

УДК 614.8.043

О.О. Замирец, С.М. Андреев

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ 3D МОДЕЛИ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ НЕРЕГУЛЯРНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕГУЛЯРНОЙ РЕШЕТКИ ВЫСОТ

*Разработана методика построения 3D модели триангуляционной нерегулярной сети (TIN) на основе данных регулярной решетки высот (GRID). Проведен геостатистический анализ пространственных данных о высотах. Построены TIN и GRID 3D модели местности. Проведена интерполяция методом кригинга. Создана карта распределения значений высот.*

**Ключевые слова:** модели рельефа, 3D моделирование, триангуляционная нерегулярная сеть.

### Введение

В народном хозяйстве, науке и технике возникает множество задач, требующих описание формы поверхностей земных участков, зданий, сооружений, предметов, деталей и т.д. Как правило, форма поверхностей не точно описывается уравнениями геометрических фигур. Для практических целей для этого производят множество прямых измерений координат точек и затем строят форму поверхности расчетным путем. При этом применяют различные математические методы, такие как методы аппроксимации, системы уравнений, аппроксимирующие функции и другие. Актуальность работы обусловлена потребностью географических исследований в использовании данных о рельефе в цифровой форме в связи с возрастающей ролью геоинформационных технологий при решении различных пространственных задач, необходимостью повышения качества и эффективности методов создания и использования цифровых моделей рельефа (ЦМР).

**Анализ литературы по цифровым моделям рельефа.** Обычно первичные данные о рельефе с использованием тех или иных операций приводятся к одному из двух наиболее широко распространенных представлений поверхностей (полей) в геоинформационных системах (ГИС): растровому представлению (модели GRID) и модели TIN.

Растровая модель пространственных данных – разбиение пространства (изображения) на далее неделимые элементы (пиксели). Применительно к ЦМР растровое представление поверхности обозначает матрицу высот – регулярную (обычно квадратную) сеть высотных отметок в ее узлах, расстояние между которыми (шаг) определяет ее пространственное разрешение. Суть модели TIN в ее наименовании – «Нерегулярная треугольная сеть» (в английском оригинале – Triangulated Irregular Network). В своем пространственном выражении – это сеть треугольников – элементов триангуляции Делоне – с высотными отметками в ее узлах, что позволяет

представить моделируемую поверхность как многогранную [4].

Недостатки модели GRID проявляются при моделировании рельефа молодых горообразований. Особенно неблагоприятная ситуация с использованием регулярной сети высотных отметок складывается, если на моделируемой территории чередуются обширные выровненные участки с участками уступов и обрывов, имеющими резкие перепады высот. В таком случае на большей части моделируемой территории будет «избыточность» информации, т.к. узлы сетки GRID на плоских участках будут иметь одни и те же высотные значения. Но на участках крутых уступов рельефа размер шага сетки высот может оказаться слишком большим, а, соответственно, пространственное разрешение модели – недостаточным для передачи «пластики» рельефа.

Подобных недостатков лишена модель TIN. Поскольку используется нерегулярная сеть треугольников, то плоские участки моделируются небольшим числом огромных треугольников, а на участках крутых уступов, там, где необходимо детально показать все грани рельефа, поверхность отображается многочисленными маленькими треугольниками. Это позволяет более эффективно использовать ресурсы оперативной и постоянной памяти компьютера для хранения модели [5].

Основным методом расчёта TIN является триангуляция Делоне, т.к. по сравнению с другими методами она обладает наиболее подходящими для ЦМР свойствами: имеет наименьший индекс гармоничности как сумму индексов гармоничности каждого из образующих треугольников (близость к равноугольной триангуляции), свойства максимальности минимального угла (наибольшей невырожденности треугольников) и минимальности площади образуемой многогранной поверхности [3].

На основе проведенного анализа литературы по теме ясно, что модель TIN имеет явные преимущества перед цифровым описанием модели местности GRID. Ранее, используя данные регулярной матрицы высот,

переход к модели TIN производился только с помощью различных алгоритмов с применением в дальнейшем триангуляции Делоне. Однако, эта методика требует больших объемов компьютерной обработки. На основании изложенного выше поставлена для решения задача при наличии данных регулярной решетки высот, описывающих поверхности земных участков, перейти к другой системе описания рельефа местности, при этом не прибегая к алгоритму Делоне.

**Постановка задачи.** Разработать методику построения 3D модели на основе математического описания формы поверхности земельных участков при минимуме потери характеристик точности и временных затрат.

Для решения задачи в качестве исходных данных использовали:

- 1) значения точек, принадлежащих поверхности приведенных в трехмерной системе координат;
- 2) алгоритм описания поверхности разбивая ее на модули и разработанное программное обеспечение перехода из модели регулярной решетки высот в триангуляционную нерегулярную сеть;
- 3) результаты вычислений координаты Z (точки высоты).

## Основная часть

В феврале 2000 года Национальным управлением США по авиации и исследованию космического пространства (NASA) была проведена радарная топографическая съемка большей части территории земного шара, за исключением самых северных ( $> 60$ ), самых южных широт ( $> 54$ ), а также океанов. С помощью проекта Shuttle radar topographic mission (SRTM) были собраны данные о высотах в различных областях Земли. Данные SRTM могут быть скачаны из глобальной сети Интернет. Они имеют свой собственный формат hgt, который поддерживается несколькими распространенными ГИС пакетами. Исходные данные распространяются квадратами размером  $1 \times 1$  градус, при максимальном доступном разрешении 3 арксекунды такой квадрат является матрицей размером  $1201 \times 1201$  элементов (пикселей). Файлы имеют название соответственно их географическому расположению – значение широты и долготы градуса. Каждый квадрат состоит из данных регулярной решетки - точек через каждые 90 метров со значениями высоты в каждой из них [6].

Таким образом, имея входящие данные матрицы высот (широты, долготы, высоту) становится реально выполнимой задача создания максимально приближенной к действительности цифровой модели рельефа. Но регулярная сеть высот (GRID модель) имеет свои недостатки. В первую очередь это большой объем данных. Чем меньше выбранный шаг, тем точнее ЦМР – выше пространственное разрешение модели, но тем больше количество узлов

сетки, следовательно, больше времени требуется на расчет ЦМР [5, с.19].

Существует другой вид сети, который решает эту проблему. Нерегулярная триангуляционная сеть (TIN) – это растровая модель рельефа, которая используется для цифрового моделирования рельефа, при этом узлам и ребрам треугольной сети соответствуют исходные и производные атрибуты цифровой модели. При построении TIN-модели дискретно расположенные точки соединяются линиями, образующими треугольники. Каждый треугольник задается высотами трех его вершин, обычно представляется как плоскость и помимо информации о высоте имеет атрибуты угла наклона и экспозиции, что позволяет быстро построить на базе одной модели TIN несколько тематических карт – гипсометрическую, уклонов, экспозиций [5, с.20].

Переход от одной модели в другую решает один из главных недостатков – «избыточность» информации. В сети TIN на равнинах можно убрать точки, похожие по высоте и, таким образом, плоские участки будут моделироваться небольшим числом огромных треугольников, а на участках крутых уступов, там, где необходимо детально показать все грани рельефа остается больше точек (а иногда даже и добавляют) и поверхность отображается многочисленными маленькими треугольниками ближе к действительности [5, с.22]. На рис. 1 представлена структурная схема основных этапов работы



Рис. 1. Структурная схема основных этапов работы

Для того, чтобы начать преобразование регулярной сети в нерегулярную триангуляционную сеть, необходимо для начала определиться с территорией, рельеф которой будет исследоваться. Самая рельефная часть Украины – это Украинские Карпаты, а именно горнолыжный курорт Буковель. Выбранная территория явно занимает меньше, чем градус\*градус (так как 1 градус = 111 км), соответственно следующей задачей является обрезка необходимой области.

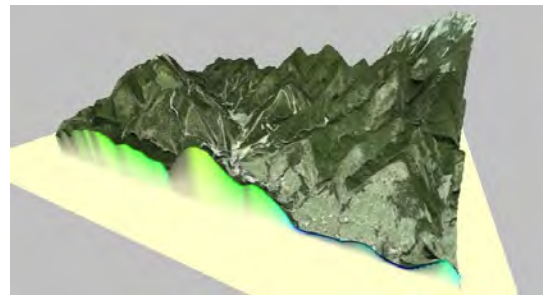
Существует множество различных ГИС пакетов, которые могут справиться с этой задачей. Одной из самых распространенных программ по обработке матриц высот является Global Mapper. С помощью этого ПО можно открыть файл hgt, наложить поверх слоя снимок, привязать его и построить 3D модель. Для того, чтобы обрезать необходимую нам территорию, надо определиться с координатами исследуемой области. В настоящее время получить подобную информацию можно на сайте GoogleMaps, и там же сразу возьмем космический снимок Буковеля.

Географические координаты обрезанного файла:  $L_{\min} = 24.350$ ,  $L_{\max} = 24.4629$ ,  $V_{\min} = 48.348$ ,  $V_{\max} = 24.395$ , где  $L$  – долгота,  $V$  – широта. Площадь территории составляет  $43.75 \text{ км}^2$ . Так как дальше придется программировать, необходимо перейти на какой-либо другой формат с hgt. Для наглядности возьмем формат AutoCad – dxf. Это текстовый формат, который выглядит как матрица точек. Он содержит информацию о каждой точке – расположение и высоту. С помощью языка программирования C++ прочитаем этот файл. Теперь остается самая главная задача – сделать из GRID сетки высот TIN модель.

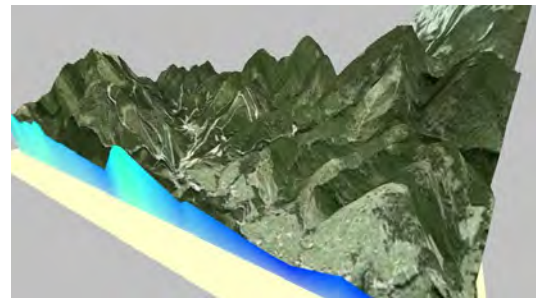
Существуют следующие алгоритмы выбора точек GRID: алгоритм Фаулера-Литтла, алгоритм VIP и алгоритм выбора точек триангуляции, основан на оптимизации существующего разбиения. Для решения данной задачи более подходит алгоритм Very Important Point (очень важная точка), он проверяет поверхность локально, используя окно  $3 \times 3$ . Ячейка в растровой модели рельефа имеет восемь соседей, образующих четыре тройки. Для каждой тройки ячеек по соответствующей вариограмме рассчитывается коэффициент вариации.

Коэффициент вариации находится с помощью построения линии между первой и третьей точкой, которая задана своим уравнением. По уравнению прямой в пространстве рассчитывается высота в средней точке по всем тройкам ячеек. Далее оценивается средняя вариация значения узла растровой GRID. Узлы с высокими показателями вариации включаются в результирующее разбиение, остальные отбрасываются. Для определения этих точек необходимо ввести пороговое значение. Чем больше пороговое значение, тем меньше узлов остается, но тем менее точна будет модель рельефа [7].

Таким образом, имеется две модели – исходная GRID модель и полученная TIN модель. Построим 3D модели местности и сравним точность описания рельефа, наложив на цифровые модели местности космический снимок для лучшей визуализации (рис. 2).



а – GRID модель



б – TIN модель

Рис. 2. Построение 3D моделей земной поверхности

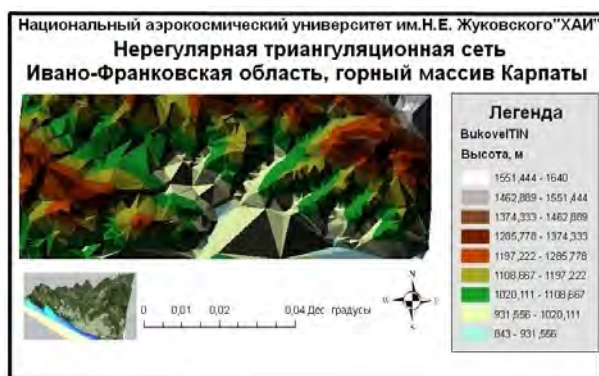
Для сравнения триангуляционной нерегулярной сети высот с GRID моделью было проведено статистическое исследование структуры пространственных данных, моделирование поверхностей при использовании модуля Geostatistical Analyst программного пакета ArcGIS 9.2. В целом, лучшая модель – это та модель, нормированная средняя ошибка которой близка к нулю, и которая характеризуется наименьшей среднеквадратичной ошибкой интерполяции, имеет значение средней стандартной ошибки, близкое к среднеквадратичной ошибке вычислений, и нормированную среднеквадратичную ошибку, близкую к единице. Данные оценки точности интерполяции представлены в табл. 1.

Таблица 1

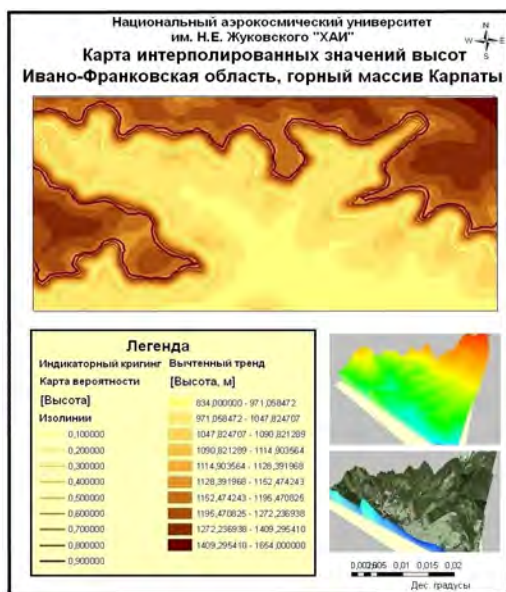
Оценка точности  
путем сравнения смоделированных ЦМР

Ошибки интерполяции	GRID модель	TIN модель
Средняя	0,01389	0,01383
Среднеквадратичная	4,213	5,119
Средняя станд. ошибка	26,37	24,92
Средняя нормированная	0,0005841	0,0001275
Среднекв. нормированная	0,1592	0,1978

Построена карта модели TIN и карта проинтерполированных значений высот GRID для Ивано-Франковской области, горнолыжного курорта Буковель (рис. 3).



а – модель TIN горного массива Карпат



б – значения высот модели GRID

Рис. 3. Построенные карты

## Выводы

Применение 3D моделирования в области геоинформационных систем обеспечивает большую наглядность и интерпретируемость данных, а также позволяет реализовать ряд прикладных задач недоступных для решения с использованием двумерных данных.

Разработана и программно реализована методика перехода от регулярной решетки высот к

нерегулярной триангуляционной сети. В качестве алгоритма выбора точек GRID применялся алгоритм Very Important Point.

Проведен анализ данных, применяя метод ординарного кригинга, смоделирована вариограмма, проведена перекрестная проверка, поиск соседства. После чего был создан слой интерполированных значений высот. Проведено исследование данных – построение гистограммы распределения значений.

Проведена оценка точности интерполяции путем сравнения моделей TIN и GRID, проинтерполированных методом ординарного кригинга. Средняя ошибка GRID модели больше и составляет – 26,37, а TIN модель – 24,92.

Таким образом, не ухудшая точность описания рельефа, была решена поставленная задача – сокращение объема данных и времени для обработки и построения 3D модели местности.

## Список литературы

1. Данные SRTM Eurasia / Shuttle radar topographic mission [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM3/Eurasia](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia). – 12.11.2011;
2. Карты Google / Google [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maps.google.com/> - 12.11.2011;
3. Мусин О.Р. Диаграмма Вороного и триангуляция Делоне / О.Р. Мусин. – М.: Заседания Санкт-Петербургского математического общества, 1999. – 10 с.
4. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение / А.В. Скворцов. – Томск: ТГУ, 2002. – 128 с.
5. Хромых В.В. Цифровые модели рельефа / В.В. Хромых, О.В. Хромых. – Т.: ТМ/І – Пресс, 2007. – 178 с.
6. Global Elevation Data Now Available in Esri Maps – ArcNews, Spring, 2007.
7. Zamirets O. Building triangulation irregular network model based on regular GRID data / Olga Zamirets // Science looks ahead. – 2012. – №11 – P. 12.
8. Zamirets O. Accuracy investigations of digital terrain models / Olga Zamirets // The Zhukovsky National Aerospace University Conference. – 2012.

Поступила в редколлегию 20.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.С. Бутенко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## МЕТОДИКА ПОБУДОВИ 3D МОДЕЛІ ТРИАНГУЛЯЦІЙНОЇ НЕРЕГУЛЯРНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ДАНИХ РЕГУЛЯРНОЇ РЕШІТКИ ВИСОТ

О.О. Замірець, С.М. Андреев

Розроблена методика побудови 3D моделі триангуляційної нерегулярної мережі (TIN) на основі даних регулярної решітки висот (GRID). Проведений геостатистичний аналіз просторових даних про висоти. Побудовані TIN і GRID 3D моделі місцевості. Проведена інтерполяція методом кригинга. Створена карта розподілу значень висот.

**Ключові слова:** моделі рельєфу, 3D моделювання, триангуляційна нерегулярна мережа.

## METHOD OF BUILDING 3D MODEL OF TRIANGULATION IRREGULAR NETWORK BASED ON REGULAR GRID DATA OF HEIGHTS

O.O. Zamirec, S.M. Andreev

The method of building 3D model of Triangulation Irregular Network (TIN) based on regular grid data of heights (GRID) has been developed. Spatial data has been analyzed based on geostatistical analysis. TIN and GRID 3D models has been built. Classification of heights values map has been created.

**Keywords:** terrain models, 3D modeling, triangulation irregular network.