м), що могло бути пов'язано з особливостями методу інтерполяції, використаного при побудові ґрид-моделі (наприклад, TOPOGRID). При цьому відзначено, що отримана точність відповідала критеріям точності топографічних карт відповідного масштабу. Ці якісні спостереження підтверджувалися подальшими статистичними розрахунками (кількісною оцінкою точності).

Таким чином, процес створення та верифікації тривимірної моделі рельєфу є багатоетапним, включає вибір відповідної моделі даних та методів інтерполяції, а також ретельну оцінку якості отриманої моделі за допомогою як візуальних (порівняння профілів, візуалізація), так і кількісних (статистичні показники похибок) методів. Різні програмні засоби можуть надавати різну якість результату, що підкреслює важливість їх вибору для конкретного завдання.

Висновки

В ході виконання даної дипломної роботи було проаналізовано сучасні методи побудов цифрових моделей рельєфу та новітні програмні комплекси. Здійснено аналіз ефективності роботи алгоритмів комп'ютерної графіки, які використовуються у ГІС при створенні тривимірних моделей рельєфу.

Відпрацьовано технологію побудови 3D карт на ділянці з різко розчленованим і великою різноманітністю форм рельєфу, на основі використання програмних продуктів „ArcGIS/3D Analyst” та «MapInfo»/»Surface».

Досвід використання “3D Analyst” показує ефективність використання цього модуля при побудові тривимірних зображень рельєфу практично в усіх масштабах, у рівнинних та гірських областях. Неефективність використання TIN починає проявлятися при створенні тривимірних зображень рельєфу крупних масштабів – 1:10.000 і більше, навіть на основі ретельно оцифрованих карт та планів. Обриси окремих трикутників значно спотворюють рельєф як на схилах, так і на днищах долин, балок, спотворюючи реальні плавні обриси перегінами, уступами, що виникли як хибні явища при інтерполяції даних. Також хибно відтворюється рельєф на вздовж країв карти, якщо паралельно краям розташовані ерозійні форми. В такому випадку будуються ві́в ребра тріангуляції до “занадто віддалених” точок.. Ми пропонуємо штучно додавати кільканадцять точок з усередненими значеннями висоти вздовж краю карти.

Тривимірні карти, побудовані на основі „MapInfo/Surface” з використанням грі́д-моделі і полігонів Вороного, в багатьох випадках не витримують конкуренції з аналогічними картами, створеними за допомогою тривимірних ГІС фірми “ESRI”, хоча також можуть знайти свою область використання.

Список використаних джерел

1. Зацерковний, В. І., Бурачек, В. Г., Железняк, О. О., та ін. Геоінформаційні системи і бази даних: Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2014. 492с.
2. Зубик, А. І. ГІС в урбаністиці та просторовому плануванні: Львів: 2021. 580с.
3. Шипулін, В. Д. Основи ГІС-аналізу: Х.: ХНУМГ, 2014. 330с.
4. Павленко, Л. А. Геоінформаційні системи: Х.: Вид. ХНЕУ, 2013. 260с.
5. Tomlinson, R. F. The Canada Geographic Information System (CGIS). ArcNews. 2006. Vol. 28, No. 3.
6. Chrisman, N. R. Charting the unknown: how GIS came to be. ArcNews. 2006. Vol. 28, No. 1.
7. The History of Geographic Information Systems: Perspectives from the Pioneers: / за ред. Т. W. Foresman. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1998.
8. Gorr, W. L., Kurland, K. S. GIS Tutorial for ArcGIS Pro 3.1: Esri Press, 2023.
9. Law, M., Collins, A. Getting to Know ArcGIS Pro 3.2: Esri Press, 2024.
10. Esri. ArcGIS Pro {3.x} Documentation / .
11. Precisely. MapInfo Pro: A complete, desktop mapping GIS software solution / .
12. Daniel, L., Loree, P., Whitener, A. Inside MapInfo Professional: Cengage Learning, 2001.
13. Precisely. MapInfo Pro Documentation / 2023.
14. Florinsky, I. V. Digital Terrain Analysis: Treatise on Geomorphology: / за ред. J. Shroder, M. Bishop. San Diego, Academic Press, 2016.
15. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., та ін. Geographic Information Systems and Science: History. Geographic Information Systems and Science. 2015.
16. Зіновєєва, О. В., Зіновєєв, О. М., Дубина, О. В. Оцінка точності цифрових моделей рельєфу для моделювання локальних геоїдів. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2024.

17. Wechsler, S. P. Digital Elevation Model ({DEM}) Uncertainty: Evaluation and Effect on Topographic Parameters: *Esri International User Conference Proceedings*, San Diego, CA , 99.

18. Zhang, X., Kirby, M. Effects of Various Factors on the Accuracy of DEMs: An Intensive Experimental Investigation. *Photogrammetric Engineering \& Remote Sensing*. 2000. Vol. 66, No. 9. С. 1113–1117.

19. Кононюк, В., Фесюк, В. Визначення морфометричних параметрів Повчанської височини засобами {ГІС}. Науковий вісник Східноєвропейського національного університету ім. Лесі Українки. Серія : Географічні науки. 2015. No. 14 (315). С. 23–29.

20. Мельник, О. В. Геопросторові бази даних. Конспект лекцій: Луцьк: РВВ “Вежа-Друк,” 2022. 156с.

21. Черлінка, В. Р. Особливості побудови растрової гідрологічно-коректної цифрової моделі мікро- та мезорельєфу засобами {ГІС GRASS}. Вісник аграрної науки Причорномор’я. 2013. Vol. 1, No. 4 (74). С. 174–182.

22. Tomlin, C. D. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*: Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.

23. Жданюк, Б. С. Побудова цифрових моделей рельєфу та визначення інших морфометричних параметрів Мізоцького кряжу засобами {ГІС}. Часопис картографії. 2012. No. 5. С. 88–97.

24. Мельник, О. В. Геопросторові бази даних. Лабораторний практикум. 2022.

25. Voloshyn, V., Melnyk, O., Melnyk, Y., та ін. GEOINFORMATION MODELLING OF STYR RIVER WATER LEVELS IN FLOOD PERIOD WITHIN THE TERRITORY OF LUTSK. 2017.

26. Shostak, A., Voloshyn, V., Melnyk, O., та ін. *Geoinformation Modeling of Flooded Areas in Settlements in the Example of Lutsk*. 2018.

27. Мельник, Ю. А., Верешко, О. В., Мельник, О. В., та ін. Використання сучасних інформаційних технологій для містобудівних потреб. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2023. No. 20. С. 72–78.

28. Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., Сунак, П. О., та ін. Оцінка зон підтоплення із використанням гіс QGIS в межах міста Луцька. .

29. Copernicus: Sentinel-2 - eoPortal: URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-2#copernicus-sentinel-2--the-optical-imaging-mission-for-land-services>(дата звернення: 13.04.24).