

І.С. Гунько

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ НА ОСНОВІ ПРОСТОРОВОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ (Частина 1)

У статті розглядається використання різних методів для побудови цифрової моделі рельєфу, зосереджуючись на просторовій інтерполяції. Для аналізу була обрана ділянка та геоінформаційний пакет Surfer, що містить в собі велику кількість методів побудови поверхні за нерівномірно розподіленими у просторі даними. При виконанні побудови цифрової моделі рельєфу за кожним із методів, які пропонує пакет Surfer було обрано лише декілька найкращих методів, які змогли відобразити рельєф більш деталізовано. Був проведений аналіз особливостей використання кожного із цих відібраних методів, відображені їх переваги та недоліки.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу, методи побудови, просторова інтерполяція, геоінформаційна система, Surfer.

Постановка проблеми

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) є важливою складовою геодезичних робіт, яка дозволяє відтворювати поверхню землі у цифровому вигляді з точністю до певного рівня деталізації. ЦМР складається з великої кількості точок, які відображають висоту рельєфу на конкретних ділянках земної поверхні.

Для побудови ЦМР використовуються різні методи, серед яких хотілось би відмітити методи на основі просторової інтерполяції. Просторова інтерполяція полягає у побудові функції, яка дозволяє знайти значення висоти у будь-якій точці поверхні землі [1]. Однією з переваг просторової інтерполяції є можливість враховувати нерівномірність розташування точок на поверхні землі, що забезпечує більш точну модель рельєфу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасному світі, коли технології розвиваються з космічною швидкістю, цифрова модель рельєфу стала дуже популярною у багатьох сферах життя, зокрема в геодезії.

Перші дослідження з побудови ЦМР були проведені в кінці 1950-х років, але в той час ще не було необхідної техніки і обчислювальних ресурсів для використання цієї моделі в практичних застосуваннях [2, 3]. Зараз з розвитком технологій та наявністю потужних обчислювальних ресурсів, ЦМР стали широко використовуватись у геодезії для побудови топографічних карт та планів міст.

Звісно, що одним із перших методів побудови ЦМР був метод триангуляції, що базується на розбитті території на трикутники. Але пізніше

почали з'являтися нові методи побудови ЦМР на основі просторової інтерполяції [4-6]. Тож виникла потреба в забезпеченні вищої точності побудови ЦМР, особливо в тих випадках, коли необхідно виконати точні вимірювання. Також, важливим фактором є швидкість обчислення, особливо в разі обробки великого обсягу даних. Просторова інтерполяція є найбільш ефективним методом для забезпечення точності та швидкості побудови ЦМР в геодезичних цілях [7]. Однак, в деяких випадках, метод триангуляції може бути кращим, наприклад, коли немає достатньої кількості точок для застосування методів просторової інтерполяції, тоді необхідно досить детально обирати параметри побудови триангуляції, щоб забезпечити максимальну точність та мінімальну похибку.

Крім того, з поширенням високоточних геодезичних приладів і технологій, таких як GPS та лідар, методи побудови ЦМР значно покращилися. Нещодавні дослідження у цій галузі спрямовані на поліпшення точності та якості цифрових моделей рельєфу за допомогою різних методів, включаючи нові підходи до інтерполяції та зменшення шуму в даних. Сучасні методи включають в себе інтерполяцію кривих поверхонь (кривих другого порядку), методи згладжування, які зменшують шум та випадкові помилки, і методи адаптивної фільтрації, які здатні виявляти та виправляти аномалії даних [8-11]. Такі підходи значно поліпшують точність і якість ЦМР.

Іншим важливим аспектом є те, що побудова ЦМР – це лише початок процесу використання цих даних в геодезичних цілях. Наступні кроки можуть включати створення карт рельєфу, моделей поверхні, планування інженерних робіт, облік та

аналіз змін рельєфу тощо. У всіх цих випадках точність та якість ЦМР відіграє важливу роль у забезпеченні точності та ефективності робіт.

Формування мети статті

У галузі геодезії цифрові моделі рельєфу є необхідним елементом при виконанні вимірювань та створенні проектної документації для будівництва. Наприклад, цифрова модель рельєфу може бути використана для планування території або підготовки топографічних планів, але при цьому її відтворення не повинно займати багато часу. Метою даної статті є аналіз існуючих методів побудови цифрових моделей рельєфу з їх подальшим порівнянням для вибору найкращого. Для проведення аналізу був обраний широко відомий пакет геоінформаційної системи Surfer, який містить в собі досить велику кількість детермінованих методів та геостатичний метод на основі просторової інтерполяції.

Виклад основного матеріалу

Геоінформаційні системи дозволяють збирати, зберігати, обробляти, отримувати доступ, відображати та поширювати просторово-організовані дані та допомагають приймати науково-обґрунтовані управлінські рішення. Геоінформаційна система Golden Software Surfer в даний час є галузевим стандартом побудови графічних зображень двох змінних функцій. Неперевершеною перевагою програми є закладені в неї алгоритми просторової інтерполяції, які дозволяють з високою якістю створювати цифрові моделі поверхні за нерівномірно розподіленими у просторі даними [12-15].

Логіка роботи з пакетом може бути розбита на три основні функціональні блоки:

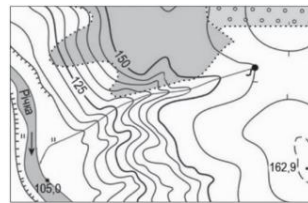
- побудова цифрової моделі поверхні;
- допоміжні операції з цифровими моделями поверхні;
- візуалізація поверхні.

ЦМР зазвичай представляється значеннями у вузлах прямокутної регулярної сітки, дискретність якої залежить від конкретної задачі. Surfer використовує власні файли типу GRID (двійкового або текстового формату), щоб зберігати значення. Є три способи отримання значень у вузлах сітки:

- за вихідними даними, заданими у довільних точках області (у вузлах нерегулярної сітки);
- обчислення значень функції, заданої користувачем у явному вигляді;
- перехід від однієї регулярної сітки до іншої, наприклад, при зміні дискретності сітки.

Також можна використовувати готову цифрову модель рельєфу, отриману користувачем, наприклад, в результаті чисельного моделювання.

У програмі Surfer доступно 12 різних методів просторової інтерполяції. Для аналізу був взятий довільний фрагмент топографічної карти (рис. 1, а), який був попередньо оцифрований та експортований у формат ASCII із готовими координатами для побудови ЦМР. І це все можна робити відразу у Surfer, що є дуже зручним при роботі із топографічними картами (рис. 1, б), або відразу підвантажувати координати із високоточних електронних геодезичних приладів, GPS та ін.



а)

1	15.44070817	18.85352662	155
2	15.50053831	18.0808411	155
3	15.799689	17.46269269	155
4	16.41793376	16.92181283	155
5	17.13589541	16.69000717	155
6	17.69431003	16.63205576	155
7	18.19289452	16.61273862	155
8	18.75130914	16.86386141	155
9	18.97068631	16.97976424	155
10	13.5859739	18.85352662	155

б)

Рис. 1. Вихідні дані для побудови ЦМР

а) – фрагмент топографічної карти;

б) – координати фрагменту карти

Проте, виконавши побудову за цими вихідними топографічними даними надалі буде проведений аналіз лише 6-ти методів із 12-ти, які змогли більш детально відобразити реальну ситуацію рельєфу, а саме:

- метод крігінгу (Kriging) – використовує статистичний підхід та розраховує значення в точках за допомогою лінійної комбінації даних усіх навколишніх точок з урахуванням їх відстаней та кореляції;

- триангуляція з лінійною інтерполяцією (Triangulation with Linear Interpolation) – використовує трикутники, утворені з точок, та лінійну інтерполяцію значення в середині кожного трикутника;

- метод радіальних базисних функцій (Radial Basic Function) – розраховує значення в точках за допомогою суми функцій, що залежать від відстаней між точками та параметрів;

- метод природної околиці (Natural Neighbor) – використовує зважену суму значень найближчих до точки даних з урахуванням їх відстаней та площин, які вони утворюють;

- модифікований метод Шепарда (Modified Shepard's Method) – використовує зважену суму значень найближчих до точки даних з урахуванням їх відстаней та ваги, яка зменшується з віддаленням від точки;

- метод мінімальної кривизни (Minimum Curvature) – використовує спрямованість рельєфу та інші властивості, щоб знайти гладку функцію, яка апроксимує дані.

Інші методи, які пропонує Surfer – розглядатись не будуть тому, що сильно згладжують

поверхню, а це не дає змогу повноцінно оцінити рельєф та виконувати в подальшому якісь геодезичні розрахунки.

Алгоритми, які доступні в програмі Surfer, звичайно використовують середньозважену інтерполяцію. Загалом оцінка для вищенаведених методів обчислюється за формулою [15]:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n w_{i0} \cdot Z_i, \quad (1)$$

де w_{i0} – вага i -ої точки даних при оцінці значення Z в точці (X_0, Y_0) .

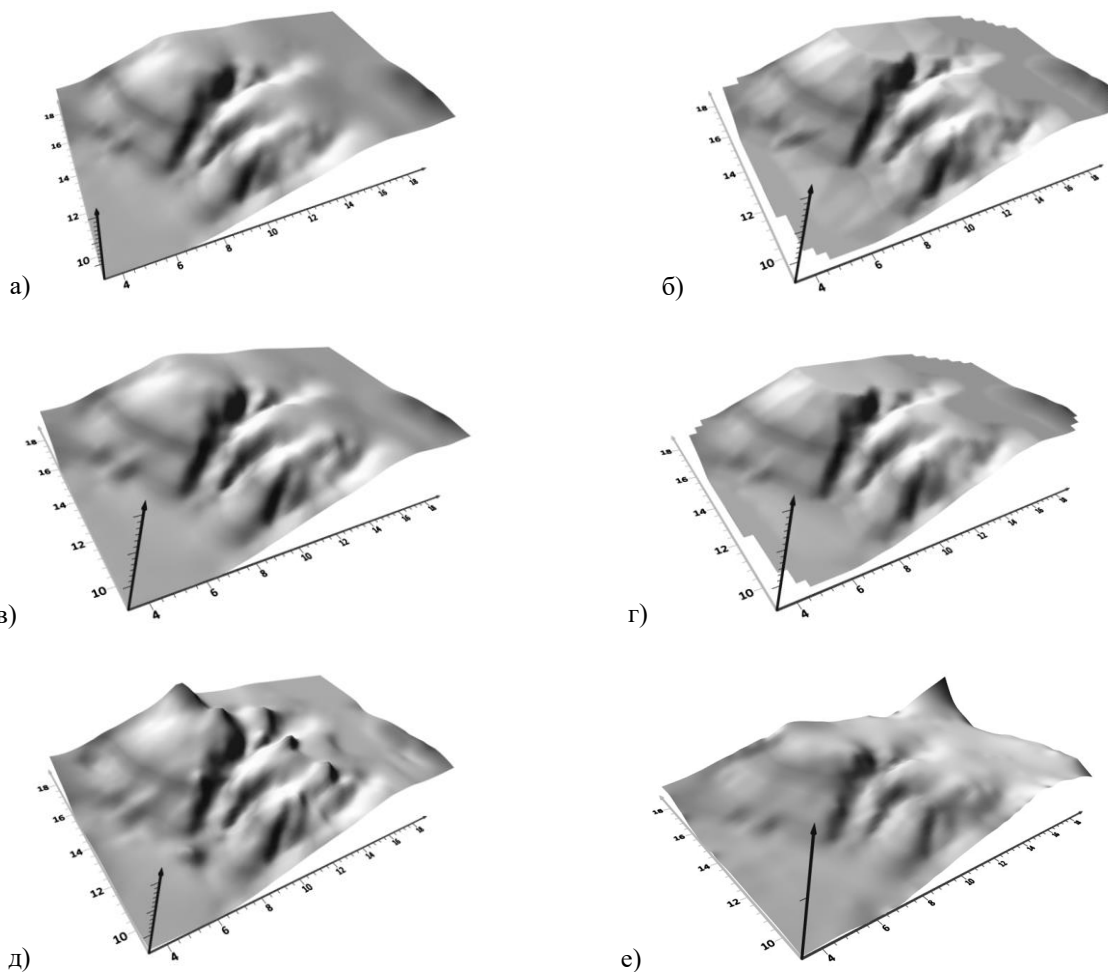
Це означає, що за інших рівних умов, чим ближче вибіркова точка до точки, де робиться оцінка, тим більший її внесок у цю оцінку Z . Різниця між методами (табл. 1) полягає в тому, як вагові коефіцієнти обчислюються і застосовуються до точок даних.

Побудовані ЦМР кожним із методів наведені на рисунку 2. Особливості побудови ЦМР по кожному методу, їх переваги та недоліки зібрані у таблицю 2.

Таблиця 1

Методи та їх формули при побудові ЦМР [15]

Назва методу	Формула
Геостатичний метод	
Kriging	$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_i$
Детерміновані методи	
Triangulation with Linear Interpolation	$Z_0 = \frac{-a \cdot X_0 - b \cdot Y_0 - d}{c}$
Radial Basic Function	$Z_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i B(d_{i0})$
Natural Neighbor	$Z_0 = \sum_{i=1}^n w_{i0} \cdot Z_i$
Modified Shepard's Method	$Z = \frac{\sum_{i \in N_0} w_{0i} \cdot Q_i(X_0 Y_0)}{\sum_{i \in N_0} w_{0i}}$
Minimum Curvature	$Z(X, Y) = a + b \cdot X + c \cdot Y + e(X, Y)$



а) – Kriging; б) – Triangulation with Linear Interpolation; в) – Radial Basic Function; г) – Natural Neighbor; д) – Modified Shepard's Method; е) – Minimum Curvature

Рис. 2. Побудовані цифрові моделі рельєфу різними методами

Таблиця 2

Аналіз методів побудови ЦМР

Назва методу	Особливості методу	Переваги	Недоліки	Застосування методу
Kriging	Статистичний метод, що базується на кореляційному аналізі даних. Використовується для оцінки значень в точках, де відсутні дані.	Висока точність прогнозування, можливість врахування різних типів залежностей між даними, можливість використання різних функцій кореляції, можливість врахування різного рівня невизначеності даних.	Висока вимогливість до статистичних даних, складність розрахунків, обмежені можливості використання для великих масивів даних.	Різноманітні ділянки поверхні, включаючи ті, що мають складну топографію та нерівномірний розподіл даних.
Triangulation with Linear Interpolation	Інтерполяція на основі триангуляції, де змінні значення спочатку апроксимуються лінійними функціями на кожному трикутнику, а потім інтерполуються на довільній точці на поверхні.	Простий у використанні, точні результати на нерегулярних мережах даних, працює зі значеннями, що містять помилки.	Може дати низьку точність, якщо мережа даних нерівномірна, ділянки з сильними нахилами можуть бути важкі для інтерполяції.	Плоскі та легко нахилена місцевість з рівномірною мережею даних.
Radial Basic Function	Метод полягає у побудові моделі за допомогою суми функцій, що залежать від відстаней між точками та параметрів.	Точність і швидкість, здатність апроксимувати прямолінійні та нелінійні залежності, можливість використання набагато меншої кількості вузлів триангуляції порівняно з іншими методами.	Залежність від вибору параметрів, складність вибору оптимальних параметрів.	Для ділянок з нерівномірною та складною місцевістю, де інші методи можуть бути менш ефективними.
Natural Neighbor	Метод бере до уваги тільки найближчих сусідів точки оцінки, що дозволяє точніше враховувати місцеву геометрію поверхні.	Висока точність та надійність, особливо на ділянках з нерівномірним розподілом даних. Може працювати з непорядкованими та неструктурованими даними.	Може бути повільнішим за деякі інші методи на великих наборах даних. Не підходить для розрахунків на великих областях через високу обчислювальну складність.	Горбиста місцевість, а також для даних з нерівномірним розподілом точок.
Modified Shepard's Method	Використовує вагу залежно від відстані від точки інтерполяції до найближчих точок даних.	Працює добре для даних з невеликою кількістю точок, досить швидкий, може бути використаний для даних з різними перепадами висот.	Не екстраполює за межі даних, може давати гладкі, але не реалістичні результати для даних з високим рівнем шуму.	Горбиста місцевість, рельєф з нерівномірно розподіленими даними.
Minimum Curvature	Метод, що базується на ідеї мінімізації кривизни поверхні, що проходить через задані точки.	Висока точність в точках, де є достатньо точних даних, можливість роботи зі змішаними даними (точкові та градієнтні), можливість використання різних функцій апроксимації, швидкість розрахунків.	Обмежені можливості використання для малооб'ємних даних, недостатня точність в областях з нерівномірним розподілом даних, недостатня точність в точках, де недостатньо даних для апроксимації поверхні.	Ділянки з рівною місцевістю або з невеликими перепадами висот.

Висновки

Кожен метод має свої переваги та недоліки, тому вибір найкращого методу залежить від контексту та особливостей конкретної задачі. Однак, все ж таки можна виділити метод Kriging, тому, що він більш привабливий для задачі оцінки значень в точках, де відсутні дані, оскільки він забезпечує високу точність прогнозування, можливість врахування різних типів залежностей між даними, можливість використання різних функцій кореляції та врахування різного рівня невизначеності даних. Також, Kriging може бути більш ефективним для розрахунків на ділянках з різноманітною поверхнею, включаючи ті, що мають складну топографію та нерівномірний розподіл даних. Триангуляція з лінійною інтерполяцією та метод природної околиці також є ефективними методами з високою точністю, але вони можуть давати менш деталізований результат порівняно з методом крігінгу. Метод радіальних базисних функцій та модифікований метод Шепарда є менш ефективними та можуть давати менш точний результат. Метод мінімальної кривизни може бути корисним для побудови ЦМР на нерівних поверхнях, але він не є таким точним, як «Kriging».

В цілому, вибір методу залежить від мети використання та вимог до точності результату.

Література

1. Геоінформаційні системи і бази даних / В.І. Зацерковний, В.Г. Бурачек, О.О. Железняк, А.О. Терещенко. Ніжин, 2017. 237 с.
2. Світличний О.О. Основи геоінформатики: навчальний посібник. / О.О. Світличний, С.В. Плотницький. Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. 295 с.
3. Паздрій І.М. Використання геоінформаційних систем для зображення рельєфу земної поверхні. / І.М. Паздрій, Ю.В. Білінський // Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2006. Вип. 33. С. 301-309.
4. Philip G.M. A precise method for determining contoured surfaces. / G. M. Philip, D. F. Watson // Australian Petroleum Exploration Association Journal. 1982. № 22. P. 205-212. <https://doi.org/10.1071/AJ81016>
5. Watson D.F. A refinement of inverse distance weighted interpolation. / D. F. Watson, G. M. Philip // Geo-Processing, 1985. № 2. P. 315-327.
6. Бурштинська, Х. В. Порівняльний аналіз побудови цифрових моделей рельєфу з використанням апроксимаційних функцій. / Х.В. Бурштинська // Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2001. Вип. 61. С. 137-148.
7. Бурштинська, Х. В. Теоретичні основи та експериментальні дослідження математичних функцій для побудови цифрових моделей рельєфу. / Х.В. Бурштинська, О.С. Заяць // Вісник геодезії і картографії. 2002. № 4. С. 32-37.
8. Eckstrein B.A. Evaluation of spline and weighted average interpolation algorithms. / B.A. Eckstrein // Comput. and beasci. 1989. Vol. 15, Ne 1. P. 79-94. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(89\)90056-3](https://doi.org/10.1016/0098-3004(89)90056-3)

9. Зазуляк, П. М. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань: навч. пос. / П. М. Зазуляк, В. Г. Гавриш, Е. М. Євсєєва, М. Д. Йосипчук.. Львів: Видавництво «Растр – 7», 2007. 408 с.
10. Digital Elevation Models: веб-сайт. Режим доступу: <https://www.cdema.org/virtuallibrary/index.php/charimhbook/data-management-book/3-base-data-collection/3-2-digital-elevation-models> (дата звернення: 25.04.2023).
11. Маценко В. Г. Комп'ютерна графіка: навч. посіб./ В.Г. Маценко. Чернівці: «Рута», 2009. 343 с.
12. Жуков М. Пакет наукової графіки Surfer: методичні вказівки. / М. Жуков. Київ, 2009. 63 с.
13. Луцанова А. М. Особливості створення та візуалізації 3D моделей рельєфу за допомогою сучасних програмних продуктів. / А.М. Луцанова // Часопис картографії. 2013. Вип. 7. С. 44-52.
14. Шупулін В. Д., Основні принципи геоінформаційних систем: навч. посіб. / В.Д. Шупулін. Харків: ХНАМГ, 2010. 314 с.
15. Surfer. User's Guide: Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. Golden Software, LLC. 1431 с.

References

1. Zatserkovnyi V.I., Burachek V.G., Zhelezniak O.O., Tereshchenko A.O. (2017). *Geographic Information Systems and Databases*. Nizhyn. [in Ukrainian]
2. Svitlychnyi O.O. & Plotnytskyi S.V. (2006). *Fundamentals of geoinformatics*. VTD «University Book», Sumy. [in Ukrainian]
3. Pazdriy I., Bilinskiy Yu. (2006). Use of geoinformatic systems for representation of earth surface relief. *Visnyk of the Lviv University. Series Geography*, 33, 301-309.
4. Philip G.M., Watson D.F. (1982). A precise method for determining contoured surfaces. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 22, 205-212. <https://doi.org/10.1071/AJ81016>
5. Watson D.F., Philip G.M. (1985). A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-Processing*, 2, 315-327.
6. Burshtinska, H. V. (2001). Porivnyalniy analiz pobudovi tsifrovih modeley relefu z vikoristannyam aproksimatsiynih funktsiy. *Geodeziya, kartografiya i aerofotoznimannya*, 61, 137-148.
7. Burshtinska, H. V., Zayats, O. S. (2002). Teoretichni osnovi ta eksperimentalni doslidzhennya matematichnih funktsiy dlya pobudovi tsifrovih modeley relefu. *Visnik geodeziyi ta kartografyi*, 4, 32-37.
8. Eckstrein B.A. (1989). Evaluation of spline and weighted average interpolation algorithms. *Comput. and beasci*, 15 (1), 79-94. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(89\)90056-3](https://doi.org/10.1016/0098-3004(89)90056-3)
9. Zazulyak, P.M., Havrysh, V.G., Yevsieieva, E.M., & Yosypchuk, M.D. (2007). *Fundamentals of mathematical processing of geodetic measurements*. Raster-7 Publishing, Lviv. [in Ukrainian]
10. Digital Elevation Models. Retrieved from <https://www.cdema.org/virtuallibrary/index.php/charimhbook/data-management-book/3-base-data-collection/3-2-digital-elevation-models>
11. Matsenko V.G. (2009). *Computer Graphics*. Chernivtsi: Ruta. [in Ukrainian]
12. Zhukov M. (2009). *Surfer scientific graphics software*. Kyiv. [in Ukrainian]
13. Lutsanova A.M. (2013). Osoblyvosti stvorennia ta vizualizatsii 3D modelei relefu za dopomohoiu suchasnykh prohramnykh produktiv. *Chasopys kartohrafii*, 7, 44-52. [in Ukrainian]
14. Shypulin V.D. (2010). *The main principles of geographic information systems*. Kharkiv. [in Ukrainian]

15. Surfer. User's Guide: Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. Golden Software, LLC.

Рецензент: д-р техн. наук, професор А.Г. Батракова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна.

Автор: ГУНЬКО Ірина Сергіївна
асистент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – irinagunko98@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2562-2175>

ANALYSIS OF METHODS FOR DIGITAL TERRAIN MODELING BASED ON SPATIAL INTERPOLATION (Part 1)

I. Hunko

Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

Digital Elevation Model (DEM) is an important component of geodetic works, which allows reproducing the earth's surface in digital form with a certain level of detail. Various methods are used to construct DEMs, among which it is worth noting the methods based on spatial interpolation. One advantage of spatial interpolation is the ability to take into account the uneven distribution of points on the earth's surface, which provides a more accurate DEM.

With the spread of high-precision geodetic instruments and technologies such as GPS and LiDAR, the methods of constructing DEMs have significantly improved. Modern methods include interpolation of curved surfaces, smoothing methods that reduce noise and random errors, and adaptive filtering methods that can detect and correct data anomalies.

In the field of geodesy, digital elevation models are an essential element in performing measurements and creating project documentation for construction. The purpose of this article is to analyze existing methods for constructing digital elevation models and to compare them to choose the best one. For the analysis, the widely known geoinformation system package Surfer was selected, which contains a sufficiently large number of deterministic methods and a geostatistical method based on spatial interpolation.

The Golden Software Surfer geoinformation system is currently the industry standard for constructing graphical representations of two-variable functions. An unbeatable advantage of the program is its built-in spatial interpolation algorithms, which allow creating digital surface models with high quality for spatially unevenly distributed data.

The Surfer program provides 12 different methods of spatial interpolation. For the analysis, a random fragment of a topographic map was taken, which was previously digitized and exported in ASCII format with ready-made coordinates for constructing a DEM. However, only 6 out of the 12 methods that could more accurately reflect the real relief situation were further analyzed based on these topographic data, namely Kriging, Triangulation with Linear Interpolation, Radial Basic Function, Natural Neighbor, Modified Shepard's Method and Minimum Curvature.

Keywords: *digital elevation model, construction methods, spatial interpolation, geographic information system, Surfer.*