

*В. Ю. Беленок, канд. фіз.-мат. наук, доцент,
О. Є. Николаєнко, канд. техн. наук, с.н.с.
(Національний Авіаційний Університет, Україна)*

Застосування методу ANUDEM для побудови цифрових моделей рельєфу в ГІС

Розглянуто інтерполяційні методи побудови цифрових моделей рельєфу в ГІС. Проаналізовано цифрові моделі рельєфу, побудовані різними методами інтерполяції в ГІС ArcGIS та Surfer. Особливу увагу приділено методу ANUDEM, який дозволяє отримувати гідрологічно коректні цифрові моделі рельєфу.

Одним зі способів зображення рельєфу місцевості за допомогою сучасних геоінформаційних технологій є побудова цифрової моделі рельєфу (ЦМР). ЦМР – це особливий вид тривимірних математичних моделей, що є відображенням як реальних, так і абстрактних геополів (поверхонь). Також ЦМР є основою представлення даних в автоматизованій картографії. У літературі можна знайти різні означення ЦМР. Наведемо деякі з них. Згідно з визначенням, наведеним на сайті Геологічної служби США (USGS), ЦМР – це масиви регулярно розташованих значень висот, наведені або в універсальній поперечній проекції Меркатора (UTM), або в географічній системі координат. Комірки сітки розташовані через рівні інтервали з півдня на північ, які впорядковані із заходу на схід [10]. DEM також часто визначають як регулярний масив висот, що відраховуються від будь-якої референційної поверхні [12]. Згідно з джерелом [13] ЦМР – це файл значень висотних відміток, приурочених до вузлів доволі дрібної регулярної мережі та організованих у вигляді прямокутної матриці, що являє собою цифровий вираз висотних характеристик рельєфу на топографічній карті.

ЦМР відіграють фундаментальну роль в науках про Землю та мають безліч застосувань. Вони можуть бути використані для розрахунку похідних величин, таких як об'єм, ухил, кривизна, затінення пагорбів, контури (ізолінії), видимість із заданих ділянок, дренаж і гравітаційне тягіння.

Приклади застосування ЦМР включають їх використання в якості базового шару в ГІС, наприклад, для планування інженерних об'єктів (автодороги, залізниці, каналів), для вирішення задач гідрології (аналіз дренажних і водозбірних зон), аналізі берегової лінії (затоплення), виявлення руху мас. у гірських районах, візуалізації рельєфу тощо.

У ГІС використовуються різні методи інтерполяції для побудови ЦМР за початковими наборами даних. Усі методи інтерполяції можна поділити на дві категорії: *детерміновані та геостатистичні*. Детерміновані методи інтерполяції можна розділити на дві групи: глобальні та локальні. Глобальні методи обчислюють прогнози, використовуючи весь набір даних. Локальні методи обчислюють прогнози на основі виміряних точок у визначених околицях, які є меншими просторовими областями в межах більшої досліджуваної області [9].

Розглянемо більш детально детерміновані методи.

1. *Детерміновані методи інтерполяції поверхонь*, які використовують для інтерполяції математичні функції і не мають випадкової компоненти. До детермінованих методів належить:

- глобальна поліноміальна інтерполяція;
- локальна поліноміальна інтерполяція;
- метод зворотньо-зважених відстаней (ЗЗВ);
- радіальні базисні функції;
- інтерполяція ядра з бар'єрами;
- дифузійна інтерполяція з бар'єрами.

2. *Геостатистичні методи інтерполяції* ґрунтуються на математичних і статистичних моделях, що враховують просторову автокореляцію між опорними точками. Розповсюдженими в ГІС є методи кригінгу (Kriging), які придатні для різних типів даних і мають різні базові припущення. Розрізняють:

- ординарний кригінг;
- простий кригінг;
- універсальний кригінг;
- індикаторний кригінг;
- імовірнісний кригінг;
- диз'юнктивний кригінг;
- площадна інтерполяція;
- емпіричний байєсівський кригінг.

Існує велика кількість робіт, присвячених методам інтерполяції ЦМР, зокрема в ГІС.

У роботі [6] розглянуто можливість побудови ЦМР за радянськими топографічними картами різних масштабів з метою оцінити практичність використання таких ЦМР для планування доріг. Отримані ЦМР порівнюються з наявними моделями рельєфу ASTER і SRTM шляхом віднімання растрів. Позитивним у роботі є використання методу ANUDEM для побудови ЦМР, а до недоліків роботи можна віднести те, що ЦМР були побудовані за допомогою обмеженого набору висотних даних – тільки на основі горизонталей та абсолютних висотних відміток.

Автори роботи [1] провели порівняльний аналіз ЦМР, побудованих різними методами інтерполяції в ГІС. Також детально описано деякі методи інтерполяції. Автори розглядають три сценарії. Перший сценарій включає 10 % випадково відібраних опорних точок, другий – 20 %, а третій – 30 %. Обчислюються середня абсолютна похибка (MAE) і середньоквадратична похибка (RMSE). Автори дійшли висновку, що отримані результати не мають великої різниці, проте найбільш точні результати отримано з методів інтерполяції сплайнами і кригінгу. До недоліків роботи можна віднести використання малого набору висотних даних, відсутність методу ANUDEM і розгляд невеликої кількості інтерполяційних методів.

У роботі [2] також виконано порівняльний аналіз ЦМР, побудованих різними методами інтерполяції в ГІС, зокрема, методом ANUDEM. Матриця висот для побудови ЦМР різними методами інтерполяції та опорні точки були

отримані за допомогою наземних методів зйомки. Отримані ЦМР також порівнювалися з моделлю SRTM на територію Індії. Зроблено висновок, що метод кригінгу працює краще порівняно з іншими сучасними методами в більшості випадків.

У роботі [8] досліджуються три різні детерміновані підходи для побудови ЦМР: найближчої околиці, топо в растр (ANUDEM) та ЗЗВ. Як матрицю висот використовували дані Глобальних навігаційних супутникових систем. ЦМР були інтерпольовані з просторовою розрізненістю в діапазоні від 0.5 м до 10 м. Було виявлено, що найвища просторова розрізненість (0.5 м) призводить до найменших помилок в отриманих ЦМР (RMSE = 0.428 м, MAE = 0.274 м). Метод ANUDEM дав найбільшу точність побудови ЦМР. До недоліків роботи можна віднести дослідження точності малої кількості методів інтерполяції та відсутність розгляду геостатистичних методів взагалі.

Алгоритм ANUDEM – це локально-адаптивний інтерполяційний підхід, який запропонований Майклом Хатчинсоном в Австралійському Національному Університеті [5]. Даний алгоритм використовує метод інтерполяції, що спеціально розроблений для створення поверхні, яка більш точно представляє природну поверхню дренажу і зберігає як лінії хребта, так і мережі потоків.

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

ANUDEM враховує особливий характер поверхонь рельєфу, а також специфічні точки поверхні, які можуть бути використані для зображення рельєфу. Ця модель розглядається в багатьох дослідженнях для отримання гідрологічно коректних ЦМР, наприклад у [4].

ЦМР вважається гідрологічно коректною, якщо задовольняє двом основним вимогам [11]:

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

Для створення ЦМР методом ANUDEM можна використовувати повний набір даних про місцевість, отриманих із топографічних карт. Нижче наведено інформацію про рельєф, що міститься на топографічних картах, яка були використані для побудови ЦМР у даній роботі (топографічні карти 1:50 000).

1. Відмітки висот. Точкові об'єкти, що містять в атрибутивній таблиці значення висот: висотні позначки, урізи води, пункти геодезичної мережі. Кожен файл у загальному форматі містить координати X, Y, Z, які позначають планове положення та висоту кожної точки даних. Немає обмежень у кількості вхідних висотних позначок, прочитаних із файлів даних, які надані користувачем.

2. Локальні пониження. Клас точкових об'єктів, який показує відомі локальні топографічні зниження. Висоту точки пониження можна залишити невизначеною, встановивши значення Z, що лежить поза визначеними користувачем межами (наприклад, -999.0).

3. Водотоки. Лінійні об'єкти, що представляють мережу водотоків (річки, струмки, водотоки, що пересихають). Усі дуги повинні бути орієнтовані вниз за течією. Пари координат у кожному потоці обов'язково повинні бути упорядковані від найвищої точки до найнижчої.

4. Узбережжя. Клас полігональних просторових об'єктів, що містять контури берегової лінії. Комірки результуючого растра, розташовані поза цими полігонами, приймають значення менше, ніж зазначена користувачем мінімальна межа висоти.

5. Ізолінії. Лінійні об'єкти (горизонталі), які містять в атрибутивній таблиці значення висоти. Таблиця повинна містити координати та висоту горизонталі. Ізолінії, що з'єднуються з ізолініями з різними висотами, позначені у файлі помилок.

6. Дані границь озер. Клас полігональних просторових об'єктів, що визначають місце розташування озер. Усім коміркам вихідного растра, що потрапляють всередину озера, присвоюється значення висоти, мінімальне з висот всіх комірок розташованих уздовж берегової лінії.

7. Обриви. Лінійні об'єкти, що представляють обриви. Лінійні об'єкти-обриви повинні мати напрямок, при цьому ліва сторона лінії повинна відповідати низькій стороні обриву, а права – високій.

8. Винятки. Полігональні об'єкти – області, які виключаються з процесу інтерполяції. Найчастіше використовуються для виключення даних, пов'язаних з дамбами і мостами.

Переваги використання методу ANUDEM:

- швидко обробляє різні типи даних у вигляді точок, ліній, полігонів;
- можливість використання для визначення гідрографічних характеристик річок та їх басейнів;
- кількість вхідних даних може бути на порядок меншою, ніж зазвичай потрібно для адекватного опису поверхні оцифрованими контурними лініями (горизонталями);
- отримані ЦМР мають малі похибки порівняно з іншими методами.

Для побудови ЦМР топографічні карти були відскановані, а автоматична оцифровка горизонталей була виконана за алгоритмом, описаним в [7]. На наступному кроці побудови ЦМР задається розмір пікселя, який зазвичай встановлюється приблизно 0.5 мм у масштабі карти. Після цього було побудовано ЦМР різними методами в ArcGIS та Surfer. Точність методів інтерполяції було оцінено за допомогою середньоквадратичної похибки (RMSE) [3].

Висновки

За допомогою різних методів інтерполяції було побудовано матриці висот (ЦМР). Для кожної з побудованих матриць висот було проведено оцінку їх точності шляхом розрахунку середньоквадратичної похибки (RMSE) в опорних точках. Було визначено, що методи TIN, триангуляція з лінійною інтерполяцією, метод найближчої околиці, ANUDEM мають найнижчі значення середньоквадратичної похибки зі значеннями 0.42 м, 0.93 м, 0.96 м та 1.07 м, відповідно. Для оцінки надійності RMSE було використано довірчі інтервали. Усі значення RMSE знаходяться в розрахованих інтервалах. Разом із тим, для визначення особливостей річкової мережі та водозбору, а також для гідрологічного моделювання рекомендується використовувати ЦМР, побудовані за методом ANUDEM, оскільки він дозволяє отримати гідрологічно коректні ЦМР.

Список літератури

- [1]. Ajvazi, B., & Czimmer, K. (2019). Comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: Case study of Rahovec, Kosovo. *Geodesy and Cartography*, 45(1), 43–48. <https://doi.org/10.3846/gac.2019.7921>
- [2]. Arun, P. V. (2013). A comparative analysis of different DEM interpolation methods. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 16, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.09.001>
- [3]. Belenok V., Velikodsky Yu., Nikolaienko O., Rul N., Kryachok S., Malik T. (2021). Comparative analysis for methods of building digital elevation models from topographic maps using geoinformation technologies. *Geodesy and Cartography*, Vol.47, Issue 4, 191-199. <https://doi.org/10.3846/gac.2021.13208>
- [4]. Curebal, I., Efe, R., Ozdemir, H., Soykan, A., & Sonmez, S. (2015). Gis-based approach for flood analysis: Case study of kedicere flash flood event (Turkey). *Geocarto International*, 31(4), 355–366. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1047411>
- [5]. Hutchinson, M. F. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Spatial Data Handling* (pp. 117–133). Sydney, Australia. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)
- [6]. Hutsul, T., & Smirnov, Y. (2017). Comparative accuracy assessment of global DTM and DTM generated from soviet topographic maps for the purposes of road planning. *Geodesy and Cartography*, 43(4), 173–181. <https://doi.org/10.3846/20296991.2017.1412638>
- [7]. Rul, N. V., Velikodsky, Yu. I., & Zatcerkovnyi, V. I. (2018, May 14–17). The algorithm of automatic vectorization of contours for constructing digital elevation models [Conference Proceedings]. 17th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Institute of Geology of Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801840>
- [8]. Salekin, S., Burgess, J. H., Morgenroth, J., Mason, E. G., & Meason, D. F. (2018). A comparative study of three nongeostatistical methods for optimising digital

elevation model interpolation. ISPRS International Journal of Geo-Information, 7 (8), 300. <https://doi.org/10.3390/ijgi7080300>

[9]. Tagelsir, M. G. (2010). Handbook of research on hydroinformatics: Technologies, theories and applications. IGI Global.

[10]. United States Geological Survey, 2023. EarthExplorer. Режим доступа. <https://earthexplorer.usgs.gov>.

[11]. Wang, Y.-J., Qin, C.-Z., Zhu, A.-X. (2019). Annals of GIS, 25 (2), 83-97. <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1604571>

[12]. Wood, J. D. (1996). The geomorphologic characterization of Digital Elevation Models [PhD Thesis]. University of Leicester, Leicester, England.

[13]. Англо-русско-украинский словарь по ГИС и ДЗЗ: учеб. пособие / Г.Г. Пивняк, Б.С. Бусыгин, Г.М. Коротенко, Л.М. Коротенко; Мин. образования и науки Украины; Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск: НГУ , 2014. – 378 с.