

## РОЗДІЛ IV. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 504.055(477-25)(043.2)

*Віталій Зацерковний, Наталія Руть, Людмила Плічко, Сергій Кривоберець*

### АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЩОДО СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ

*Виталий Зацерковный, Наталья Руть, Людмила Пличко, Сергей Кривоберец*

### АНАЛИЗ ПОДХОДОВ ПО СОЗДАНИЮ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

*Vitalii Zatserkovnyi, Natalia Rul, Liudmyla Plichko, Serhiy Kryvoberets*

### ANALYSIS OF THE APPROACHES FOR CREATING DIGITAL ELEVATION MODELS

*Рельєф є одним з найважливіших елементів змісту будь-якої карти, яка визначає особливості ландшафту. Розглянуто наявні моделі та методи побудови цифрових моделей рельєфу (ЦМР) з метою їх порівняльного аналізу на основі комплексування відкритих, загальнодоступних джерел інформації. Наведено підходи побудови цифрових моделей рельєфу та розглянуто інформаційне забезпечення для їх створення.*

*Продемонстровано можливість використання різних джерел даних, призначених для створення ЦМР: для моделювання задач землеустрою, моделювання гідрологічної мережі, аналізу зони покриття радіочастотних вишок, моделювання задач будівництва, моделювання зон затоплення внаслідок повеней та паводків. За рахунок удосконалення ЦМР можливе вироблення нових підходів для їх створення або інтеграція наявних.*

**Ключові слова:** *цифрова модель рельєфу (ЦМР), інтерполяція, інтерполяційні методи, TIN-модель, кригінг, SRTM, топо в растр.*

*Рис.: 12. Бібл.: 11.*

*Рельєф является одним из важнейших элементов содержания любой карты, которая определяет особенности ландшафта. Рассмотрены имеющиеся модели и методы построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) с целью их сравнительного анализа на основе комплексирования открытых, общедоступных источников информации. Приведены подходы построения цифровых моделей рельефа и рассмотрено информационное обеспечение для их создания.*

*Продемонстрирована возможность использования различных источников данных, предназначенных для создания ЦМР: для моделирования задач землеустройства, моделирование гидрологической сети, анализа зоны покрытия радиочастотных вышек, моделирования задач строительства, моделирование зон затопления в результате наводнений и паводков. За счет совершенствования ЦМР возможна разработка новых подходов для их создания или интеграция имеющихся.*

**Ключевые слова:** *цифровая модель рельефа (ЦМР), интерполяция, интерполяционные методы, TIN-модель, криггинг, SRTM, топо в растр.*

*Рис.: 12. Библ.: 11.*

*Relief is one of the most important elements of the content of any map that defines the features of the landscape. Considered existing models and methods of construction digital elevation models (DEM) for the purpose of comparative analysis based on the integration of open, public sources of information. Provided approaches of digital elevation models and considered information support for their creation.*

*Demonstrated possibility of using different data sources intended for creating DEM: for modeling problems of land management, modeling hydrological network, analysis of coverage of radio frequency towers, construction modeling tasks, modeling flood zones due to floods and floods. Due to the perfection of DEM may develop new approaches for their creation or integration available.*

**Key words:** *digital terrain model, digital elevation model, DEM; interpolation, interpolation methods; TIN-model, kriging, SRTM, a raster topo.*

*Fig.: 12. Bibl.: 11.*

**Постановка проблеми.** Рельєф є одним з найважливіших елементів змісту будь-якої карти, що визначає всі особливості ландшафту. Характер рельєфу враховується у процесі освоєння та заселення території, розвитку транспорту, промисловості, сільського господарства і будівництва, вибору місця для населених пунктів, бойових дій (визначення можливостей відкритого пересування, маскування, умов прохідності, невидимості). Рельєф впливає на розподіл тепла й вологи, міграцію хімічних елементів, формування поверхневого та підземного стоку, річкової мережі, рослинного покриву, ґрунтів, ландшафтів тощо.

З того часу, як з'явилися перші карти, перед картографами постала нетривіальна проблема відображення тривимірного рельєфу на двовимірній карті.

Вся історія дослідження рельєфу – це історія створення його картографічних моделей, які постійно наближаються до дійсності.

Одним із перших способів відображення рельєфу стали перспективні знаки, що показують гори і пагорби. Перспективний (картинний) спосіб зображення рельєфу широко застосовувався до середини XVIII століття, але він не дозволяв визначати по карті крутизну схилів і виражати всі характерні деталі рельєфу, особливо на рівнинній місцевості.

Однак починаючи з XVIII ст. почалася активна розробка нових, все більш складних способів відображення рельєфу [1].

Перші експерименти зі створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР), що відносяться до першого етапу розвитку геоінформатики [1], одразу ж засвідчили, що вони є унікальним інструментом для аналізу різноманітних антропогенних об'єктів і природних процесів і явищ.

**Виділення раніше не вирішених частин загальної проблеми.** Оскільки рельєф земної поверхні зазнає інтенсивних змін під впливом як природних, так і антропогенних чинників, то актуальним є завдання швидкого корегування і відображення цих змін у ЦМР з найменшими фінансовими і часовими витратами. Для цього потрібно провести огляд наявних моделей створення ЦМР з метою їх порівняння і визначення оптимальності їх використання.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Одним з напрямків розвитку сучасних геоінформаційних систем (ГІС) є автоматизація процесів отримання ЦМР. Дослідженням рельєфу місцевості і розробкою алгоритмів створення ЦМР займалися Х. В. Бурштинська, І. В. Городинський, О. Л. Дорожинський, А. В. Костін, О. М. Ласточкін, Р. М. Рудий, А. І. Хромченко, І. Г. Черваньов, В. В. Хромих, О. В. Хромих, Poul Frederiksen, Ole Jacobi, Kurt Kubik та інші. Ними розроблені методику побудови ЦМР та різні способи створення 3D-моделей.

Визнаючи наукову і практичну цінність розробок названих авторів, треба відзначити, що проблема оцінювання можливостей цих алгоритмів щодо точності і швидкодії ще далека від свого завершення і потребує глибокого системного опрацювання.

**Метою статті** є завдання проведення порівняльного аналізу існуючих методик побудови максимально коректних ЦМР на основі комплексування відкритих, загальнодоступних джерел інформації, до яких передусім відносяться супутникові дані – AsterGDEM (Global Digital Elevation Model) та SRTM (Shuttle radar topographic mission); топографічні карти масштабу 1:200000, 1:100000.

**Виклад основного матеріалу.** Сьогодні тривимірне подання рельєфу засобами сучасних геоінформаційних технологій (ГІТ) є одним із напрямків у геоінформатиці при ситуаційному моделюванні (тренажери, командні навчання тощо), аналізі проектів і рішень (дорожнє будівництво та архітектура), розвитку транспортної й інженерної інфраструктури, у промисловості і сільському господарстві, моніторингу надзвичайних ситуацій, у моделюванні родовищ корисних копалин, як засіб найбільш ефективної просторової організації різночасових даних, для виконання аналітичних розрахунків і як інструмент підтримки прийняття управлінських рішень, який дуже швидко розвивається.

Оперування тривимірними просторовими даними є необхідним у геології, архітектурі, містобудівництві тощо. Велике значення ЦМР відіграють у задачах розрахунку режимів роботи інженерних мереж, аераційної обстановки, визначення забруднення територій, прогнозування затоплення територій тощо. Ці задачі потребують як визначення висот точок місцевості, так і побудови на поверхні досліджуваної ділянки території спеціальних розрахункових елементів для реалізації алгоритмів обчислювальної гідроаеромеханіки.

Сукупність задач, що можуть розв'язуватись за допомогою ЦМР, представлено на рис. 1.

Це зумовлено тим, що для більшості задач інформаційні потреби про місцевість тільки за рахунок використання двовимірних карт в аналоговому і цифровому видах вже не можуть вважатись вичерпними.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Під цифровою моделлю геооб'єкта розуміють певну форму подання вихідних даних і спосіб їх структурного опису, яка дозволяє обчислити (відновити) об'єкт за допомогою інтерполяції, апроксимації або екстраполяції [2]. Визначальним у назві «цифрова модель» є те, що вона сформована у цифровому коді, який сприймає комп'ютер.

Тривимірна модель населеного пункту є системою багатьох елементів: моделі земної поверхні (цифрової моделі рельєфу), моделі наземних об'єктів (об'єктів нерухомості), моделі надр (геологічні моделі) тощо.

ЦМР повинна дозволяти розв'язувати метричні і позиційні задачі та визначати спеціальні геометричні параметри (нормаль, дотичні, лінії рівня та найбільшого нахилу, найвищу та найнижчу точки тощо). До метричних належать задачі визначення величин відстаней, кутів, площ і об'ємів.

Сьогодні існує певна термінологічна неоднозначність в англійських назвах продукції, що містить висотне подання земної поверхні, зокрема за цифровими моделями поверхні (ЦМП) та цифровими моделями рельєфу (ЦМР). Англійськими аналогами понять ЦМП та ЦМР прийнято вважати DSM (Digital Surface Model) та DTM (Digital Terrain Model).

DSM – цифрова модель місцевості (ЦММ), що відображає природний рельєф місцевості з рослинністю та різноманітними штучними перешкодами (будинками, деревами тощо), також відредаговані на моделі водні об'єкти, присвоєні їм однакові значення висоти тощо (рис. 2).

DTM – точного визначення для цієї моделі не існує, але часто трактується як аналогія ЦМР.

DEM – цифрова модель рельєфу (ЦМР), що відображає природний рельєф місцевості.

Перша модель включає в себе висоти всіх точок на земній поверхні, а друга – висоти рельєфу або, як доповнення, висоти окремих об'єктів місцевості. Одночасно і перша, і друга моделі є DEM (Digital Elevation Model).

Крім того, на думку деяких авторів, наприклад [3], термін «цифрова модель» взагалі є калькою англійського digital model і не є дуже вдалим, оскільки не відображує реалії моделювання. Цікаво, що в болгарській науковій літературі використовується термін «чисельна модель рельєфу», замість нашого «цифрова модель рельєфу» і англійського digital elevation model. Такий переклад вдало передає зміст, хоча й викликає певні асоціації з деякими термінами прикладної математики (чисельний аналіз, чисельні методи тощо). Однак, незважаючи на це, термін «цифрові моделі» широко вживається в науковій літературі, тому недоцільно від нього відмовлятися.

Оскільки рівень вимог щодо точності цифрового опису рельєфу, як системоутворюючого фактора місцевості, багато в чому визначається типом наукової або інженерно-технологічної задачі, методами її розв'язання, вартістю, наявним програмним забезпеченням, то перед споживачем стоїть завдання вибору джерел даних, які багато в чому визначають розрізнення моделі й алгоритмами створення ЦМР.

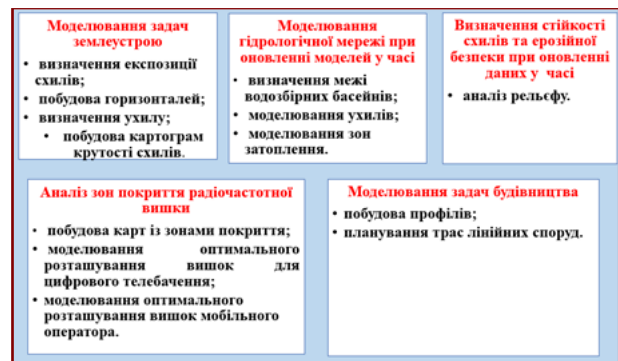


Рис. 1. Сукупність задач, що можуть розв'язуватись за допомогою ЦМР

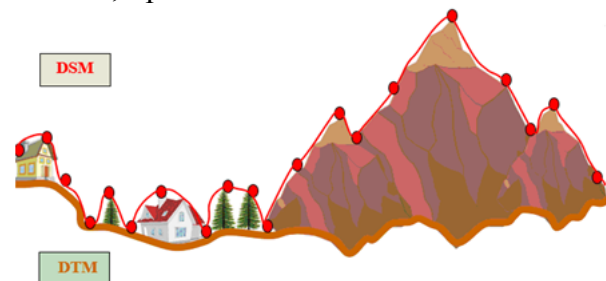


Рис. 2. Основні види висотної інформації

Джерелами даних для створення ЦМР можуть слугувати дані ДЗЗ, аерофотознімки, фотограмметричні виміри, дані систем супутникового позиціонування, наземні геодезичні зйомки, дані промірних робіт і ехолотування, лазерного сканування місцевості, картографічні дані тощо.

Висока швидкість проведення вимірів і ефективність зйомки забудованих площ, таких як міські території надують повітряному лазерному скануванню низку переваг порівняно з іншими видами побудови ЦМР. Отриманий у результаті 3D масив точок високої щільності і точності фактично є цифровою моделлю рельєфу, яка може бути основою для ортофотопланів, цифрових топографічних планів масштабів 1:500 і дрібніше, тривимірних моделей рельєфу й об'єктів місцевості.



Рис. 3. Основні види висотної інформації [4]

Створити цифрову карту з висотними відмітками (ЦМР) можна і на основі фотограмметричних способів [5].

Застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і фотограмметрії, де існує велика кількість напрацювань і перевірених методик дозволяють створювати досить точні і достовірні цифрові моделі місцевості, точність результатів яких є переконливою. Проте використання матеріалів ДЗЗ передбачає велику кількість контрольних вимірів, застосування спеціалізованого сертифікованого програмного забезпечення.

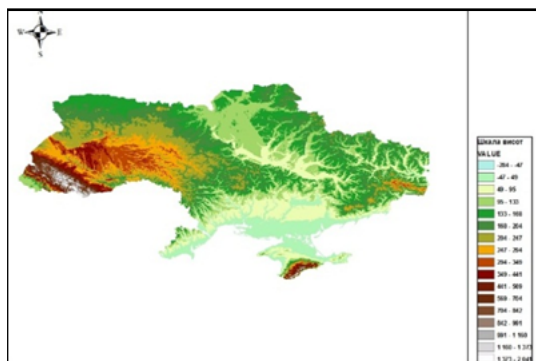


Рис. 4. Карта рельєфу України, отримана за допомогою SRTM

їни дані SRTM та ASTER GDEM забезпечують точність по висоті 3-8 метрів. Продемонстровано можливість їх використання для моделювання задач землеустрою (визначення експозиції схилів, побудови горизонталей, побудови ухилів), моделювання гідрологічної мережі (моделювання водотоків та визначення меж водозбірних басейнів), аналізу зони покриття радіочастотних вишок (побудова карт із зонами покриття, вибору оптимального розташування вишок мобільних операторів та вишок цифрового телебачення), моделювання задач будівництва (планування попередніх трас лінійних споруд – дорожньої мережі, трубопроводів тощо), моделювання зон затоплення внаслідок

Оцінка вартості ЦМР залежно від джерела даних і розрізнення моделі представлена на рис. 3 [4].

Цифрову модель рельєфу для великих територій можна отримати різними способами, зокрема за допомогою радіометричного знімання місцевості, яке було зроблене на всю територію поверхні Землі (крім полюсів) радаром, запущеним у космос за допомогою космічного корабля Shuttle американським космічним агентством NASA – CGIAR.

На сьогодні популярним є створення ЦМР на основі ДЗЗ та SRTM. SRTM (Shuttle radar topographic mission) – міжнародна місія з отримання даних цифрової моделі рельєфу території Землі (рис. 4).

У результаті цієї міжнародної програми були отримані топографічні дані для бази даних Землі у майже глобальному масштабі від 56° південної широти до 60° північної широти [6].

Можливість використання SRTM та ASTER GDEM для території України досліджена у праці [7], де зазначено, що для території Укра-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

повеней та паводків. Список розглянутих задач, де можуть використовуватися глобальні ЦМР не є вичерпним і він потребує подальшого розширення й аналізу.

Тією чи іншою мірою глобальні ЦМР можуть забезпечити розв'язання поставлених задач, навіть без залучення додаткових даних.

Однак українські реалії, попри зростаючу роль у світі ДЗЗ та фотограмметричних способів створення ЦМР, передбачають як основне джерело для моделювання рельєфу великомасштабні топографічні карти.

ЦМР створюються на основі нерегулярних триангуляційних мереж TIN та регулярних сіток GRID.

TIN-модель поверхні у вигляді мережі суміжних трикутних граней, що не перетинаються і які покривають поверхню та визначені по вузлах і ребрах. При побудові TIN-моделі дискретно розташовані точки з'єднуються лініями, які утворюють трикутники. Оскільки поверхня кожного трикутника задається висотами трьох його вершин, застосування трикутників забезпечує кожній ділянці мозаїчної поверхні точне прилягання до суміжних ділянок. Це забезпечує безперервність поверхні при нерегулярному розташуванні точок.

На нашу думку, TIN-моделі є досить зручним способом для відображення рельєфу та збереження вхідних даних про нього. Також цю модель можна використати, щоб відображати на карті дані про опади, температуру, щільність населення.

Традиційний підхід до 3D-моделювання рельєфу місцевості полягає в реалізації технологічної схеми TIN (Triangulated Irregular Network)-моделі ↔ ЦМР, яка включає етапи (рис. 5).



Рис. 5. Технологічна схема традиційного створення ЦМР на основі TIN-моделі

В основі методів моделювання (побудови) безперервних поверхонь на основі дискретних (точкових) масивів просторово-координованих даних лежать процедури просторової інтерполяції. При цьому використовуються як стохастичні, так і детерміновані дані.

Інтерполяція – відновлення функції на множині точок за відомими її значеннями в кінцевій множині точок, що належать цьому інтервалу [2].

Створення поверхні в ГІС – заповнення простору між наявними дискретними точками, що містять дані вимірів певного безперервного явища.

На сьогодні існує багато методів, що дозволяють розв'язувати цю задачу. Серед них – інтерполяція на основі триангуляції Делоне, метод зворотно зважених відстаней, метод природної околиці, методи сплайн-апроксимації, трендів, радіальних базисних функцій, кригінг, метод «Топо в растр» та багато інших.

Для цього випадку створення ЦМР для території України виконувалася така послідовність операцій: оцифровані горизонталі конвертувалися у точках перегину в шар точок (рис. 6).

Шар нерегулярно розташованих по місцевості точок став основою для створення TIN-моделі на основі триангуляції Делоне, яка є шаром, подає безперервне поле значень висот для придання зображенню об'ємного виду.

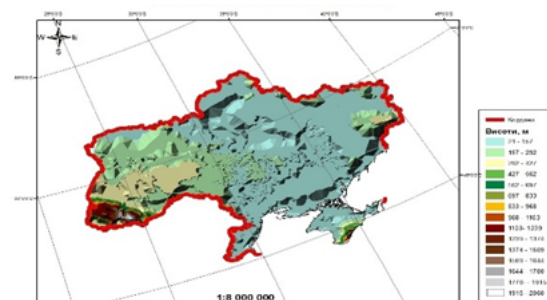


Рис. 6. ЦМР України, що створена на основі TIN



ЦМР отримують векторизацією (оцифруванням) горизонталей у робочому вікні геоінформаційної програми і присвоєнням їм значень висот у табличній формі. Кожна горизонталь стає головним компонентом цифрової моделі і формує зовнішній вигляд рельєфу. Після векторизації горизонталей, записаних у вигляді шейп-файла (\*.shp), ГІС будує об'ємну модель рельєфу у вигляді TIN – Triangular Irregular Network (трикутної нерегулярної мережі). Нерегулярною вона є тому, що розміри трикутників різні залежно від щільності горизонталей.

Інтерполяція на основі триангуляції Делоне за умови достатньо рівномірного розташування точок у точності моделює дії людини у процесі побудови рельєфу в горизонталях і обчисленні висот точок, у результаті чого досягається найбільш звична картина рельєфу. При цьому спочатку будується система трикутників, що не перекриваються, вершинами яких є вихідні точки. Поверхня подається як багатогранник з трикутними гранями, де проекція кожної грані на площину, що картографується, і є відповідний трикутник триангуляції, а висоти дорівнюють значенням  $z = 0$  в  $i$ -х точках. З безлічі точок на площині можуть бути утворені різні мережі триангуляції, і відповідно до цього будуть утворюватись різні поверхні. Виявляється, що оптимальною для моделювання є триангуляція Делоне, в якій для запобігання виникнення зломів ізоліній на ребрах полігонів для кожної вихідної точки будується локальний поліном першого або другого ступеня, і за допомогою триангуляції ці локальні поліноми «склеюються» в одну гладку поверхню.

Найважливішою особливістю сучасного зображення рельєфу є необхідність відображення рельєфу за допомогою поверхні. ЦМР задається масивом просторових координат точок, які описують складну поверхню рельєфу місцевості. За способом розташування точок розрізняють регулярну, нерегулярну, структуровану моделі (рис. 7).

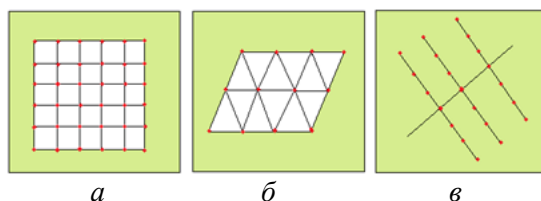


Рис. 7. Регулярні цифрові моделі місцевості: а – на квадратній сітці; б – на трикутниках; в – на поперечниках до магістрального ходу

Проте використання цієї моделі для гірських областей і карт відповідних масштабів може призвести до виникнення ефекту лінійної апроксимації і згладжування форм рельєфу, що знаходиться між ізолініями, що найчастіше є неприйнятним.

ЦМР, що будується за поперечниками до магістрального ходу, передбачає створення системи поперечних профілів, на яких у місцях перегинів профільних ліній і розташовуються опорні точки моделі.

Подання ЦМР на регулярній сітці GRID передбачає інтерполяцію значень висот і відоме як модель DEM (Digital Elevation Model). Регулярна ЦМР може бути розрахована на будь-яку область і мати будь-який розмір. У таких цифрових моделях точки з відомими просторовими координатами розташовуються у вершинах сітки квадратів, прямокутників, рівносторонніх або рівнобедрених трикутників (рис. 6 а, б).

Існують також цифрові моделі у вигляді системи поперечних профілів, проведених через встановлені відстані до заданої лінії (наприклад, повітряної лінії траси) та із заданим стандартним кроком розміщення точок у кожному поперечнику (рис. 6, в) [2].

GRID-подання поверхні вважається функціональною поверхнею, оскільки для будь-якого місця  $x, y$  зберігається тільки одне значення аплікати  $Z$ . Функціональні поверхні є 2,5-вимірними (2,5 D) поверхнями [2].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Метод «Зворотно-зважені відстані» (ЗЗВ) передбачає побудову регулярної сітки висот (рис. 8).

Метод ЗЗВ визначає значення комірки з використанням лінійно-зваженого поєднання безлічі точок вибірки. Вага, яка призначається, є функцією відстані вхідної точки від місця вихідної комірки: чим більша відстань, тим менша вага значень. Задані значення до невідомих точок розраховуються із середньозважених значень, доступних у відомих точках.

Метод ЗЗВ є частковим, але найбільш поширеним випадком методу середнього вагового, або ковзного середнього вагового, який об'єднує ідеї близькості, що використовується, у свою чергу, методом полігонів Тиссена–Вороного з повільними змінами трендової поверхні.

Метод «Природної околиці», як і метод ЗЗВ, ґрунтується на ваговому усередненні значень. Автором цього методу є Робін Сібсон [8]. Метод також відомий як інтерполяція Сібсона, або «захоплюючої області». Його основні властивості – будучи локальним, він використовує тільки підмножину зразків, які оточують точку запиту, і те, що інтерпольовані висоти гарантовано будуть у межах діапазону використовуваних зразків. Метод інтерполяції «Природної околиці» використовує середньозважене значення локальних даних, що ґрунтується на концепції координат природного околиці, обумовленої полігонами Тиссена. Цей метод має багато позитивних властивостей: може ефективно працювати з великими наборами вхідних точок; використовуватись як для інтерполяції, так і для екстраполяції, і загалом добре працювати з кластерами розподілених точок.

На рис. 9 представлена ЦМР, що створена методом «Природної околиці».

Метод «кригінгу» – це вид узагальненої лінійної регресії, який використовує статистичні параметри для знаходження оптимальної оцінки у значенні мінімального середнього відхилення при побудові поверхонь, кубів і карт.

В основі кригінгу (крайгінгу) лежить припущення, що відстані між точками вимірів відображують просторову кореляцію, яку можна використати для формування поверхні. Цей метод отримав свою назву від прізвища Південно-Африканського геолога Д. Дж. Кріге, роботи якого лягли в основу розробки цієї технології інтерполяції. Іноді в російсько- і українськомовній літературі цей метод називають «кригінг» або «крайгінг». При побудові моделі використовується так званий «ординарний кригінг» з лінійною варіограмою, що є точним інтерполятором [2].

Цей метод інтерполяції заснований на використанні методів математичної статистики. У його реалізації застосовується ідея змінної, яка змінюється від місця до місця з деякою видимою безперервністю, тому не може моделюватися тільки одним математичним рівнянням. Поверхня розглядається у вигляді трьох незалежних величин. Перша – тренд, що характеризує зміну поверхні в певному напрямку. Далі передбачається, що є невеликі відхилення від загальної тенденції, на зразок маленьких піків і западин, які є випадковими, але все ж пов'язаними один з одним просторово.

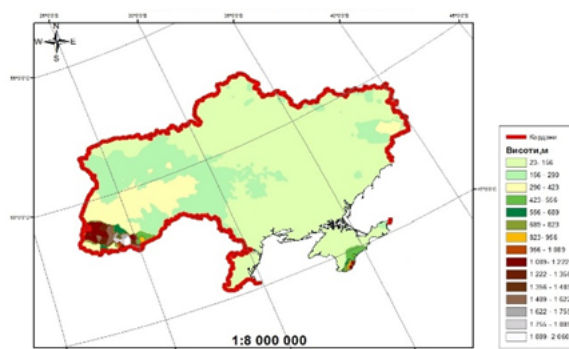


Рис. 8 Побудова ЦМР України за методом ЗЗВ

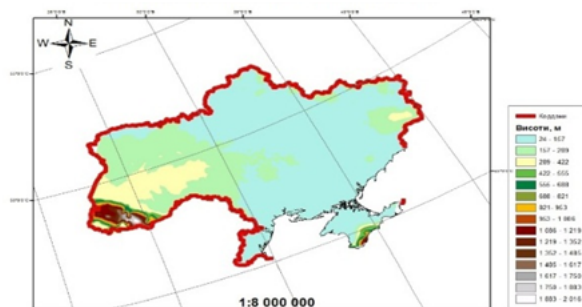


Рис. 9. Побудова ЦМР України за методом «Природної околиці»

Відомі також простий кригінг, індикаторний кригінг, кокригінг, ординарний кригінг з анізотропією, нелінійний кригінг і деякі інші різновиди локально-стохастичної інтерполяції, хоча і менш поширені порівняно з описаними вище, проте такі, що мають свої сфери використання. Ординарний кригінг – найбільш загальний і широко використовуваний метод, що використовується за замовчуванням. Передбачається, що середнє значення константи невідомо.

При універсальному кригінгу передбачається, що є домінуючий тренд у даних – наприклад, переважний вітер – і його можна моделювати детермінованою функцією, поліномом. Цей поліном отримується з вихідних вимірних точок, і автокореляція моделюється з довільних похибок.

На рис. 10 представлено ЦМР, що створена за цим методом.

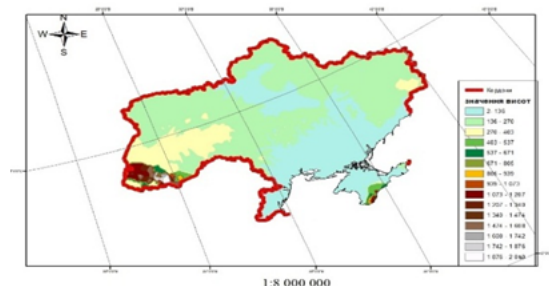


Рис. 10. Побудова ЦМР України за методом кригінгу

Перед цим було оцифровано карти на територію України, та задано проекцію Гаусса-Крюгера і географічну систему координат Красовського 1940 (цей вибір є не випадковим, тому що карта, за якою було оцифровано горизонталі, 1984 року, і саме тоді використовувалась такі параметри).

Метод «Топо в растр» накладає обмеження, які забезпечують гідрологічно коректну ЦМР, яка містить пов'язані структури дренажу і правильно подає хребти й потоки за вхідними даними горизонталей.

Він використовує ітеративний метод інтерполяції кінцевих різниць, який оптимізує обчислювальні ефективності локальної інтерполяції без втрати безперервності поверхні глобальної інтерполяції. Він був спеціально розроблений для інтелектуальної роботи з вхідними горизонталями [9].

За цим методом кращі результати будуть отримані тоді, коли всі вхідні дані зберігаються в тій самій плоскій (або планарній) системі координат і мають ті ж самі одиниці вимірювання висоти. Можуть бути використані широта-довгота; але в цьому випадку результати можуть бути неточними, особливо на високих широтах.



Рис. 11. ЦМР України, створена методом «Топо в растр»

ЦМР України створена методом «Топо в растр» показана на рис. 11.

Метод інтерполяції на основі локальних поліномів передбачає використання як детермінованих методів інтерполяції поверхонь, що засновані на точках виміру або математичних формулах, так і геостатистичних методів інтерполяції, що засновані як на статистичних моделях, які враховують автокореляції, так і на математичних функціях [10; 11].

Характеристики інтерпольованої поверхні можна контролювати за допомогою обмеження вхідних точок, використовуваних для розрахунку значень вихідної комірки. Це може бути зроблено за рахунок обмеження кількості точок замірів або області, з якої беруться точки вимірів. Зазначення максимальної кількості точок вибірки використовуватиме точки, найближчі до місця вихідної комірки, поки не буде досягнута максимальна кількість комірок. При генеруванні поверхні також можна враховувати бар'єри, що відображають лінії розлому, скелі, річки та інші просторові об'єкти, які створюють лінійний розрив у поверхні. Багато інструментів інтерполяції включають бар'єри, які визначають і керують поведінкою поверхні у плані плавності й безперервності. ЦМР створена методом інтерполяції за методом локальних поліномів є реалістичною та наближено зображує рельєф України (рис. 12).



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Як впливає з характеристики методів просторової інтерполяції, кожний з них має свої переваги і недоліки, які доцільно врахувати під час вибору того чи іншого методу при побудові ЦМР. Крім того, вибір методу інтерполяції наявних даних також залежить від кількості вихідних точок даних і рівномірності їх розподілу в області інтерполяції.

**Висновки.** Створення ЦМР значно спростить і підвищить їх рівень для використання в господарських цілях, а також для побудов карт та тривимірного моделювання в задачах моніторингу. За допомогою ЦМР можна наочно досліджувати і вирішувати завдання щодо одержання інформації про рельєф, гідрологічну мережу, морфометричні показники, методи аналізу ерозійних процесів, під час виконання кадастрових робіт тощо. Дані, отримані за допомогою SRTM, дещо спотворюють площу і це не дає повного уявлення про територію країни. Тому виходом з цієї ситуації є отримання ЦМР за рахунок оцифрування горизонталей на топографічній карті та використання інструментів у програмному забезпеченні ArcGIS.

Отже, оцінка правильності способу побудови ЦМР, вибір оптимального з них для такого характеру рельєфу і вирішуваних завдань здебільшого повинні ґрунтуватися на результатах зіставлення реального рельєфу і побудованих ЦМ.

ЦМР на основі TIN-моделі може забезпечити дуже компактне, досить ефективне і для візуального подання, і для виконання багатьох аналітичних процедур (обчислення відхилень, ухилів та ін.) зберігання інформації про рельєф цієї території.

За рахунок удосконалювання ЦМР можливе вироблення нових підходів для їх створення або поєднання декількох. На цьому етапі в умовах відсутності нормативних документів щодо порівняння і створення ЦМР неможливо однозначно сказати, яка краща, оскільки кожна з них має як позитивні, так і негативні сторони. При побудові універсальних ЦМР необхідні не тільки висотні позначки рельєфу, а й дна водойм та урізу води.

### Список використаних джерел

1. Геоінформаційні системи в науках про Землю / В. І. Зацерковний, І. В. Тішаєв, І. В. Віршило, В. К. Демидов. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. – 510 с.
2. Бурачек В. Г. Геоінформаційний аналіз просторових даних / В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, В. І. Зацерковний. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2011. – 440 с.
3. Сербенюк С. Н. Методы моделирования геополей по данным в нерегулярно расположенных точках / С. Н. Сербенюк, С. М. Кошель, О. Р. Мусин // Геодезия и картография. – 1990. – № 1. – С. 31–35.
4. Полетаев А. М. Методы сертификационных испытаний цифровых моделей рельефа, сформированных на основе данных дистанционного зондирования Земли / А. М. Полетаев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Вып. 6, т. 1. – С. 220–226.
5. Часковський О. Г. Створення цифрових моделей рельєфу на основі даних аерофотознімання [Електронний ресурс] / О. Г. Часковський. – Режим доступа : [http://www.nbuu.gov.ua/old\\_jrn/natural/1glpdp/2009\\_35/35-3.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/1glpdp/2009_35/35-3.pdf).
6. Что такое SRTM? Данные SRTM, и где скачать SRTM [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh>.
7. Процик М. Т. Методи фотограмметричного та картографічного супроводу багаторівневої системи моніторингу ерозійних ґрунтових процесів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія та картографія» / М. Т. Процик. – Львів, 2012. – 26 с.

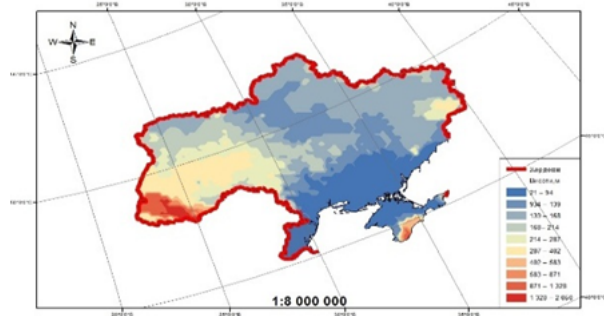


Рис. 12. Побудова ЦМР України за методом інтерполяції на основі локальних поліномів

8. *Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2). In V. Barnett. Interpreting Multivariate Data. Chichester: John Wiley. pp. 21–36.*
9. *Шипулін В. Д. Основи ГІС-аналізу : навч. посіб. / В. Д. Шипулін. – Х. : ХНУМГ, 2014. – 330 с.*
10. *Новаковський Б. А. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей / Б. А. Новаковський, С. В. Прасолов, А. И. Прасолова. – М. : Научный мир, 2003. – 95 с.*
11. *Хромых В. В. Цифровые модели рельефа : учеб. пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых. – Томск : ТМЛ-Пресс, 2007. – 178 с.*

### References

1. *Zatserkovnyi, V.I., Tishaiev, I.V., Virshylo, I.V., Demydov, V.K. (2016). Heoinformatsiini systemy v naukakh pro Zemliu [GIS in Earth sciences]. Nizhyn: NDU im. M. Hoholia (in Ukrainian).*
2. *Burachek, V.H., Zhelezniak, O.O., Zatserkovnyi, V.I. (2011). Heoinformatsiinyi analiz prostorovykh danykh [Geoinformation analysis of spatial data]. Nizhyn: Aspekt-Polihraf (in Ukrainian).*
3. *Serbeniuk, S.N., Koshel, S.M., Musin, O.R. (1990). Metody modelirovaniia geopolei po dannym v neregularno raspolozhennykh tochkakh [Simulation methods geofields according to irregularly spaced points]. Geodeziia i kartografiia – Geodesy and cartography, no. 1, pp. 31–35 (in Russian).*
4. *Poletaev, A.M. (2009). Metody sertifikatsionnykh ispytaniy tsifrovyykh modelei relefa, sformirovannykh na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniia Zemli [Methods of certification tests of digital elevation models generated based on remote sensing data]. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa – Current problems in remote sensing of the Earth from space, issue 6, vol. 1, pp. 220–226 (in Russian).*
5. *Chaskovskiy, O.H. (2009). Stvorennia tsyfrovyykh modelei reliefu na osnovi danykh aerofotoznimannia [Creation of digital elevation models based on aerial photographs]. Retrieved from [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/natural/lglpdp/2009\\_35/35-3.pdf](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/lglpdp/2009_35/35-3.pdf).*
6. *Chto takoe SRTM? Dannye SRTM, i gde ckachat' SRTM [What is SRTM? SRTM data, and where to download SRTM]. Retrieved from <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109 -dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh>.*
7. *Protsyk, M.T. (2012). Metody fotogrammetrychnoho ta kartohrafichnoho suprovodu bahatorivnevoi systemy monitorynhu eroziynykh gruntovykh protsesiv [Methods of photogrammetric and mapping support multi-level monitoring of erosion of soil processes]. Extended abstract of candidate's thesis. Lviv (in Ukrainian).*
8. *Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2). In V. Barnett. Interpreting Multivariate Data. Chichester: John Wiley, pp. 21–36.*
9. *Shypulin, V.D. (2014). Osnovy HIS-analizu [Fundamentals of GIS Analysis]. Kharkiv: KhNUMH (in Ukrainian).*
10. *Novakovskii, B.A., Prasolov, S.V., Prasolova, A.I. (2003). Tsifrovyye modeli relefa realnykh i abstraknykh geopolei [Digital elevation models of real and abstract geofields]. Moscow: Nauchnyi mir (in Russian).*
11. *Khromykh, V.V., Khromykh, O.V. (2007). Tsifrovyye modeli relefa [Digital elevation models]. Tomsk: TML-Press (in Russian).*

**Зацерковний Віталій Іванович** – доктор технічних наук, завідувач кафедри геоінформатики, Київський національний університет ім. Тараса Шевченка (вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна).

**Зацерковный Виталий Иванович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой геоинформатики, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко (ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина).

**Vitalii Zatserkovnyi** – Doctor of Technical Sciences, Head Department of Geoinformatics, Taras Shevchenko National University of Kyiv (90 Vasylkivska Str., 03022 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2346-9496>

**Рулъ Наталія Володимирівна** – бакалавр, Національний авіаційний університет (просп. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03680, Україна).

**Рулъ Наталья Владимировна** – бакалавр, Национальный авиационный университет (просп. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, 03680, Украина).

**Natalia Rul** – bachelor, National Aviation University (1 Cosmonaut Komarov Av., 03680 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** natrull1996@ukr.net

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Плічко Людмила Володимирівна** – керівник гуртка, Куликівський районний центр позашкільної освіти (вул. Шевченка, 4а, смт. Куликівка, Чернігівська область, 16300, Україна).

**Пличко Людмила Владимировна** – руководитель кружка, Куликовский районный центр внешкольного образования (ул. Шевченка, 4а, пгт. Куликовка, Черниговская область, 16300, Украина).

**Liudmyla Plichko** – club tutor, Centre after school study of Kulikovka district (4A Shevchenko Str., Kulikovka, Chernihiv region 16300, Ukraine).

**E-mail:** PlichkoL@rambler.ru

**Кривоберець Сергій Володимирович** – викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Белова, 4, м. Чернігів, 14000, Україна).

**Кривоберец Сергей Владимирович** – преподаватель кафедры геодезии, картографии и землеустройства, Черниговский национальный технологический университет (ул. Белова, 4, г. Чернигов, 14000, Украина).

**Serhiy Kryvoberets** – lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (4 Belova Str., 14000 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** agrogis@mail.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2193-1096>

**ResearcherID:** <http://www.researcherid.com/rid/N-2859-2016>