



# Методи цифрового моделювання рельєфу

Цифрове моделювання рельєфу (ЦМР) – це процес створення математичного представлення земної поверхні за допомогою висотних даних. Сьогодні розглянемо різні методи побудови ЦМР, включаючи триангуляцію Делоне, метод зворотних зважених відстаней та сплайн-інтерполяцію.

Триангуляція Делоне створює мережу трикутників, де кожна вершина представляє точку висоти. Цей метод ефективний для нерівномірно розподілених даних і забезпечує точну репрезентацію різких змін рельєфу, як-от обриви та гірські хребти.

Метод зворотних зважених відстаней (IDW) використовує принцип, що ближчі точки мають більший вплив на значення висоти в конкретній позиції. Цей метод простий у реалізації, але може створювати ефект "бичачого ока" навколо вимірюваних точок.

Сплайн-інтерполяція застосовує математичні функції для створення гладких поверхонь між точками даних. Цей метод особливо корисний для моделювання плавних ландшафтів, але може згладжувати важливі деталі рельєфу.

У практичному застосуванні ЦМР використовується для гідрологічного моделювання, аналізу видимості, планування інфраструктури, оцінки ризиків природних катастроф та багатьох інших галузей, де розуміння топографії є критичним.

Точність ЦМР залежить від якості вхідних даних, щільності точок, складності рельєфу та вибраного алгоритму інтерполяції. Важливо підбирати оптимальний метод відповідно до конкретних вимог проекту та характеристик досліджуваної території.



# Зміст презентації

## 1 Основні поняття

Визначення цифрової моделі рельєфу, її компоненти та формати представлення даних. Розглянемо різницю між DTM (Digital Terrain Model) та DSM (Digital Surface Model). Обговоримо растрові та векторні моделі, їх переваги та недоліки для різних задач аналізу території.

## 2 Побудова моделей

Методи створення ЦМР: фотограмметричні, лазерне сканування (LiDAR), радарна інтерферометрія та топографічні зйомки. Детально розглянемо сучасні технології збору даних, особливості повітряного та наземного сканування, точність кожного методу та специфіку застосування в різних ландшафтних умовах.

## 3 Алгоритми інтерполяції

Аналіз методів інтерполяції: триангуляція Делоне, сплайн-інтерполяція, крігінг та метод зворотних зважених відстаней. Розберемо математичні основи кожного алгоритму, їх обчислювальну складність, вплив параметрів на результати та рекомендації щодо вибору методу залежно від характеру місцевості та розподілу вхідних точок.

## 4 Точність моделей

Фактори точності ЦМР: роздільна здатність, якість вхідних даних, особливості рельєфу та вибір оптимального алгоритму обробки. Представимо методи валідації та оцінки якості моделей, включаючи кількісні показники RMSE, MAE та візуальні методи контролю. Розглянемо практичні рекомендації щодо підвищення точності при створенні ЦМР для різних типів ландшафту.

## 5 Практичне застосування

Огляд основних сфер використання ЦМР: гідрологічне моделювання, аналіз видимості, розрахунок обсягів земляних робіт, проектування лінійних об'єктів та оцінка ерозійних процесів. Розглянемо конкретні приклади використання ЦМР у містобудуванні, екології, сільському господарстві та інженерних проєктах.

# Що таке цифрова модель рельєфу (ЦМР)?

## Визначення ЦМР

ЦМР - цифрове представлення топографії земної поверхні у вигляді масиву точок з координатами X, Y, Z. Забезпечує математичну інтерпретацію висотних характеристик ландшафту для подальшого аналізу та візуалізації.

На відміну від традиційних карт, ЦМР дозволяє проводити автоматизований аналіз характеристик рельєфу та створювати тривимірні візуалізації. ЦМР відрізняється від цифрової моделі місцевості (ЦММ) тим, що відображає лише рельєф, без урахування рослинності, будівель та інших об'єктів.

## Значення для ГІС

Основа для просторового аналізу, моделювання гідрологічних процесів, розрахунку ухилів та експозиції схилів. Незамінна для планування будівництва, прогнозування стихійних лих та управління природними ресурсами.

На базі ЦМР виконується аналіз видимості, прокладання оптимальних маршрутів, визначення вододілів та напрямків стоку води. Точні ЦМР дозволяють моделювати зони затоплення, ризику ерозії ґрунтів та лавинної небезпеки. У сільському господарстві ЦМР використовується для точного землеробства, оптимізації зрошення та дренажних систем.

## Історія розвитку

Еволюціонувала від паперових топографічних карт з ізолініями до фотограмметричних методів 1950-х років. З 1980-х - розвиток цифрових технологій збору даних через супутники та лідари. Сучасні ЦМР досягають сантиметрової точності.

Важливою віхою став запуск місії Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) у 2000 році, яка забезпечила глобальне покриття ЦМР з роздільною здатністю 30 м. Сучасні технології включають використання дронів для створення високоточних локальних ЦМР, методи фотограмметрії на основі мобільних пристроїв та нові супутникові платформи, такі як TanDEM-X, що забезпечує глобальне покриття з вертикальною точністю до 2 м.



# Види цифрових моделей рельєфу

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) поділяються на кілька основних типів залежно від способу представлення даних, точності та призначення. Кожен тип має свої переваги та оптимальні сфери застосування.



## Растрові моделі (*GRID*)

Представлення у вигляді регулярної матриці пікселів з висотними значеннями. Простий формат для аналізу та візуалізації, оптимальний для великих територій. Зберігається у форматах GeoTIFF, ESRI ASCII та IMG. Кожен піксель містить одне значення висоти, що визначає середню висоту в межах його площі. Роздільна здатність растру визначає детальність моделі: чим менший розмір пікселя, тим вища точність, але й більший обсяг даних.



## Спеціалізовані моделі

Включають цифрові моделі місцевості (DTM), що відображають "голу землю" без рослинності та будівель, та цифрові моделі поверхні (DSM), які включають всі об'єкти на поверхні. Також розробляються моделі батиметрії для підводного рельєфу та глобальні моделі, як SRTM та ASTER GDEM з роздільною здатністю 30–90 м. Спеціалізовані моделі часто створюються для конкретних галузей: гідрологічного моделювання, оцінки ризиків зсувів, планування телекомунікаційних мереж.



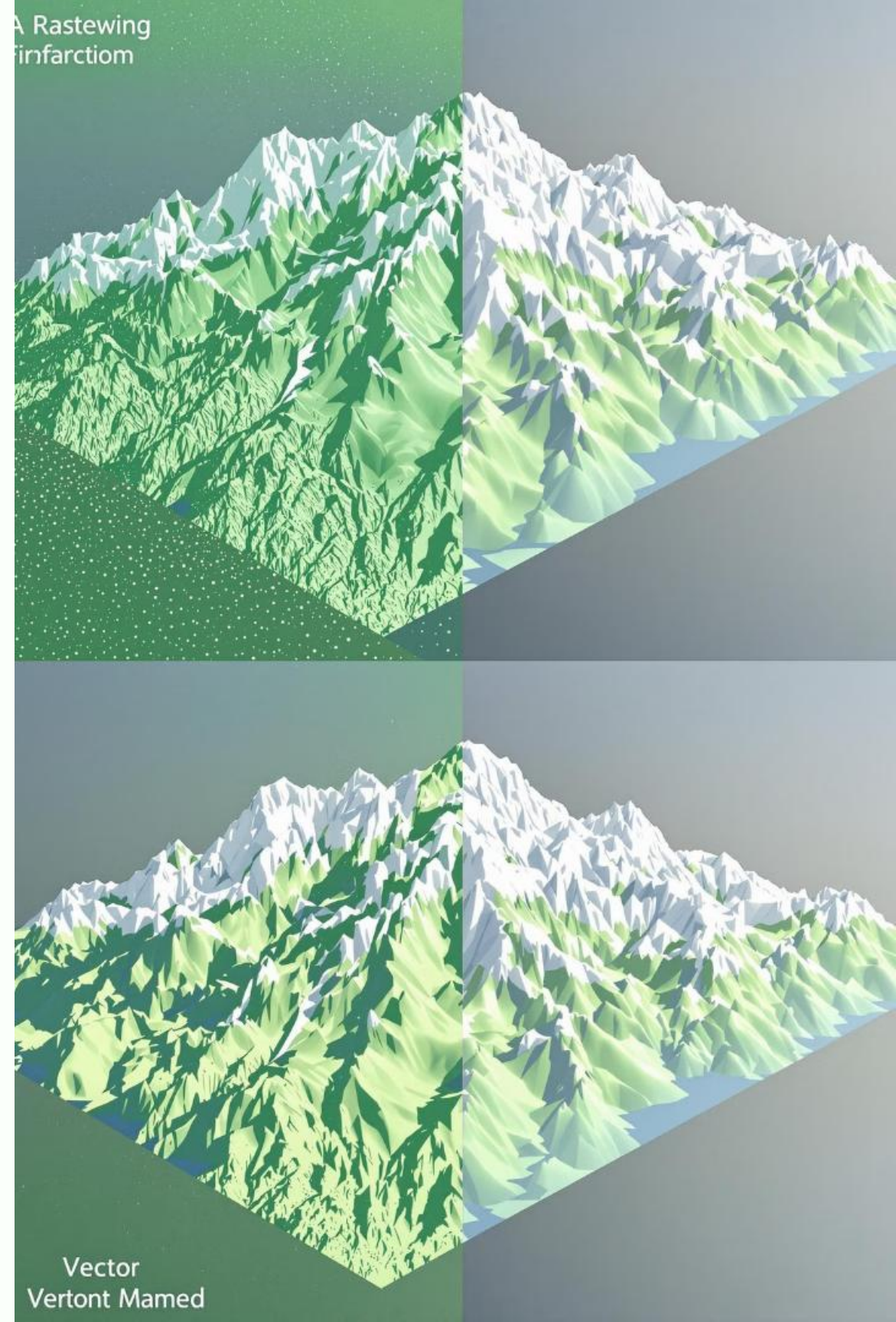
## Векторні моделі (*TIN*)

Представлення у вигляді нерегулярної мережі трикутників. Краще зберігає структурні лінії рельєфу та забезпечує високу точність при меншому обсязі даних. Ефективні для складних топографічних поверхонь. Трикутники формуються на основі опорних точок так, щоб точно відобразити особливості рельєфу, як-от вододіли, яри чи гребені гір. TIN-моделі особливо цінні при моделюванні складних інженерних об'єктів та у випадках, коли важлива висока точність на локальних ділянках.

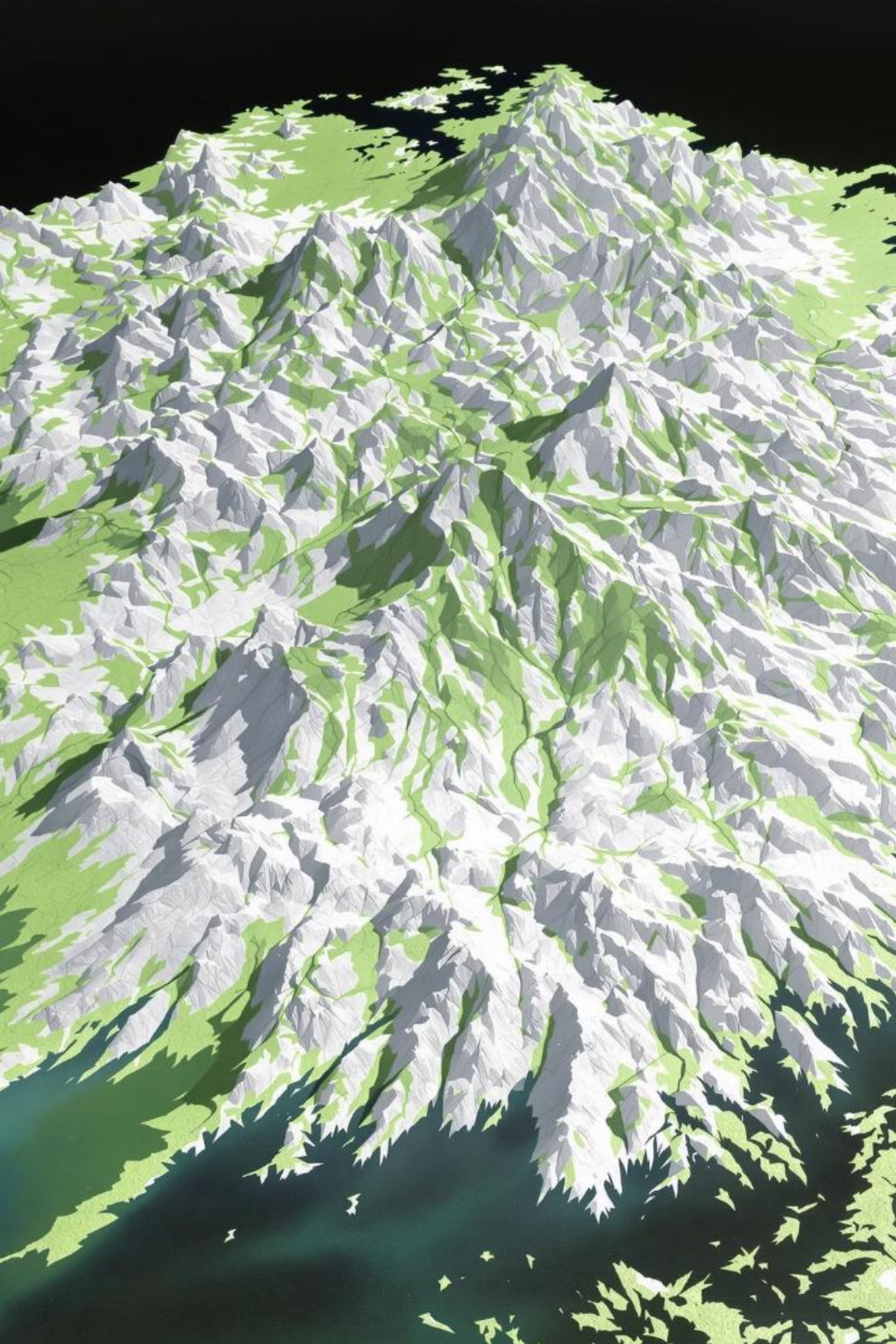


## Гібридні моделі

Комбінація растрових і векторних підходів для оптимального представлення різних елементів ландшафту. Використовує переваги обох типів моделей, застосовуючи векторні дані для ліній розриву та растрові – для плавних поверхонь. Під час створення гібридних моделей структурні лінії рельєфу (річки, хребти, кромки укосів) зберігаються як векторні елементи, тоді як загальна поверхня представляється растром. Це дозволяє досягти збалансованого співвідношення між точністю та обчислювальною ефективністю.







# Джерела даних для побудови ЦМР

1

## Топографічні карти

Масштаб 1:10 000 - 1:50 000 з горизонталями через 5-20 м. Забезпечують базову інформацію про висоти та форми рельєфу з точністю до 1/3 висоти перерізу горизонталей. Для детального аналізу використовуються спеціалізовані карти з ізолініями рельєфу, відмітками висот та структурними лініями. Цифрування карт потребує геореференціювання та урахування проекційних спотворень.

2

## Аерофотознімання

Роздільна здатність 5-30 см/піксель. Використовується стереофотограмметрична обробка з перекриттям знімків 60-80%, що дозволяє досягти вертикальної точності 0,1-0,5 м. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) дозволяють оперативно отримувати дані для невеликих території з високою деталізацією. Обробка включає аеротріангуляцію, створення хмари точок та ортофотопланів за допомогою алгоритмів SfM (Structure from Motion).

3

## Супутникові знімки

Дані з супутників Sentinel (10 м), Landsat (30 м) та комерційних систем з роздільною здатністю до 0,3 м. Забезпечують глобальне покриття та можливість створення ЦМР з точністю 2-5 м по висоті. Радарні системи (SAR) дозволяють отримувати дані незалежно від погодних умов та часу доби. Глобальні моделі SRTM (90 м), ASTER GDEM (30 м) та ALOS World 3D (5 м) створені на основі супутникових даних і доступні для більшості території планети.

4

## Лідарне сканування

Щільність точок 2-50 точок/м<sup>2</sup>. Забезпечує вертикальну точність до 5-15 см та можливість фільтрації рослинності для створення цифрової моделі поверхні (DEM) і цифрової моделі місцевості (DTM). Повітряне лазерне сканування (ALS) охоплює великі території, а наземне (TLS) використовується для детального моделювання локальних об'єктів. Сучасні системи дозволяють отримувати повнохвильову інформацію та мультиспектральні дані для класифікації точок за типами поверхні.

5

## GNSS-вимірювання

Диференціальні методи GNSS забезпечують сантиметрову точність визначення координат опорних точок. Використовуються для створення геодезичної основи ЦМР, калібрування та валідації інших методів. RTK (Real Time Kinematic) та PPK (Post-Processing Kinematic) технології забезпечують швидкі та точні польові вимірювання для невеликих території або критичних ділянок з особливими вимогами до точності.

6

## Батиметричні дані

Ехолотування та гідролокація бокового огляду для моделювання підводного рельєфу. Багатопроменеві ехолоти забезпечують деталізацію дна водоєм з роздільною здатністю до 0,1 м. Інтеграція наземних та підводних даних дозволяє створювати безперервні моделі рельєфу для прибережних зон, річкових долин та водосховищ, що є важливим для гідрологічного моделювання та управління водними ресурсами.

# Етапи побудови цифрової моделі рельєфу

## Збір даних

Використання топографічних карт (масштаб 1:10 000 - 1:50 000), аерофотознімків (роздільна здатність 5-30 см/піксель), супутникових даних (Sentinel, Landsat, комерційні системи) та лідарного сканування (щільність 2-50 точок/м<sup>2</sup>) для отримання первинної інформації про рельєф. Важливо забезпечити достатнє покриття території та оптимальну щільність точок вимірювання.

## Оцінка якості

Перевірка точності та достовірності моделі шляхом порівняння з контрольними точками та польовими вимірами. Розраховуються статистичні показники точності (середня квадратична похибка, систематичне зміщення), виконується візуальний аналіз та перевірка гідрологічної коректності моделі. Виявлені помилки документуються та аналізуються для вдосконалення методики в наступних проектах. Кінцева модель супроводжується метаданими про точність та методи створення.



## Обробка даних

Фільтрація шумів, корекція систематичних та випадкових помилок, усунення викидів та аномалій у даних. Включає геометричну корекцію, радіометричне калібрування знімків та класифікацію точок лідарних даних (земля, рослинність, будівлі). Об'єднання різних джерел даних в єдиний масив для подальшого аналізу вимагає узгодження координатних систем та приведення до єдиної системи висот.

## Інтерполяція

Застосування математичних алгоритмів (крігінг, зворотно зважені відстані, сплайни, поліноміальна регресія) для розрахунку значень висот у точках, де відсутні виміри, створення безперервної поверхні. Важливо обрати оптимальний метод інтерполяції залежно від характеру рельєфу, розподілу вихідних точок та вимог до кінцевого результату. На цьому етапі також враховуються структурні лінії рельєфу (вододіли, тальвеги).

## Створення моделі

Побудова растрової (GRID) або TIN-моделі рельєфу з визначеною роздільною здатністю та точністю. Растрова модель представляє поверхню як регулярну матрицю значень висот і оптимальна для аналізу та візуалізації. TIN-модель використовує нерегулярну мережу трикутників і краще відображає структурні особливості рельєфу. На цьому етапі також виконується генералізація моделі відповідно до масштабу кінцевого продукту.

Процес створення ЦМР є ітеративним і може потребувати повторення окремих етапів для досягнення необхідної точності. Залежно від складності рельєфу та вимог до моделі, може знадобитися кілька циклів обробки даних, перевірки результатів та коригування параметрів інтерполяції. У складних випадках доцільно застосовувати гібридний підхід, комбінуючи різні методи та джерела даних.



# Растрова модель рельєфу (*GRID*)

Растрова модель GRID є одним із найпоширеніших форматів представлення цифрової моделі рельєфу в геоінформаційних системах, що забезпечує ефективну обробку просторових даних.

## Принцип побудови

Рельєф представлений у вигляді регулярної матриці висот з однаковими розмірами комірок. Кожна комірка містить значення висоти відповідної ділянки місцевості. Процес створення включає інтерполяцію даних з різних джерел для заповнення всіх комірок регулярної сітки.

## Переваги

Простота обробки та аналізу даних, швидкість проведення розрахунків, ефективне зберігання великих обсягів даних, сумісність з іншими растровими моделями. Дозволяє легко виконувати гідрологічний аналіз, моделювання ерозійних процесів та аналіз видимості.

## Недоліки

Ступінчастість представлення рельєфу, погане відображення різких перепадів висот і структурних ліній, залежність точності від розміру комірки, значний об'єм при високій деталізації. Складність точного відображення лінійних об'єктів ландшафту.

## Сфери застосування

### 1 Гідрологічний аналіз

Моделювання напрямків стоку, визначення водозбірних басейнів, прогнозування паводків та розрахунок зон затоплення.

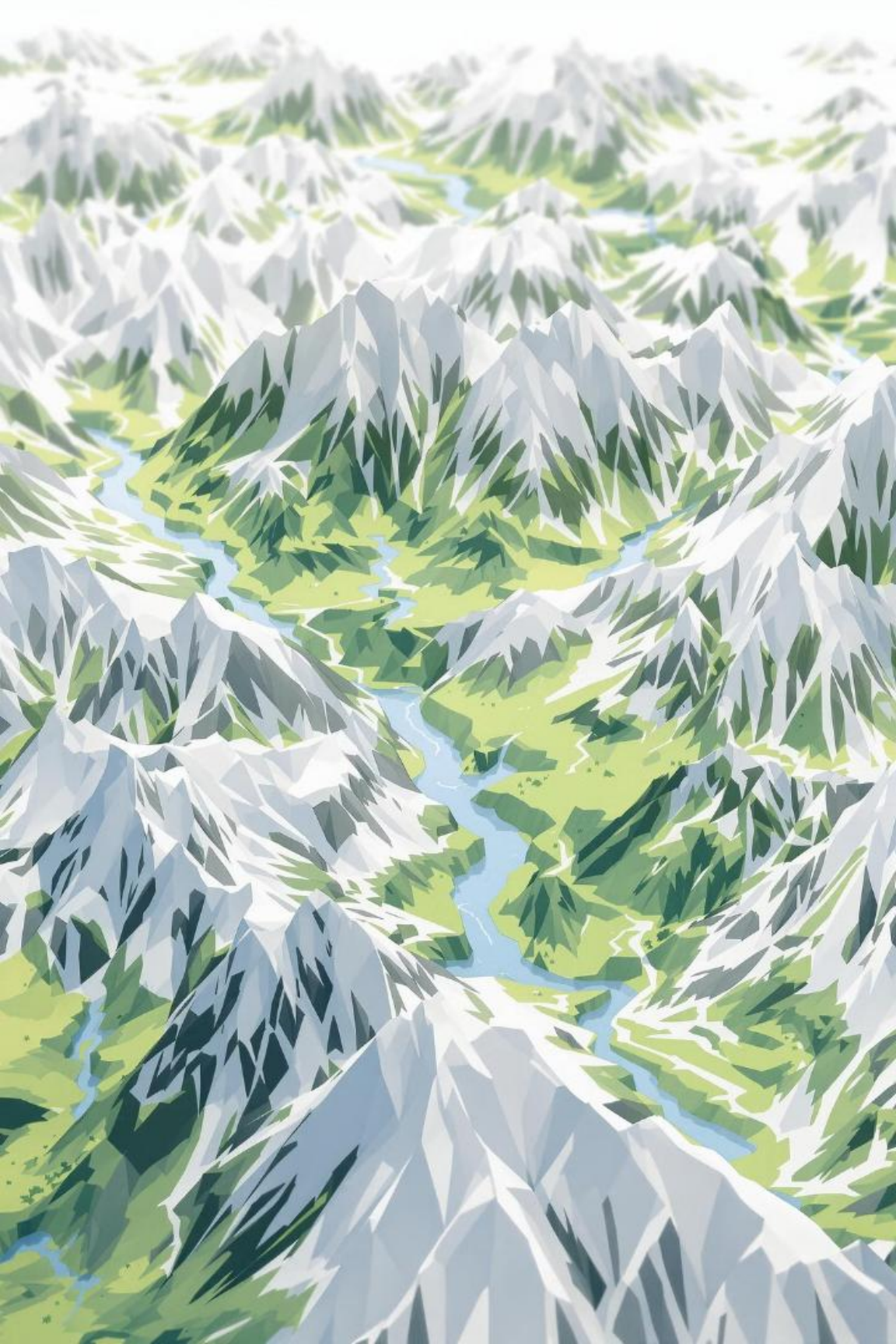
### 2 Аналіз рельєфу

Обчислення ухилів, експозиції схилів, побудова поперечних профілів, розрахунок об'ємів земляних робіт.

### 3 Екологічне моделювання

Аналіз ерозійних процесів, моделювання поширення забруднень, оцінка стійкості ландшафтів до антропогенних навантажень.

Різноманітні дані дистанційного зондування Землі, такі як результати радарної інтерферометрії (SRTM, ASTER) та лідарного сканування, часто представляються саме у форматі GRID для подальшої обробки та аналізу.



# Векторна модель рельєфу (TIN)

## Триангуляція Делоне

Метод побудови трикутників, при якому коло, описане навколо будь-якого трикутника мережі, не містить жодної іншої вершини. Забезпечує оптимальну форму трикутників, мінімізуючи кути між сторонами. Цей алгоритм є найбільш ефективним для побудови TIN-моделей, оскільки створює найбільш рівносторонні трикутники, що підвищує точність інтерполяції висот між опорними точками.

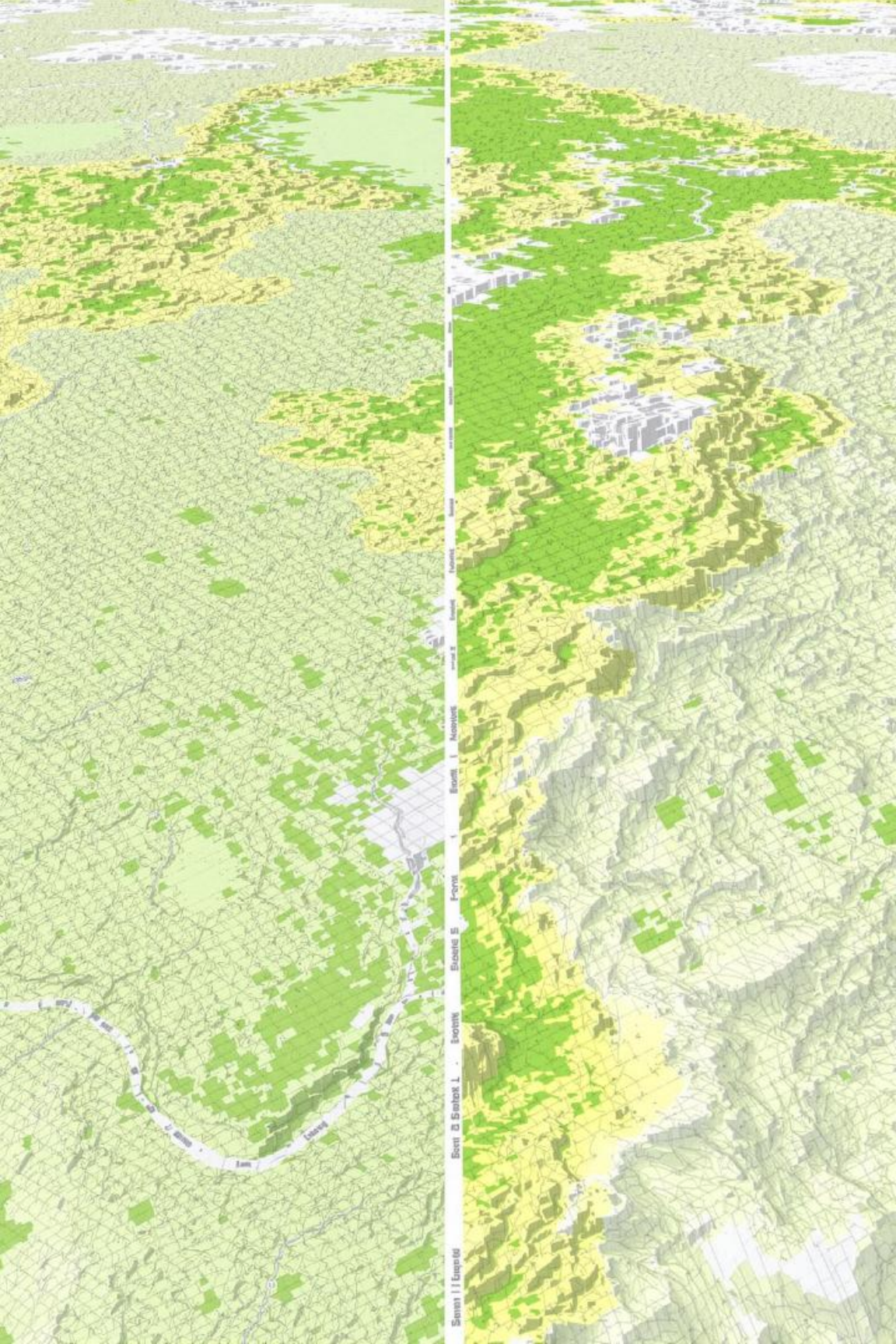
## Особливості TIN

Збереження структурних ліній рельєфу, таких як вододіли, тальвеги та брівки. Нерегулярна структура дозволяє варіювати щільність точок залежно від складності ділянки рельєфу. TIN-модель адаптивно відображає поверхню з різним ступенем деталізації – більше точок у місцях зі складним рельєфом і менше на плоских ділянках. Це значно підвищує точність моделювання крутих схилів, скель та каньйонів, зберігаючи при цьому топологічні відношення між елементами рельєфу.

## Сфери використання

Моделювання складного рельєфу гірських районів, берегових ліній, техногенних форм. Ефективна для інженерних розрахунків, оцінки зсувонебезпечних територій та гідрологічного моделювання. TIN застосовується також для проектування доріг, будівництва гідротехнічних споруд, створення високоточних 3D-моделей міської забудови, моніторингу ерозійних процесів, розрахунку об'ємів земляних робіт та прогнозування зон затоплення. Порівняно з растровими моделями, забезпечує краще представлення розривних ліній та критичних точок рельєфу.





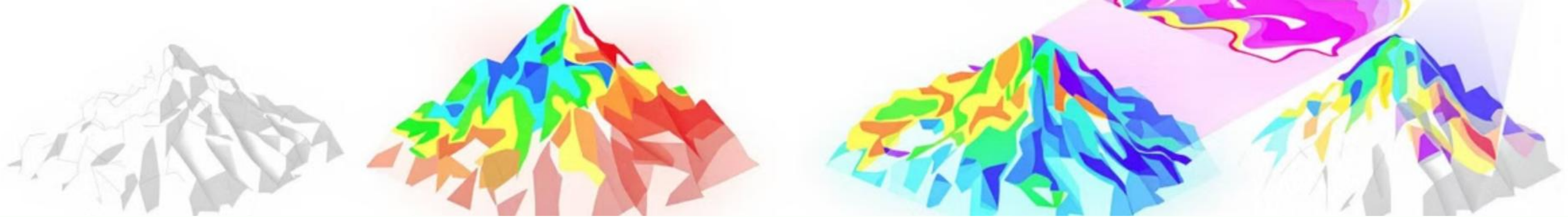
# Порівняння GRID та TIN моделей

Характеристика	GRID	TIN
Точність	Знижується для крутих схилів; зазвичай 0.5-5 м при роздільній здатності 10-30 м	Зберігає структурні лінії рельєфу; точність до 0.1-0.3 м на складних ділянках
Обсяг даних	Для території 10×10 км з роздільною здатністю 5 м – близько 16 МБ	Для аналогічної території – 4-8 МБ залежно від складності рельєфу
Швидкість обробки	Швидка обробка (30-50% швидше); оптимальна для просторового аналізу	Повільніша для складного рельєфу; вимагає до 2× більше часу для аналізу водозбору
Застосування	Гідрологічне моделювання, аналіз схилів та експозиції	Інженерні розрахунки, моделювання зсувів, 3D-візуалізація
Структура даних	Регулярна сітка з однаковим розміром комірок; проста реалізація алгоритмів	Нерегулярна сітка трикутників; складніша топологічна структура
Джерела даних	Супутникові знімки, аерофотозіомка, лідарні дані, топографічні карти	Переважно наземні виміри, лідарні дані високої щільності, структурні лінії рельєфу

При виборі між моделями GRID та TIN необхідно враховувати специфіку проєкту. GRID-моделі забезпечують рівномірне покриття території і легше інтегруються з іншими растровими даними, такими як супутникові знімки. Вони оптимальні для аналізу великих території з відносно однорідним рельєфом.

TIN-моделі, натомість, краще підходять для детального моделювання складних форм рельєфу завдяки адаптивній щільності точок. Вони зберігають топологічні особливості ландшафту і забезпечують вищу точність у критичних зонах – вододілах, тальвегах та інших структурних лініях. Це робить їх незамінними для інженерних розрахунків та проєктування будівництва на складних ділянках.





# Алгоритми інтерполяції: огляд

## 1 Лінійна

З'єднує точки прямими лініями. Найшвидший метод, але створює нереалістичні гострі переходи на рельєфі. Має обчислювальну складність  $O(n)$  і підходить для попередньої візуалізації даних. Добре працює при густій мережі вихідних точок, але не рекомендується для кінцевого гідрологічного аналізу через відсутність згладжування.

## 3 Сплайн

Використовує поліноміальні криві для створення гладкої поверхні. Забезпечує природний вигляд рельєфу, але може створювати артефакти при різких змінах висот. Різновиди включають тонкий сплайн (thin-plate) та регуляризований сплайн, що дозволяє контролювати жорсткість поверхні через параметр напруги. Особливо корисний для моделювання плавних геологічних поверхонь та створення високоякісних карт ізоліній висот.

## 2 IDW

Зважає вплив точок за відстанню. Ефективний для нерівномірно розподілених висотних даних, добре зберігає локальні особливості рельєфу. Параметр степеня відстані ( $p$ ) визначає ступінь згладжування поверхні: при  $p=2$  (наймоширший) створюється збалансована поверхня, при  $p>3$  посилюється вплив найближчих точок. Широко застосовується в моделюванні опадів, температури та забруднення повітря.

## 4 Крігінг

Статистично оптимальний метод, що враховує просторову кореляцію даних. Найточніший для складного рельєфу, але вимагає більше обчислювальних ресурсів. Базується на варіограмному аналізі для визначення просторової структури даних. Різновиди включають простий, звичайний та універсальний крігінг. Забезпечує оцінку похибки інтерполяції в кожній точці, що дозволяє оцінити достовірність створеної моделі. Незамінний для точного моделювання родовищ корисних копалин та детального гідрологічного аналізу.



# Лінійна інтерполяція

## Принцип роботи

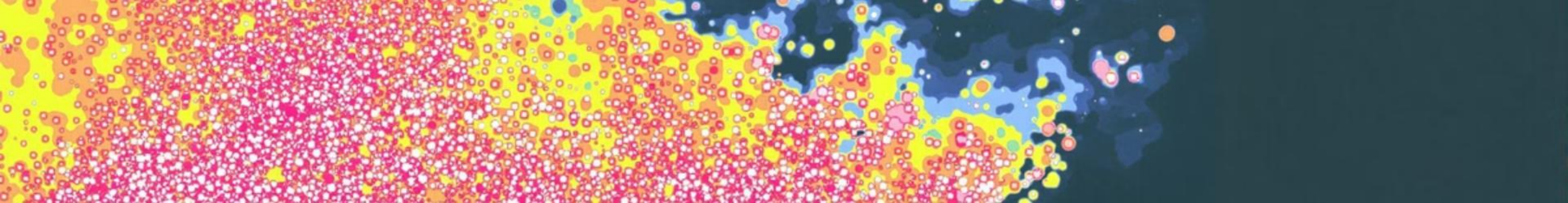
Базується на формулі  $y = y_1 + (x - x_1)(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$ , де точки  $(x_1, y_1)$  та  $(x_2, y_2)$  є відомими. Проста апроксимація застосовується як між сусідніми точками даних, так і в мережі TIN для моделювання поверхні. У багатовимірному просторі цей метод розширюється через білінійну та трилінійну інтерполяцію. При картографуванні рельєфу кожен трикутник TIN утворює плоску грань, що з'єднує три вершини з відомими висотами.

## Переваги

Обчислювальна ефективність з  $O(n)$  складністю. Не створює артефактів "овершутів". Інтуїтивно зрозуміла для користувачів. Підходить для попереднього аналізу даних та попередньої візуалізації поверхонь. Забезпечує точне відтворення вхідних даних - інтерпольована поверхня завжди проходить через точки вибірки. Легка імплементація в програмному забезпеченні ГІС. Потребує мінімальної кількості вхідних параметрів, що спрощує робочий процес для початківців.

## Недоліки

Створює "зламани" нереалістичні поверхні на стиках. Точність різко знижується при моделюванні рельєфу з різкими перепадами висот. Не враховує глобальні тренди в даних. Не підходить для кінцевого аналізу гідрологічних процесів. При візуалізації може створювати помітні трикутні артефакти, особливо при розрідженому наборі даних. Відсутність згладжування призводить до проблем при розрахунку похідних характеристик, таких як ухил та експозиція схилів. При збільшенні масштабу стають помітними геометричні артефакти, що ускладнює інтерпретацію дрібномасштабних особливостей рельєфу.



# Метод зворотних зважених відстаней (*IDW*)

## Математична основа

Використовує формулу обернено пропорційної відстані для розрахунку ваги точок. Чим ближче точка, тим більший її вплив на результат інтерполяції. Застосовується формула  $z(x) = \frac{\sum(w_i \cdot z_i)}{\sum w_i}$ , де  $w_i = 1/d_i^p$ . Основна ідея полягає в тому, що значення в невідомих точках можна оцінити як середньозважене значення відомих точок, де вага змінюється залежно від відстані.

## Параметри

Ключовий параметр  $p$  визначає ступінь впливу відстані (зазвичай  $p=2$ ). При збільшенні  $p$  зростає вплив найближчих точок. Радіус пошуку обмежує кількість точок для обчислень, оптимізуючи швидкодію. Поріг згладжування допомагає уникнути "очків буика" у вихідних даних. Кількість сусідів, що враховуються при розрахунку, може бути фіксованою або змінною, залежно від щільності вхідних даних.

## Ефективність

Найкращі результати досягаються на рівнинному рельєфі з рівномірно розподіленими точками. Створює характерний "бульбашковий" ефект навколо вхідних точок. Добре працює для метеорологічних даних, забруднення ґрунтів та гідрології. Метод ефективно обробляє дані з нерівномірним розподілом точок і не вимагає калібрування алгоритму для різних типів місцевості.

## Обмеження методу

Не враховує структурні особливості та анізотропію даних. Створює артефакти типу "бичаче око" навколо точок спостереження. Не може точно передати локальні екстремуми, крім точок вимірювання. При моделюванні висот часто згладжує хребти і долини, що знижує геоморфологічну точність моделі.

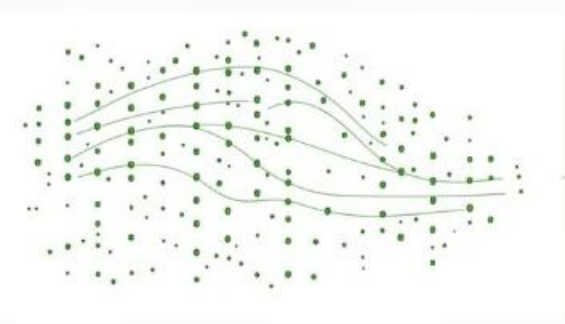
## Програмна реалізація

Алгоритм реалізований у більшості ГІС-платформ (ArcGIS, QGIS, GRASS). Обчислювальна складність  $O(n \cdot m)$ , де  $n$  – кількість вхідних точок,  $m$  – кількість точок інтерполяції. Існують оптимізовані варіанти з використанням квадродерев та просторових індексів для прискорення обчислень. Паралельна обробка даних забезпечує високу продуктивність для великих наборів даних.



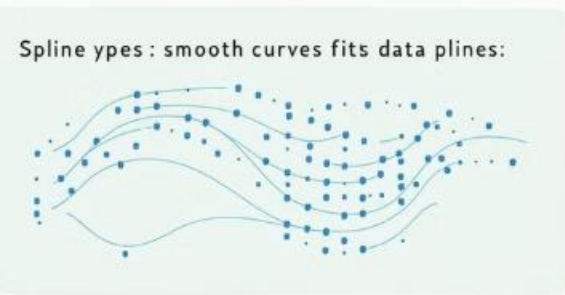
# SPLINE INTERPOLATION

Smooth curves in your curves curves inatues, with mat types fit iting fittings data pints.

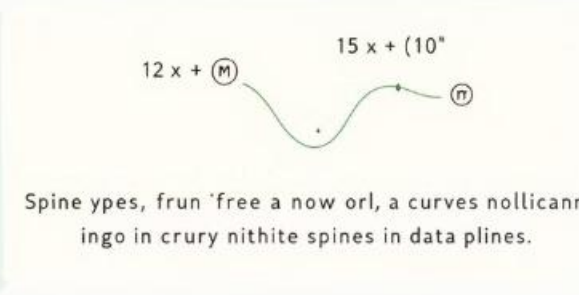


Spline splines, cr use is the in data ptincs mead drea smooth curve my law on data piryleve raconyng litlles un lizes.

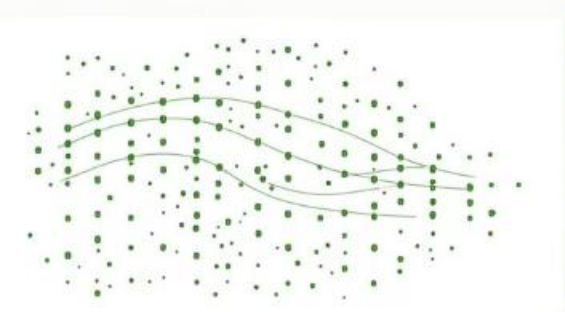
Frhny good spins, out fitting fatam our puirding all and lneading to celefnce fand the perfects.



Spline ypes : smooth curves fits data plines:



Spine ypes, frun 'free a now orl, a curves nollicanr ingo in crury nithite spines in data plines.



Spline spline curves fith ares data points.

1. *	10	157
2.	20	15%
3. 6		20%
3		17%
4. 4	30	176

# Сплайн-інтерполяція

1

## Види сплайнів

Кубічні сплайни забезпечують неперервність другої похідної та є найпоширенішими завдяки балансу між складністю та гладкістю. Квадратичні сплайни оптимальні для плавних переходів і вимагають менше обчислювальних ресурсів. В-сплайни дозволяють локальний контроль кривої та особливо цінні в комп'ютерній графіці. Натуральні сплайни мають нульову другу похідну на кінцях, що забезпечує реалістичні крайові умови. Тензорні сплайни використовуються для багатовимірної інтерполяції складних поверхонь.

2

## Особливості

Створює математично гладку поверхню, що точно проходить через вхідні точки. Мінімізує осциляції та зберігає диференціованість на всієї області інтерполяції. На відміну від поліноміальної інтерполяції, сплайни не страждають від феномену Рунге на краях інтервалу. Вони забезпечують оптимальний баланс між точністю апроксимації та гладкістю результуючої функції. Локальні зміни впливають лише на обмежену область, що робить метод стійким до викидів у даних та дозволяє ефективно працювати з великими наборами точок.

3

## Застосування

Деталізоване моделювання складних рельєфів з різкими перепадами висот. Ідеально для візуалізації гідрологічних моделей та аналізу схилових процесів. Забезпечує високу точність при роботі з невеликою кількістю опорних точок. Широко використовується в системах автоматизованого проектування (САПР) для моделювання поверхонь складної форми. У геоінформаційних системах сплайни застосовуються для створення цифрових моделей рельєфу та інтерполяції метеорологічних даних. Метод є основою для алгоритмів комп'ютерної графіки, анімації та тривимірного моделювання в медичній візуалізації, де точне відтворення анатомічних структур критично важливе.



# Крігінг

Найточніший метод просторової інтерполяції для побудови цифрових моделей рельєфу та картографування просторових даних у геоінформаційних системах.



## Теорія

Геостатистичний метод інтерполяції, що базується на регіоналізованій змінній та просторовій автокореляції. Розроблений південноафриканським інженером Д. Крігом для оцінки розподілу корисних копалин. Використовує статистичні моделі, що включають автокореляцію, тобто статистичні взаємозв'язки між виміряними точками. Алгоритм враховує конфігурацію даних та відстані між точками вимірювання.



## Застосування

Широко використовується в гідрології, метеорології, ґрунтознавстві та геології. Незамінний для створення високоточних цифрових моделей рельєфу, аналізу забруднення ґрунтів та повітря, прогнозування розподілу опадів та моделювання родовищ корисних копалин. У ГІС-аналізі крігінг є ключовим для прийняття обґрунтованих просторових рішень.

Незважаючи на високу обчислювальну складність, крігінг залишається золотим стандартом інтерполяції просторових даних завдяки можливості отримання не лише прогнозованих значень, але й оцінки їхньої достовірності.



## Варіограма

Математична функція для аналізу просторової кореляції між точками даних. Визначає вагові коефіцієнти та дозволяє моделювати невизначеність даних на різних відстанях. Варіограми можуть бути сферичними, експоненціальними, гауссовими або лінійними залежно від характеристик просторових даних. Правильний вибір моделі варіограми є ключовим для точності інтерполяції.



## Переваги

Найвища точність серед методів інтерполяції. Враховує анізотропію даних, забезпечує статистичну оцінку похибки та оптимально працює з нерівномірно розподіленими точками вимірювань. Дозволяє врахувати напрямок змін у даних, що критично для моделювання природних явищ, які мають виражену напрямленість (річкові долини, гірські хребти).





## Порівняння методів інтерполяції для ЦМР

Метод	Точність	Швидкість	Рельєф
Лінійна	Низька (похибка >5м)	Висока (секунди)	Прості пологі
IDW	Середня (1-3м)	Висока (хвилини)	Помірні, нерегулярні
Сплайн	Висока (0.5-1м)	Середня (години)	Складні, плавні
Крігінг	Найвища (<0.5м)	Низька (години-дні)	Будь-які, складні поверхні

Вибір методу інтерполяції значно впливає на якість цифрової моделі рельєфу (ЦМР). Крігінг забезпечує найвищу точність завдяки врахуванню просторової кореляції, але потребує найбільше обчислювальних ресурсів.

Лінійна інтерполяція - найпростіший метод, що з'єднує точки прямими лініями. Ідеально підходить для попереднього аналізу та території з мінімальними варіаціями висот, але створює неприродні гострі кути на поверхні рельєфу.

IDW (зворотне зважене відстанню) враховує вплив сусідніх точок обернено пропорційно їх відстані. Цей метод ефективний для помірно складного рельєфу та не потребує складного налаштування параметрів, але може створювати характерні "бульбашки" навколо точок вимірювань.

Сплайни забезпечують математично плавні криві, що проходять через точки вимірювань або поблизу них. Цей метод відмінно відтворює природні геоморфологічні структури без різких переходів, особливо ефективний для відображення долин, схилів та водотоків.

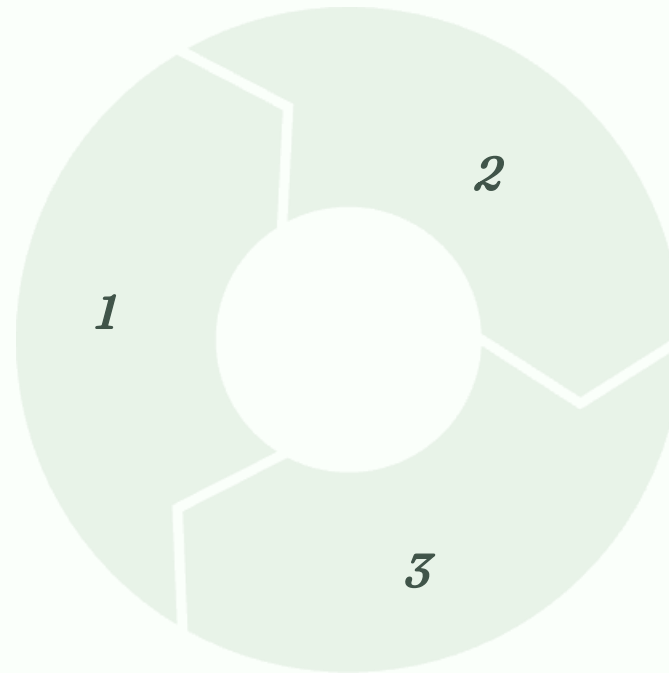
Крігінг вирізняється своєю здатністю моделювати анізотропію (напряму залежність) даних та адаптуватися до різних типів просторової варіативності через налаштування варіограми. Незамінний для точних гідрологічних, інженерних та екологічних досліджень, особливо в умовах нерівномірно розподілених точок вимірювань.

# Оцінка точності ЦМР: методи

Для ефективної оцінки якості цифрових моделей рельєфу використовують три основні підходи, кожен з яких має свої переваги при аналізі різних типів інтерполяції:

## *RMSE*

Середньоквадратична похибка, розраховується як корінь із середнього квадрату різниць між прогнозованими та виміряними висотами. Наичастіше використовується для оцінки крігінга та сплаинів. Типові допустимі значення: <0.5м для високоточних моделей, <2м для стандартних топографічних застосувань. Враховує великі відхилення через квадратичну природу, що робить її чутливою до викидів у даних.



## *MAE*

Середня абсолютна похибка вимірює середню величину помилок у наборі прогнозів без урахування їх напрямку. Ефективна для аналізу лінійної та IDW інтерполяції. На відміну від RMSE, надає однакову вагу всім помилкам. Рекомендовані пороги: <0.3м для прецизійних моделей, <1.5м для загальногеографічних застосувань. Особливо корисна при порівнянні різних алгоритмів інтерполяції на ділянках з однорідним рельєфом.

## **Візуальний аналіз**

Якісна оцінка через візуальне порівняння змодельованого та реального рельєфу, особливо ефективна для виявлення артефактів інтерполяції на складних ділянках місцевості. Включає побудову профілів рельєфу, аналіз 3D-зображень та карт різниці висот. Дозволяє ідентифікувати систематичні помилки, які можуть бути пропущені при статистичних обчисленнях. Найкращі результати досягаються при комбінуванні з кількісними методами та залученні експертів з геоморфології.

При комплексній оцінці точності ЦМР рекомендується застосовувати всі три методи та порівнювати їх результати для отримання повної картини якості моделювання поверхні. Для гірських районів особливо важливо доповнювати статистичні показники візуальним аналізом структурних елементів рельєфу.



# Фактори, що впливають на точність ЦМР

Точність цифрових моделей рельєфу залежить від багатьох параметрів, які необхідно враховувати при плануванні, зборі та обробці даних для геопросторових досліджень.

## Якість даних

Точність вихідних вимірювань, наявність систематичних помилок у даних LIDAR, GPS або фотограмметрії. Похибки калібрування сенсорів можуть призвести до зміщення всієї моделі на 0.5-2м.

Атмосферні умови під час збору даних (туман, опади, висока вологість) знижують якість сигналу і можуть вносити додаткові похибки до 15% від загальної точності.

## Щільність точок

Кількість вимірювань на одиницю площі. Оптимальна щільність: 8-10 точок/м<sup>2</sup> для деталізованих моделей, 1-2 точки/м<sup>2</sup> для загальних.

Нерівномірність розподілу точок створює зони з різною точністю. Для міських територій рекомендується щільність 15-20 точок/м<sup>2</sup>, для сільськогосподарських угідь достатньо 3-5 точок/м<sup>2</sup>, а для лісових масивів необхідно 12-15 точок/м<sup>2</sup> через складність проникнення сигналу.

## Складність рельєфу

Круті схили, обриви та яри збільшують похибки до 30-40%. Складні топографічні форми потребують додаткових структурних ліній.

Горбиста місцевість з перепадами висот до 50м потребує щільності збору даних у 1.5-2 рази вищої, ніж рівнинні території. Карстові утворення та печери створюють додаткові складнощі, збільшуючи похибки моделювання на 25-35%.

## Метод інтерполяції

TIN дає кращі результати для гірських районів. Кригінг оптимальний для рівнин. Сплаин-методи точніші для моделювання гідрологічних об'єктів.

Метод зворотно-зважених відстаней (IDW) швидкий, але створює ефект "бичачого ока" навколо точок вимірювань. Радіальні базисні функції забезпечують гладкість поверхні, але можуть штучно згладжувати важливі локальні особливості рельєфу.

Для досягнення високоточних ЦМР (з похибкою менше 10 см) необхідно оптимізувати всі вищезазначені фактори та використовувати комплексні методи валідації результатів на всіх етапах створення моделі.

# Методи підвищення точності ЦМР

## Структурні лінії

Включення лінії хребтів, вододілів, тальвегів та берегових ліній як обов'язкових елементів моделі. Врахування розривів схилів зменшує похибки до 15-20%. Додавання структурних ліній особливо важливе в зонах різкої зміни рельєфу та гідрографічної мережі. Оптимальна щільність - 1 лінія на кожні 250-500 м території.

## Адаптивні алгоритми

Застосування алгоритмів з динамічним налаштуванням параметрів інтерполяції відповідно до морфології рельєфу. Зменшує згладжування та зберігає локальні особливості території. Використання нейромережових підходів дозволяє автоматично визначати оптимальні параметри інтерполяції для різних типів поверхні з урахуванням геоморфологічних характеристик.

## Геоморфологічні обмеження

Впровадження фізично обґрунтованих обмежень на основі законів геоморфології. Визначення максимально допустимих ухилів та швидкостей зміни висот для конкретних типів рельєфу. Корекція похибок з урахуванням гідрологічної зв'язності та напрямків поверхневого стоку забезпечує підвищення точності на 15-25%.

## Комбінування даних

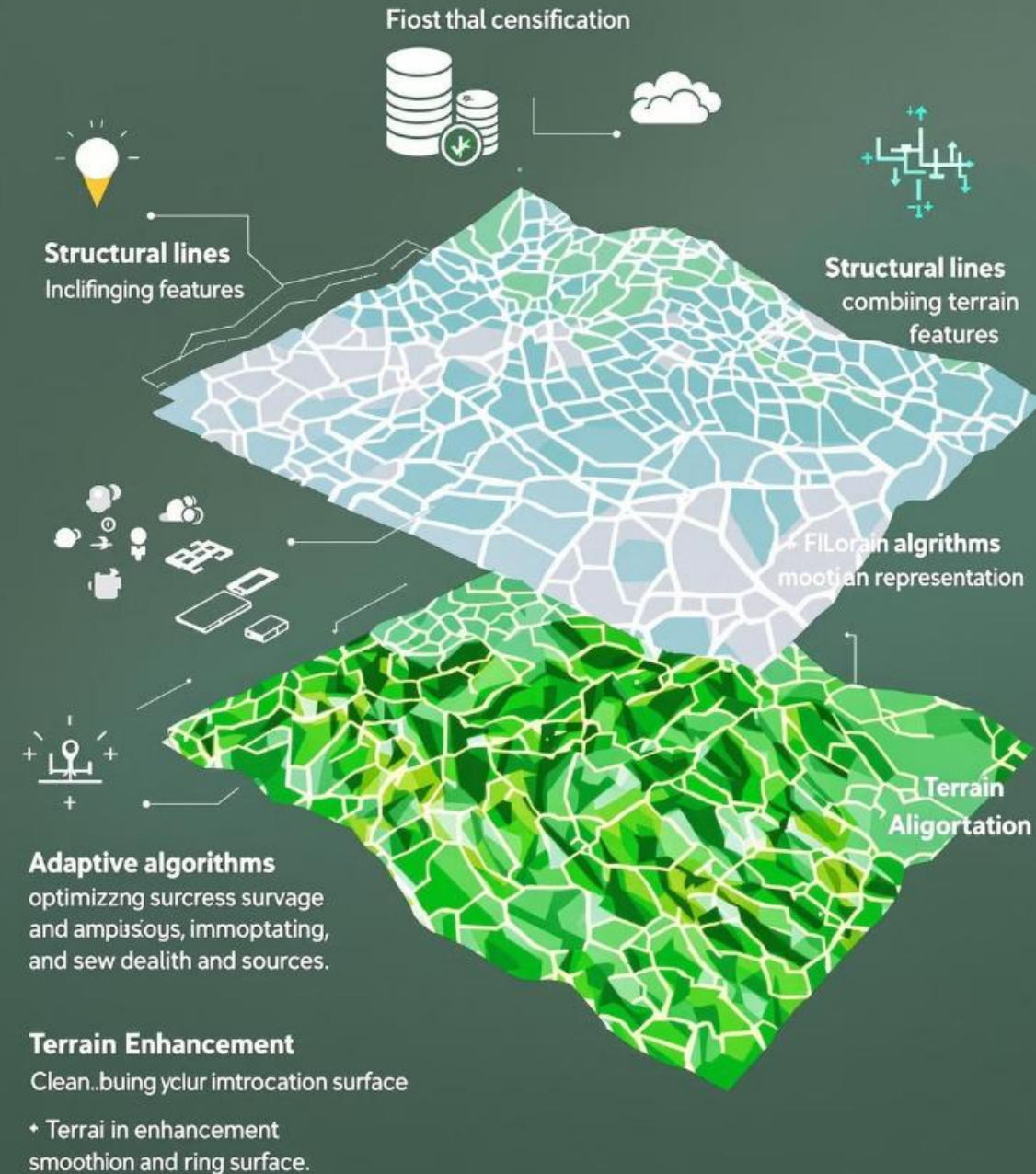
Інтеграція даних радарних, лідарних та фотограмметричних знімків. Використання вагових коефіцієнтів залежно від якості джерела підвищує точність на 25-30%. Метод байєсівського усереднення дозволяє зменшити випадкові похибки на 35-40%. Оптимальні результати досягаються комбінуванням мінімум трьох незалежних джерел даних.

## Фільтрація шумів

Застосування спектральних та просторових фільтрів для усунення випадкових похибок вимірювань. Статистичні методи виявлення та видалення викидів підвищують надійність моделі на 18-22%. Локальні медіанні фільтри ефективно зберігають перепади висот при одночасному згладжуванні високочастотного шуму.

# Your Bearah Elevation

Improving your elevation DEM with land use and vegetation data, your great results are achieved by using the best of both worlds: the accuracy of the elevation data and the precision of the land use and vegetation data. This is achieved by using the best of both worlds: the accuracy of the elevation data and the precision of the land use and vegetation data.





# Валідація ЦМР

1

## Опорні точки

Порівняння з GNSS-вимірюваннями ( $RMSE \leq 0.5$  м). Використання геодезичних реперів та польових вимірювань. Розрахунок статистичних показників відхилень. Мінімальна кількість точок - 30 на 100 км<sup>2</sup>, оптимально розташованих у різних елементах рельєфу. Диференціація точності за типами поверхні (відкриті території:  $RMSE \leq 0.3$  м; лісові масиви:  $RMSE \leq 0.8$  м).

2

## Крос-валідація

Метод k-fold з розділенням даних на 5-10 підвбірок. Обчислення коефіцієнта детермінації ( $R^2$ ). Перевірка на незалежних даних з інших джерел (лідарна зйомка, топографічні карти). Оцінка систематичної та випадкової похибок моделі. Побудова кривих розподілу помилок та діаграм розсіювання для візуалізації відхилень. Застосування методики "leave-one-out" для детальної перевірки критичних ділянок.

3

## Аналіз похідних

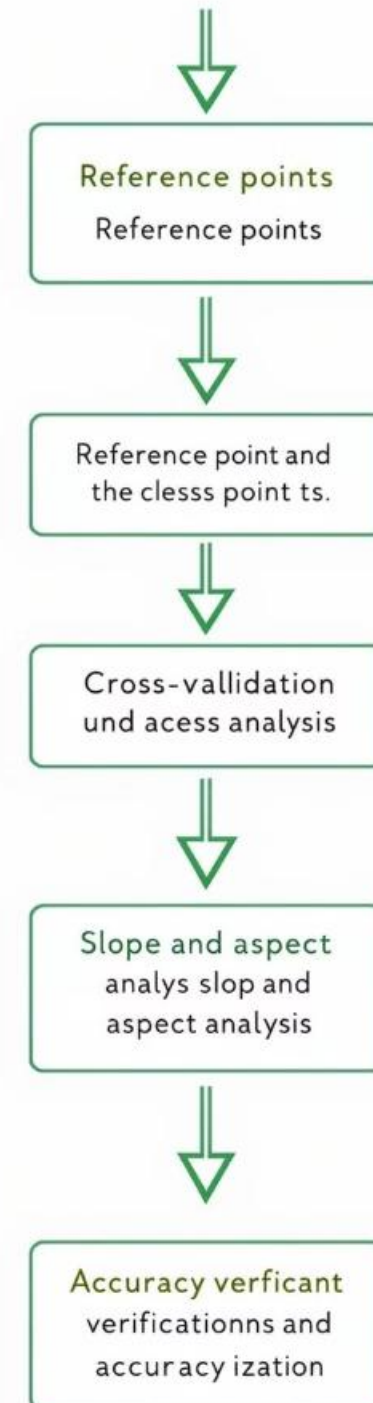
Оцінка точності ухилів ( $\pm 2^\circ$ ) та експозиції ( $\pm 5^\circ$ ). Перевірка гідрологічної коректності через побудову водотоків. Аналіз геоморфометричних параметрів (кривизна, шорсткість поверхні). Порівняння локальних мінімумів та максимумів з реальними даними. Топологічна узгодженість просторових об'єктів та перевірка на артефакти ("ями" та "піки"). Визначення кількісних показників відповідності реальним елементам ландшафту.

4

## Польова верифікація

Проведення контрольних вимірювань на місцевості для перевірки ключових елементів рельєфу. Використання БПЛА для створення високодетальних моделей території для порівняння. Перевірка локальних особливостей рельєфу (карстові форми, яри, відвали). Документування відхилень та створення карти достовірності даних ЦМР з виділенням проблемних зон, що потребують удосконалення.

# the DEM Validation Process



# Програмне забезпечення для створення ЦМР



## *ArcGIS, QGIS*

Комплексні ГІС-пакети з інструментами інтерполяції, аналізу рельєфу та 3D-візуалізації. Підтримують різні алгоритми побудови ЦМР та обробки лідарних даних. ArcGIS пропонує професійні інструменти Spatial Analyst та 3D Analyst для складного аналізу поверхонь, тоді як QGIS надає безкоштовну альтернативу з відкритим кодом та широкими можливостями розширень. Обидві системи забезпечують підтримку різних форматів даних, геостатистичний аналіз та можливість для створення високоякісних карт рельєфу.



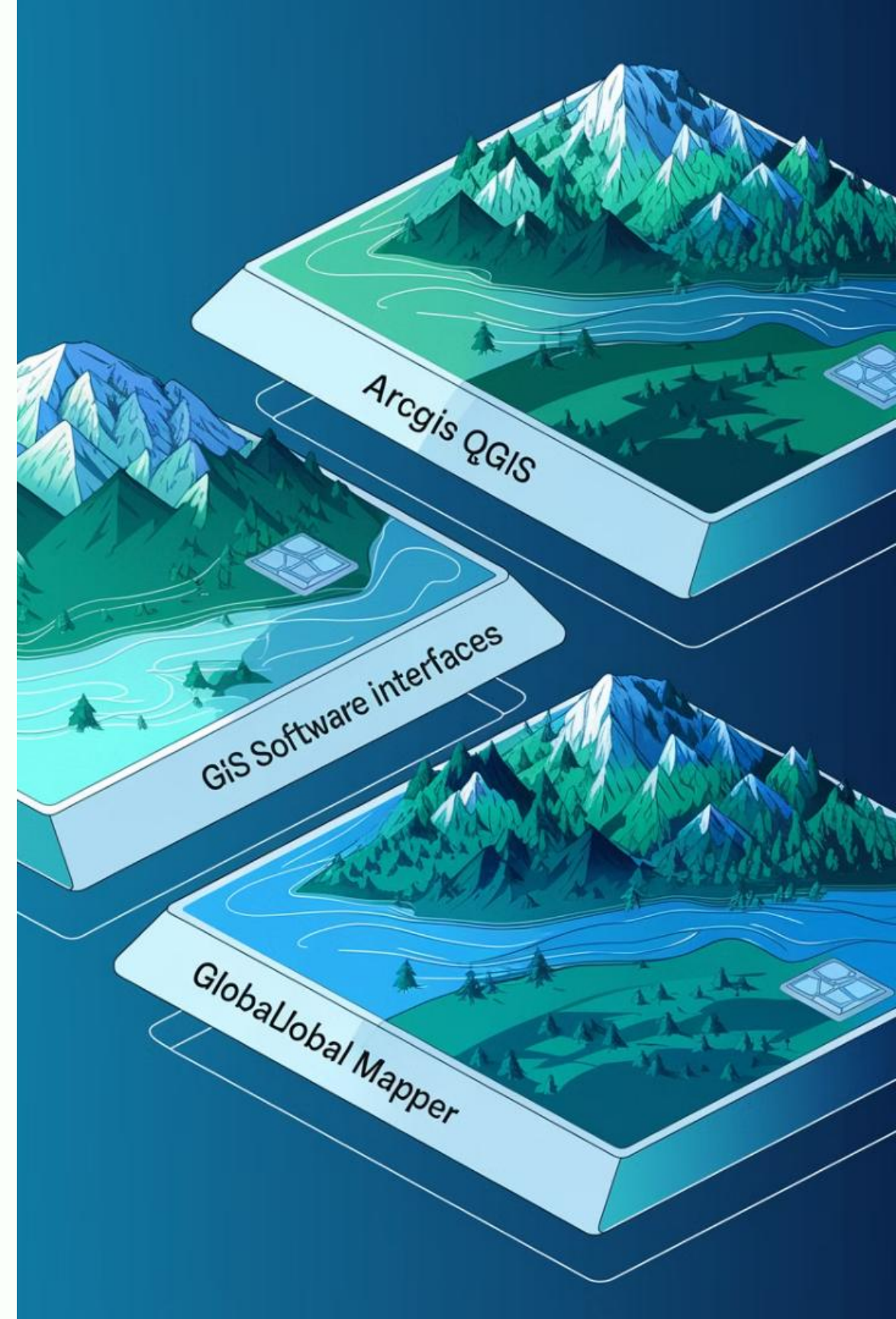
## *Surfer, Global Mapper*

Спеціалізовані програми для моделювання поверхонь. Пропонують розширені можливості інтерполяції (крігінг, IDW, сплайни) та високоякісну візуалізацію рельєфу. Surfer вирізняється потужними алгоритмами моделювання поверхонь з 12+ методами інтерполяції та детальним контролем над параметрами. Global Mapper відома своєю універсальністю з понад 300 підтримуваними форматами даних, інструментами аналізу водозборів та можливістю обробки великих наборів LiDAR-даних. Ці програми також пропонують функції перетворення між різними системами координат та експорт 3D-моделей для інженерних застосувань.



## *GDAL, NumPy*

Потужні бібліотеки для програмування ЦМР власними алгоритмами. Забезпечують автоматизацію та обробку великих масивів даних з можливістю створення спеціалізованих робочих процесів. GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) надає уніфікований API для роботи з різними растровими та векторними форматами, включаючи операції перепроєктування, трансформації та фільтрації ЦМР. NumPy у поєднанні з бібліотеками SciPy та scikit-learn дозволяє розробляти власні алгоритми інтерполяції, застосовувати методи машинного навчання для класифікації рельєфу та оптимізувати процеси обробки через векторизовані операції. Ці інструменти особливо цінні для дослідницьких проектів та задач, що потребують нестандартних підходів до аналізу рельєфу.





# Формати зберігання ЦМР

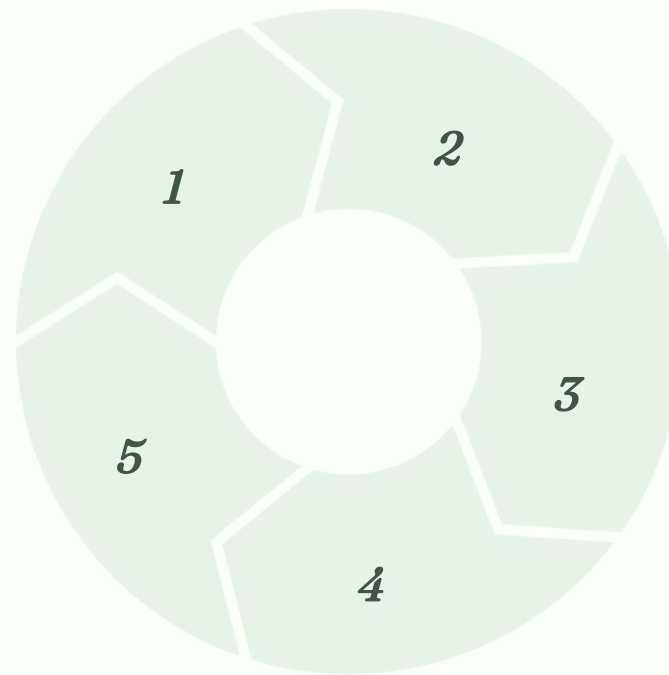
Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) можуть зберігатися у різних форматах даних, кожен з яких має свої переваги для певних застосувань та робочих процесів.

## *GeoTIFF*

Растровий формат з геопросторовою прив'язкою. Підтримує різні типи стиснення (LZW, JPEG) та метадані. Широко використовується для зберігання ЦМР високої роздільної здатності. Забезпечує сумісність між різними програмними пакетами ГІС.

## *ASCII Grid*

Простий текстовий формат для растрових ЦМР. Легко читається людиною та машиною. Містить заголовок з параметрами (розмір комірки, кількість рядків/стовпців) та матрицю значень висот. Часто використовується для обміну даними між різними системами.



## *Shapefile*

Векторний формат для зберігання ізоліній та структурних ліній рельєфу. Містить геометрію та атрибутивні дані висот. Підтримується більшістю ГІС-програм. Складається з кількох файлів (.shp, .shx, .dbf), що разом зберігають просторові та атрибутивні дані.

## *COG (Cloud Optimized GeoTIFF)*

Оптимізований для хмарного доступу растровий формат. Забезпечує швидкий доступ до даних через HTTP-запити. Ідеальний для веб-картографії та великих наборів даних ЦМР. Дозволяє завантажувати лише необхідну частину даних без завантаження всього файлу.

## *LAS/LAZ*

Спеціалізовані формати для зберігання даних лідарного сканування. LAS – стандартний відкритий формат, LAZ – його стиснена версія. Зберігають хмари точок з інформацією про висоту, інтенсивність відбиття та класифікацію, що використовуються для створення високоточних ЦМР.

Вибір формату залежить від джерела даних, потрібної точності, вимог до зберігання та специфіки програмного забезпечення. Сучасні ГІС підтримують конвертацію між більшістю з цих форматів для забезпечення гнучкості робочих процесів.

# Аналіз рельєфу на основі ЦМР



Ці методи аналізу рельєфу дозволяють отримати різні характеристики місцевості, необхідні для планування, проєктування та екологічних досліджень. Горизонталі дають уявлення про загальну конфігурацію рельєфу та допомагають візуально оцінити перепади висот, тоді як аналіз ухилів надає критично важливу інформацію для інженерних розрахунків та оцінки потенційних природних небезпек.

Аналіз експозиції схилів допомагає визначити ділянки з різним мікрокліматом, що важливо для сільського господарства, містобудування та рекреаційного планування. Карти видимості застосовуються не лише у військовій сфері та телекомунікаціях, але й для оцінки візуального впливу нових будівель, ландшафтного дизайну та туристичного планування.

Комплексне використання всіх цих методів дозволяє створювати детальні 3D-моделі ландшафту та приймаати обґрунтовані рішення щодо просторового планування та управління природними ресурсами.



# Гідрологічний аналіз за допомогою ЦМР

1

## Напрямки стоку

Визначення векторів переміщення води на основі градієнтів поверхні та ідентифікація потенційних шляхів затоплення. Алгоритми D8, Dinf та MFD дозволяють моделювати рух води з різною точністю залежно від типу рельєфу та масштабу дослідження.

2

## Водозбірні басейни

Делінеація та класифікація басейнів за розміром, морфометричними параметрами та часом концентрації стоку. Це дозволяє оцінити вплив рельєфу на гідрологічні процеси та прогнозувати поведінку водних систем при різних сценаріях опадів.

3

## Річкові мережі

Автоматичне виділення постійних та тимчасових водотоків з визначенням порядку за Страхлером та Шривом. Точність ідентифікації водотоків залежить від роздільної здатності ЦМР та порогових значень акумуляції стоку, що використовуються в алгоритмах.

4

## Гідравлічні характеристики

Розрахунок параметрів водних потоків: швидкість течії, глибина, поперечний переріз русел та об'єми стоку. Ці дані є критичними для проектування гідротехнічних споруд та систем водовідведення.

Інтеграція ЦМР з даними про опади дозволяє моделювати паводки та оцінювати ризики затоплення території на різних часових масштабах. Використання високоточних ЦМР (LiDAR) суттєво підвищує надійність гідрологічних прогнозів, особливо в урбанізованих та складних ландшафтах. Мультитемпоральний аналіз гідрологічних процесів дає можливість відслідковувати зміни водного режиму під впливом кліматичних змін та антропогенної діяльності, що критично важливо для сталого управління водними ресурсами.

# Застосування ЦМР в геоморфології

## Класифікація рельєфу

Автоматизоване виділення морфологічних елементів (схили, долини, вододіли, тераси). Розрахунок кількісних параметрів рельєфу для геоморфологічного картографування.

Використання алгоритмів машинного навчання для ідентифікації геоморфологічних структур та їх характеристик. Розробка автоматизованих методик розпізнавання генетичних типів рельєфу на основі текстурного аналізу ЦМР.

## Ерозійні процеси

Кількісна оцінка інтенсивності ерозії за допомогою морфометричних показників. Моделювання та прогнозування ярів, зсувів та інших ерозійних форм рельєфу.

Визначення потенціального ризику ерозії ґрунту з використанням універсального рівняння втрати ґрунту (USLE) та його модифікації. Інтеграція даних про опади, характеристики ґрунту та рослинний покрив для комплексного аналізу ерозійної небезпеки території.

## Льодовикова геоморфологія

Моніторинг динаміки льодовиків, аналіз морен та трогових долин. Реконструкція палеорельєфу льодовикових районів та оцінка впливу дегляціації.

Використання різночасових ЦМР для виявлення об'ємних змін льодовикових мас та темпів їх скорочення в умовах глобального потепління. Дослідження процесів формування та еволюції перигляціальних ландшафтів на основі морфометричного аналізу.

Сучасні методи геоморфометрії дозволяють проводити детальний кількісний аналіз рельєфу на різних просторових масштабах - від мікрорельєфу до континентального рівня. Інтеграція ЦМР з іншими просторовими даними (дистанційне зондування, геологічні та ґрунтові карти) створює потужний інструментарій для комплексних геоморфологічних досліджень.

Застосування ГІС-технології та високоточних ЦМР, отриманих за допомогою лідарної зйомки, відкриває нові перспективи у вивченні динаміки рельєфу та прогнозуванні небезпечних геоморфологічних процесів. Це дозволяє не лише удосконалювати фундаментальні теоретичні концепції геоморфології, але й вирішувати прикладні завдання у сфері раціонального природокористування, територіального планування та управління природними ризиками.



# ЦМР в інженерній геології

## Стійкість схилів

Кількісна оцінка кутів нахилу, визначення потенційно небезпечних ділянок та розрахунок коефіцієнтів стійкості для запобігання обвалів. Використання високоточних ЦМР дозволяє враховувати мікрорельєф та локальні неоднорідності, що значно підвищує надійність прогнозів щодо стабільності схилів.

## Планування

Оптимізація розміщення інфраструктурних об'єктів з урахуванням морфології рельєфу, уникнення геологічно небезпечних зон та мінімізація земляних робіт при будівництві. Застосування ЦМР допомагає розробляти більш економічні та екологічно сприятливі проекти за рахунок точної адаптації будівельних рішень до природного рельєфу.

## Сейсмічне мікрорайонування

Використання ЦМР для уточнення локальних сейсмічних умов та оцінки підсилення сейсмічних хвиль внаслідок особливостей рельєфу. Інтеграція даних про геологічну будову та топографію допомагає виявляти території з підвищеним ризиком резонансних явищ при землетрусах.

## Зсуви

Моделювання динаміки зсувних процесів на основі даних про рельєф, геологічну структуру та гідрологічні умови для точного прогнозування часу та масштабу зсувів. Інтеграція даних ЦМР з часовими рядами опадів дозволяє створювати динамічні моделі для раннього попередження про потенційні зсуви в режимі реального часу.

## Гідрогеологічні дослідження

Визначення напрямків підземних водотоків та прогнозування зон підтоплення за допомогою аналізу ЦМР. Моделювання взаємодії поверхневих та підземних вод створює основу для оцінки ризиків забруднення водоносних горизонтів та планування дренажних систем.







# Використання ЦМР в екології

## 1 **Моделювання середовищ існування**

Створення 3D-моделей екосистем для прогнозування придатності середовищ для рідкісних видів. Визначення критичних зон біорізноманіття та аналіз фрагментації лісових масивів. Включення даних про мікрорельєф дозволяє виявити мікрокліматичні ніші, що важливі для збереження ендемічних рослин. Комплексний аналіз висотних закономірностей разом з експозицією схилів забезпечує розуміння просторової організації екосистем.

## 2 **Аналіз розповсюдження видів**

Відстеження міграційних коридорів тварин на основі даних рельєфу. Прогнозування поширення інвазивних видів у залежності від висоти та крутизни схилів. Моделювання потенційних шляхів експансії адвентивних видів рослин вздовж річкових долин та гірських систем. Аналіз особливостей розподілу біологічних ресурсів з урахуванням орографічних бар'єрів та впливу цифрової моделі рельєфу на формування локальних популяцій.

## 3 **Оцінка впливу змін клімату**

Моделювання затоплення прибережних зон при підвищенні рівня моря. Аналіз зміни ареалів існування видів при різних кліматичних сценаріях з урахуванням топографії. Прогнозування зміщення висотних поясів рослинності в гірських системах внаслідок глобального потепління. Виявлення потенційних рефугіумів для збереження біорізноманіття під час кліматичних трансформацій на основі аналізу особливостей мезо- та мікрорельєфу.

## 4 **Планування природоохоронних заходів**

Визначення оптимальних меж заповідних територій з урахуванням рельєфу як основного фактора формування ландшафтного різноманіття. Проектування екологічних коридорів для забезпечення генетичного обміну між ізольованими популяціями. Оптимізація розташування моніторингових станцій з урахуванням репрезентативності різних висотних поясів та елементів мезорельєфу. Використання ЦМР для планування відновлення порушених екосистем та ренатуралізації ландшафтів.



# ЦМР в сільському господарстві

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) революціонізують сільськогосподарську галузь, надаючи фермерам точні дані для прийняття обґрунтованих рішень щодо управління земельними ресурсами. Інтеграція ЦМР дозволяє оптимізувати виробничі процеси та підвищити сталість сільського господарства.

Завдання	Опис
Точне землеробство	Аналіз мікрорельєфу для визначення оптимальних зон внесення добрив та засобів захисту рослин, що зменшує витрати на 15-20%. Дозволяє створювати карти продуктивності полів з урахуванням особливостей ландшафту.
Ерозія ґрунтів	Моделювання водних потоків на схилах для виявлення ділянок з високим ризиком змиву родючого шару та планування протиерозійних заходів. Допомогає прогнозувати втрати ґрунту при різних погодних умовах.
Меліорація	Розрахунок оптимальних маршрутів дренажних систем та зрошувальних каналів з урахуванням природних особливостей ландшафту та водозбірних басейнів. Підвищує ефективність використання водних ресурсів на 25-30%.
Терасування земель	Планування сільськогосподарських терас на схилах для максимального використання земельних ресурсів і запобігання ерозії. ЦМР дозволяє розрахувати оптимальні параметри терас з мінімальними витратами на будівництво.
Управління мікрокліматом	Аналіз розподілу сонячного світла, напрямків вітру та накопичення вологи залежно від особливостей рельєфу. Допомогає у виборі оптимальних культур для кожної ділянки та плануванні вітрозахисних лісосмуг.
Прогнозування врожайності	Інтеграція даних ЦМР з інформацією про ґрунти, погоду та агротехнічні заходи для побудови предиктивних моделей урожайності. Підвищує точність прогнозів на 30% порівняно з традиційними методами.







# Сучасні тенденції в цифровому моделюванні рельєфу

## 1 Дрони

Використання БПЛА для збору високоточних даних про рельєф з роздільною здатністю до 2-5 см, що дозволяє створювати деталізовані ЦМР для важкодоступних територій та оперативного моніторингу змін. Мультиспектральні сенсори на дронах забезпечують одночасний збір даних про рельєф та рослинність, підвищуючи інформативність моделей. Інтеграція RTK/PPK технологій дозволила досягти сантиметрової точності позиціонування без використання наземних контрольних точок, що значно скорочує час польових робіт.

## 3 Глобальні моделі

Розробка глобальних моделей рельєфу з роздільною здатністю до 10 м (TanDEM-X, ALOS World 3D), що забезпечують єдину основу для міжнародних досліджень та транскордонного управління природними ресурсами. Проєкт Copernicus DEM покриває всю поверхню Землі моделлю з роздільною здатністю 30 м та вертикальною точністю до 2-4 м, з покращеною версією до 10 м для критично важливих регіонів. Комбінування радарних та оптичних даних дозволяє подолати обмеження окремих методів зйомки та створювати надійніші комбіновані продукти.

## 2 Машинне навчання

Інтеграція алгоритмів машинного навчання для автоматичної класифікації елементів рельєфу, виявлення змін та прогнозування ерозійних процесів на основі аналізу часових рядів ЦМР. Нейронні мережі типу U-Net демонструють високу ефективність для сегментації елементів гідрографічної мережі та антропогенних об'єктів. Методи глибокого навчання дозволяють відфільтровувати шуми та помилкові дані з хмар точок лідарної зйомки, підвищуючи якість кінцевих моделей рельєфу та прискорюючи обробку на 40-50%.

## 4 Хмарні технології

Розвиток хмарних платформ для обробки та зберігання ЦМР (Google Earth Engine, AWS, Microsoft Planetary Computer) забезпечує миттєвий доступ до петабайтів геопросторових даних та обчислювальних ресурсів. Технології потокової обробки даних дозволяють працювати з ЦМР надвисокої роздільної здатності без завантаження на локальні комп'ютери. Сервіси на основі API надають можливість інтегрувати аналіз рельєфу в корпоративні системи та мобільні додатки для оперативного прийняття рішень у польових умовах.



# Виклики та перспективи розвитку ЦМР

Цифрове моделювання рельєфу (ЦМР) стикається з низкою технічних та методологічних викликів, але водночас відкриває інноваційні можливості для розвитку геоінформаційних технологій.

## Обробка даних

Зростання обсягів просторових даних до петабайтного рівня вимагає нових алгоритмів обробки та хмарних обчислювальних рішень. Розробка розподілених систем для паралельної обробки даних стає критичною.

Використання технологій Big Data та інструментів Apache Hadoop, Spark дозволяє ефективно обробляти величезні масиви геопросторової інформації. Реалізація GPU-прискорених обчислень сприяє скороченню часу обробки ЦМР високої роздільної здатності в десятки разів.

## Майбутнє технологій ЦМР

Очікується, що в найближчі 5-10 років відбудеться якісний стрибок у розвитку технологій цифрового моделювання рельєфу. Впровадження квантових обчислень може революціонізувати обробку надвеликих масивів геопросторових даних. Розвиток сенсорних мереж Internet of Things створить підґрунтя для динамічного оновлення ЦМР у режимі реального часу.

Інтеграція штучного інтелекту дозволить автоматизувати інтерпретацію геоморфологічних особливостей та прогнозувати зміни рельєфу під впливом природних та антропогенних факторів. Глобальні ініціативи зі створення цифрових двійників планети сприятимуть розробці уніфікованих підходів до моделювання рельєфу на різних масштабних рівнях.

## Точність

Досягнення сантиметрової точності моделі потребує комбінування різних джерел даних (лідар, фотограмметрія, радарна інтерферометрія). Калібрування та валідація моделі залишаються складними процесами у гірських та лісистих місцевостях.

Розробка методів автоматичної корекції атмосферних та інших спотворень підвищує достовірність даних. Впровадження багатоспектральних датчиків дозволяє підвищити якість класифікації наземних об'єктів та точність визначення висот у складних ландшафтах. Використання GNSS RTK технологій забезпечує виняткову геодезичну прив'язку опорних точок.

## Інтеграція

Злиття ЦМР з семантичними 3D-моделями міст створює нові можливості для розумного планування та моніторингу. Впровадження стандартів CityGML та GeoBIM сприяє ефективній інтеграції даних рельєфу з міськими інформаційними моделями.

Зв'язування ЦМР з гідрологічними моделями значно покращує прогнозування повеней та управління водними ресурсами. Інтеграція з системами навігації та безпілотними транспортними засобами дозволяє створювати високоточні карти для автономного руху. Поєднання з VR/AR технологіями відкриває нові можливості для візуалізації та симуляції природних процесів.

# Висновки

## Ключові аспекти цифрового моделювання рельєфу

Ефективне створення ЦМР вимагає правильного збору даних, їхньої фільтрації та обробки великих обсягів інформації для досягнення якісних результатів моделювання. Важливими елементами є також вибір оптимального програмного забезпечення для обробки та візуалізації даних, а також підготовка фахівців, здатних працювати з такими моделями. Точність збору первинних даних напряму впливає на кінцеву якість створеної моделі та її практичну цінність.

## Важливість вибору методів

Оптимальний вибір методів збору та обробки даних суттєво впливає на точність кінцевої моделі та можливість її подальшої інтеграції з 3D-моделями та іншими геоінформаційними системами. Сучасні технології, такі як лідарне сканування, фотограмметрія та радарна інтерферометрія, дозволяють отримувати дані з різною точністю та в різних умовах. Комбінування різних методів дозволяє компенсувати недоліки кожного з них та досягти оптимального співвідношення між вартістю та якістю результатів.

## Широкий спектр застосування

ЦМР активно використовується в багатьох галузях: від містобудування, екологічного моніторингу та прогнозування стихійних лих до геологічних досліджень та сільського господарства, що підтверджує її універсальність та практичну цінність. У гідрології моделі рельєфу допомагають аналізувати потоки води та прогнозувати повені. У військовій справі ЦМР є основою для тактичного планування та симуляції. Для телекомунікаційних компаній цифрові моделі рельєфу необхідні для оптимального розміщення передавачів та аналізу поширення сигналу.

Безперервний розвиток технологій збору та обробки просторових даних відкриває нові можливості для цифрового моделювання рельєфу. Поява нових сенсорів, підвищення обчислювальних потужностей та розробка нових алгоритмів обробки даних дозволяють створювати все більш точні та детальні моделі. Інтеграція штучного інтелекту в процеси обробки даних та автоматичної класифікації об'єктів стає новим трендом, що суттєво прискорює створення та оновлення цифрових моделей рельєфу.

