

УДК 528.8

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛИРОВАНИЯ ВЫСОТ ТОЧЕК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

А. И. Павлова

*Новосибирский государственный университет экономики и управления,
630099, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52
E-mail: annstab@mail.ru*

Рассмотрены методы интерполирования для создания цифровой модели рельефа с использованием геоинформационной системы. Для этой цели проанализированы наиболее известные методы: обратных взвешенных расстояний (IDW — Inverse Distance Weighting), кригинга (Krige), ANUDEM, сплайн-интерполяции (Spline), естественного соседства (Natural Neighbor), метод, основанный на построении TIN-модели (Triangulation Irregular Network). Выполнена оценка точности смоделированной поверхности рельефа на территории, расположенной между реками Уй, Тара, Иртыш Омской области Западной Сибири (Россия). Анализ результатов оценки точности цифровой модели рельефа, созданной с помощью геоинформационной системы ArcGIS 10, показал, что наилучшие результаты получены при использовании сплайн-методов и метода обратных взвешенных расстояний.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа (ЦМР), географические информационные системы (ГИС), морфометрический анализ рельефа, интерполяция, аппроксимация.

DOI: 10.15372/AUT20170210

Введение. Решение задачи агроэкологической группировки сельскохозяйственных земель связано с обработкой больших объёмов тематически ориентированной информации, со сложностью построения математической модели объекта исследования. Существующее многообразие факторов, которые необходимо учесть в ходе группировки земель, осложняет задачу исследований. В обособлении и формировании геокомплексов различного ранга ведущая роль принадлежит геоморфологической основе (рельефу). Рельеф рассматривается как один из основных и ведущих факторов, в значительной степени воздействующих на протекание различных природных процессов. Литолого-геоморфологические условия рельефа влияют на развитие ландшафтно-геофизических процессов, контролирующих распределение потоков вещества и энергии, развитие эрозионных процессов. Методы интерполяции находят всё более широкое применение при моделировании рельефа земной поверхности [1], имеют практическую ценность для прогнозного почвенного картографирования [2], картографирования и оценки эрозии почв [3, 4], геоморфологического районирования [5], оценки сельскохозяйственных земель в соответствии с агроэкологическими требованиями культур [6], в геоморфометрии [7, 8].

Цель данной работы — анализ методов интерполирования высот точек для цифрового моделирования рельефа.

Исследования выполнены на примере Омской области, расположенной на юге Западно-Сибирской равнины. Основным источником информации служили топографические карты двух масштабов 1 : 100000 и 1 : 50000. Это позволило создать цифровую модель рельефа (ЦМР) в векторном формате пространственных данных геоинформационной системы (ГИС) ArcGIS 10, содержащую сведения о высотах земной поверхности (над уровнем Балтийского моря), об урезах водных объектов, основных и дополнительных горизонталях, других объектах рельефа. На рис. 1 приведён фрагмент цифровой модели рельефа.

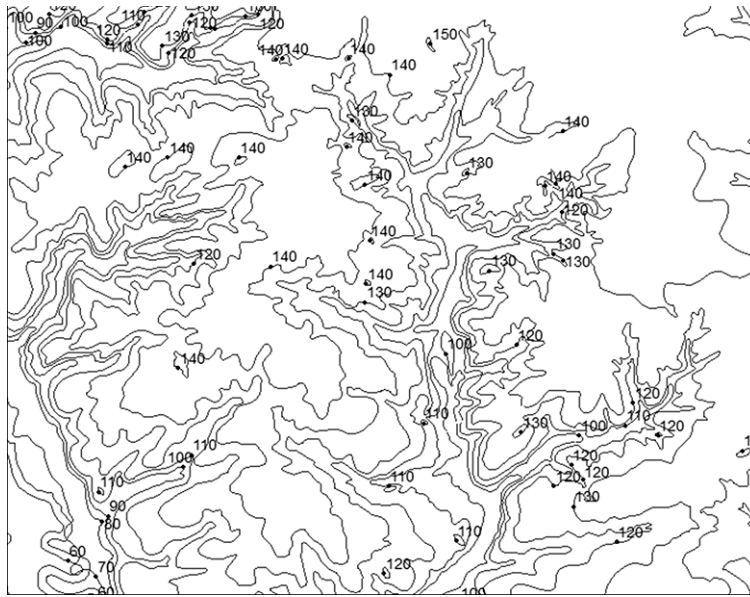


Рис. 1. Цифровая модель рельефа территории Омской области (точки — отметки высот земной поверхности (м), извилистые линии — горизонтали)

Надёжность топографических карт обеспечивается тем, что изображение в виде горизонталей отличается наглядностью восприятия и возможностью описания морфографических и морфометрических характеристик рельефа. Выбранные масштабы карт способствуют отображению плоскоравнинных открытых и покрытых древесной растительностью, а также холмистых территорий в ходе региональных исследований [5]. Топографические карты остаются основным источником данных для реализации методов цифрового моделирования рельефа.

Методы исследований. Опорные точки для цифрового моделирования рельефа могут располагаться в виде нерегулярной или регулярной сети в узлах квадратной, прямоугольной или гексагональной сетки либо в виде полилинейных объектов. Для создания непрерывной модели поверхности распределения признака в виде раstra опорная точка s_i описывается в базе данных ГИС плановыми и высотными координатами. Плановые координаты (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, N$, N — количество опорных точек) опорной точки задаются в виде геометрических примитивов (объектов типа точка) в области определения ЦМР. Высотные координаты точки (аппликаты) могут быть установлены путём векторизации картографического материала или экспорта результатов наземных или дистанционных измерений. В целом задача моделирования исходной поверхности из конечного множества дискретных точек в непрерывную поверхность состоит в выборе способа восстановления показателя z_i в точке s_0 с неизвестной высотой:

$$Z(s_0) = f(x_1, \dots, N, y_1, \dots, N), \quad (1)$$

где $Z(s_0)$ — ожидаемое значение для некоторого неизвестного положения точки s_0 ; f — интерполяционная функция.

Современные ГИС имеют разнообразные функции пространственного анализа данных, связанные с обработкой атрибутивной и геометрической информации на картах. Наиболее часто используемыми являются методы пространственного анализа, основанные на моделировании поверхности в точках измерений. Профессиональные ГИС позволяют аппроксимировать поверхность, применяя широко известные методы: обратных взвешенных расстояний (IDW — Inverse Distance Weighting), преобразования нерегулярной

сети (TIN — Triangulation Irregular Network), метод кригинга (Kriging), ANUDEM, сплайн-интерполяции (Spline), метод естественного соседства (NN — Natural Neighbor). Все методы интерполирования по способу создания моделируемой поверхности можно разделить на методы глобальной и локальной интерполяции, а также детерминированные и геостатистические [9].

Метод обратных взвешенных расстояний наиболее простой. Суть метода состоит в вычислении высоты точки путём усреднения значений аппликат точек, расположенных в некоторой окрестности. Процесс усреднения происходит с учётом весовых коэффициентов, при этом определяется некоторая обратная функция расстояния от опорной точки до центра ячейки раstra [10]:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n w_i z(s_i) = \sum_{i=1}^n z(s_i) d_{io}^{-p} / \sum_{i=1}^n 1/d_{io}^{-p}, \quad (2)$$

где w_i — вес опорной точки; $z(s_i)$ — известное значение высоты опорной точки; p — показатель степени при определении веса опорной точки (наиболее часто $p = 2$) [10]; n — количество опорных точек, расположенных в ближайшем соседстве с s_0 ; d_{io} — расстояние между точками с известным и неизвестным значениями высоты.

Метод относится к жёсткому интерполированию, так как для его применения требуется задание значения показателя степени. В результате работы алгоритма точки, расположенные ближе к оцениваемым, оказывают большее влияние на значение высоты по сравнению с наиболее удалёнными точками.

Метод кригинга по существу является локальным геостатистическим интерполятором, служит мощным инструментом для моделирования различных явлений. Общее уравнение для метода кригинга записывается в виде [11, 12]

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n w_i z(s_i). \quad (3)$$

Этот метод в отличие от детерминированных создаёт вероятностную модель, рассматривая пространственную переменную $z(s_i)$ в виде случайной функции, что позволяет построить модель с учётом корреляции данных и выполнять оценку точности поверхности для прогнозирования.

Интерполяция сплайн-методом. Построение поверхности путём интерполирования состоит в приближённом вычислении значения аппликаты в некоторой точке посредством полиномов. Для этого часто используется регуляризованный сплайн, общее уравнение которого записывается в виде

$$Z(s_0) = T_k(x_1, \dots, N, y_1, \dots, N) + \sum_{i=1}^n \lambda_i R(d_{io}). \quad (4)$$

Здесь $T_k(x_1, \dots, N, y_1, \dots, N)$ — полином степени k ; λ_i — коэффициент для i -опорной точки; $R(d_{io})$ — функция, аргументом которой является расстояние d_{io} .

На общее условие интерполяции (1) накладываются дополнительные требования точности интерполирования. Это приводит к решению системы уравнений

$$R(d_{io}) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{d_{io}^2}{4} \left[\ln \left(\frac{d_{io}}{2\tau} \right) + c - 1 \right] + \tau^2 \left[k_0 \frac{d_{io}}{\tau} + c + \ln \left(\frac{d_{io}}{2\tau} \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где k_0 — моделирующая функция Бесселя; $c \approx 0,577215$ — константа Эйлера; $\pi \approx 3,14$; τ — параметр регуляризации сплайна.

Метод позволяет моделировать поверхность, проходящую точно через опорные точки, и минимизировать функционал при применении суммы квадратов вторых и третьих производных функции. Для этого используется параметр регуляризации, который отвечает за значение весовых коэффициентов третьих производных [13].

Метод ANUDEM предложен в [14] и относится к локальному адаптивному интерполятору. Особенность метода заключается в интерполировании по опорным точкам поверхности, которая наиболее точно описывает особенности стока, дренажной сети на территории водосборного бассейна. Метод позволяет создавать ЦМР путём связанной сети водотоков на основе горизонталей рельефа. В ходе интерполирования на каждой итерации алгоритма отыскиваются пониженные участки рельефа на водоразделах, седловинах, лощинах и привязываются к линиям поверхностного стока. Метод основан на вычислении значений интерполируемой функции через выражение [14]

$$Z(s_0) = f(x_1, \dots, N, y_1, \dots, N) + \varepsilon_i, \quad (6)$$

где ε_i — средняя ошибка стандартного отклонения для w_{si} .

Каждая опорная точка располагается, как правило, случайным образом, и стандартное отклонение для каждой ячейки растровой модели вычисляется по формуле

$$w_{si} = h\nu_i/\sqrt{12}, \quad (7)$$

где h — размер ячейки; ν_i — локальный угол наклона в ячейке.

Метод TIN. При построении ЦМР используется совокупность высотных отметок в узлах нерегулярной сети треугольников. Сеть треугольников соответствует триангуляции Делоне, создаваемой на множестве дискретно расположенных точек, которые соединяются между собой непересекающимися отрезками прямых линий. При этом описанная вокруг каждого треугольника окружность не содержит внутри себя опорные точки исходного множества. Метод относится к локальному, точному и детерминистическому интерполятору [15].

Метод NN. Согласно методу оценка аппликаты опорной точки в некоторой области исследования определяется как среднее взвешенное значение этой переменной в ближайших опорных точках [1, 15].

Результаты исследований. Построение поверхности выполнено с помощью профессиональной полнофункциональной ГИС ArcGIS 10 и специализированных модулей Spatial Analyst, 3D Analyst. Объектом исследований служила территория водосборного бассейна площадью 8742 км², расположенного между реками Иртыш, Тара и Уй Омской области. Территория исследований охватывает Седельниковский административный район, часть Тарского и Муромцевского районов (географические координаты квадрата: левый нижний угол 56°23' с. ш., 74°06' в. д. и правый верхний угол 57°04' с. ш., 76°18' в. д.).

Для изучаемой территории созданы ЦМР различными методами: регуляризованный сплайн (SP_REG), сплайн Тенсона (SP_TEN), кригинг универсальный с линейной моделью вариограммы (KR_UNIV), ординарный кригинг с гауссовой функцией (KR_GAUSS), ординарный кригинг с экспоненциальной функцией (KR_EXP), ординарный кригинг со сферической моделью вариограммы (KR_OR), ординарный кригинг с линейной моделью вариограммы (KR_LIN), метод естественного соседства (NN), ANUDEM, TIN и обратных взвешенных расстояний (IDW). На рис. 2 приведены результаты моделирования рельефа, полученные в ходе исследований. В качестве опорных точек служили высоты земной поверхности, в том числе урезом водных поверхностей и искусственных покрытий.

Пространственное разрешение для ЦМР было задано равным 100 м. Статистические характеристики ЦМР, полученные различными методами интерполирования, приведены в табл. 1. При этом минимальные и максимальные значения высот точек ЦМР существенно

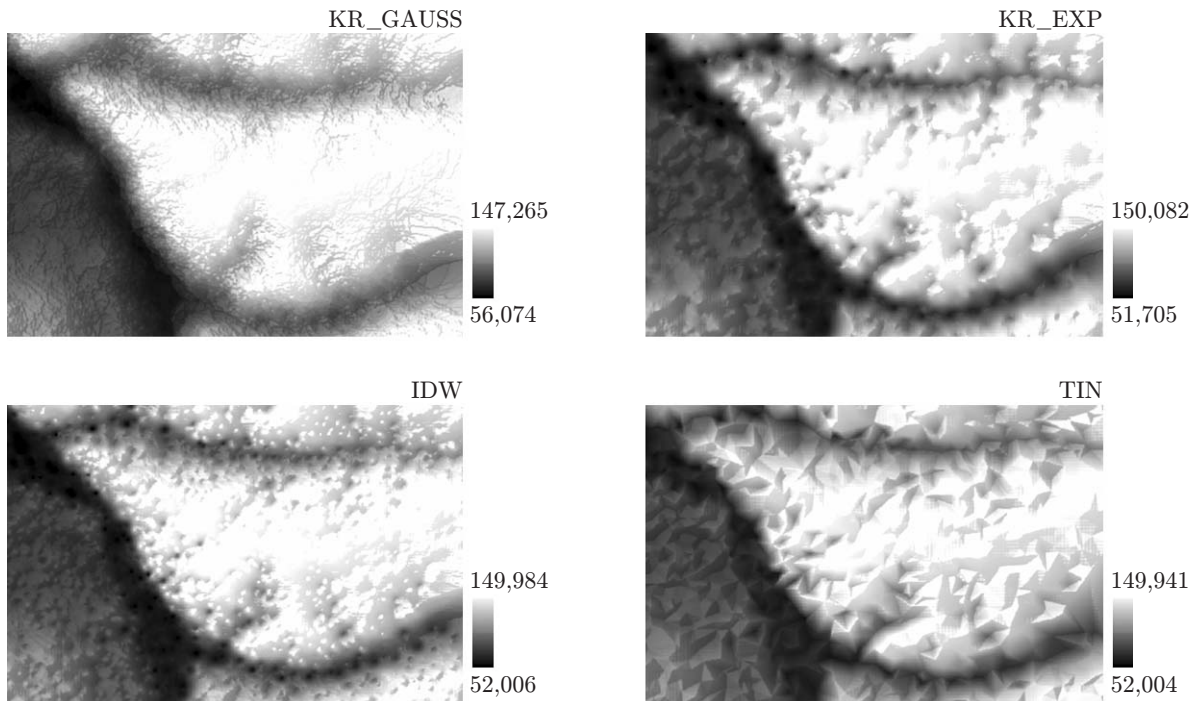


Рис. 2. Результаты моделирования рельефа, полученные различными методами

отличаются для моделей, созданных методами SP_REG и TIN. Наибольшие отклонения высоты от среднего значения и среднего стандартного отклонения получены для регуляризованного сплайна и составили $-0,78 \pm 2,276$ м. Для TIN-модели, преобразованной в растр, наблюдаются также наиболее высокие отклонения ($-0,47 \pm 0,621$ м). Наименьшими отличиями от среднего и стандартного отклонений ($0,06 \pm 0,197$) обладает модель, созданная методом ANUDEM.

Для детальной оценки результатов интерполирования на изучаемой территории выбраны участки с различными условиями рельефа: водоразделы, склоны, поймы рек. Водораздельные равнины занимают значительную часть территории — 7255 км^2 , что составляет примерно 83 %.

Плоские и слабонаклонные поверхности имеют углы наклона рельефа менее 1° и сильно изрезаны гидрографической сетью рек. Это пространство занято болотными торфяными низинными и верховыми почвами. Склоны распространены на 1136 км^2 (примерно 13 %) территории, приречные увалы вдоль рек имеют различную крутизну склонов. На приречных склонах распространены преимущественно подзолистые и дерново-подзолистые почвы. Наиболее пониженные участки рельефа относятся к поймам рек и речным долинам.

Оценка точности результатов моделирования производилась путём вычисления средней ошибки (ME — Mean Error), средней абсолютной ошибки (MAE — Mean Absolute Error) и средней квадратической ошибки (RMSE — Root Mean Square Error) в опорных точках, выбранных случайным образом [16]. В табл. 2 приведены результаты оценки точности для равнинных участков. Наименьшие ошибки ME и MAE (менее 0,2 м) получены для ЦМР, созданных сплайн-методами (регуляризованным и Tenson), а также методом обратных взвешенных расстояний. Для данных методов характерно следующее: стандартные отклонения абсолютной ошибки и RMSE составили менее 0,03 м. Методы ординарного кригинга с экспоненциальной моделью вариограммы, ANUDEM и NN характеризуются меньшей точностью: ошибка MAE составила от 0,08 до 0,102 м, а стандартное отклоне-

Таблица 1

Общие сведения о цифровых моделях рельефа

Метод	Количество ячеек растра	Значения высоты, м			Стандартное отклонение, м
		Мини- мальное	Макси- мальное	Среднее	
SP_REG	3088254	-9,398	199,217	102,360	24,239
SP_TEN	3088254	38,182	155,312	103,313	22,551
KR_UNIV	3088254	54,826	173,591	102,755	20,912
KR_GAUSS	3088254	56,074	147,265	103,473	20,926
KR_EXP	3088254	51,705	150,082	103,573	21,998
KR_LIN	3088254	55,982	147,319	103,524	21,020
KR_OR	3088254	55,893	147,353	103,536	21,103
TIN	8649	52,004	149,941	102,665	22,584
IDW	3088254	52,006	149,984	103,541	21,676
NN	2803571	52,019	149,818	102,655	22,450
ANUDEM	3088254	50,370	151,608	103,199	22,160
Средние значения		46,333	156,499	103,145	21,965

Таблица 2

**Результаты оценки точности ЦМР для равнинных участков,
полученные различными методами (количество опорных точек для оценки 435)**

Метод	Ошибки ($Z_i - Z_0$)				Абсолютные ошибки				RMSE
	Мини- мальная	Макси- мальная	Сред- нее зна- чение	Стан- дартное откло- нение	Мини- мальная	Макси- мальная	Сред- нее зна- чение	Стан- дартное откло- нение	
TIN	-10,877	14,320	-0,372	2,470	0,0006	14,32	1,483	2,009	2,47
KR_OR	-15,171	21,884	-1,224	4,022	0,012	21,884	2,870	3,072	4,20
KR_LIN	-15,377	22,976	-1,420	4,406	0,007	22,976	3,192	3,353	4,63
KR_EXP	-0,862	1,085	-0,022	0,179	0,00003	1,085	0,102	0,149	0,18
KR_GAUSS	-17,77	24,106	-1,674	4,907	0,0038	24,106	3,609	3,723	5,19
KR_UNIV	-17,708	24,802	-1,617	4,796	0,018	24,802	3,491	3,665	5,06
NN	-0,998	1,108	-0,034	0,213	0,000027	1,108	0,124	0,175	0,21
SP_REG	-0,11	0,132	-0,001	0,020	0,000015	0,132	0,010	0,017	0,02
SP_TEN	-0,105	0,050	-0,0008	0,010	0	0,105	0,005	0,009	0,01
IDW	-0,203	0,203	-0,005	0,027	0	0,203	0,015	0,023	0,03
ANUDEM	-3,586	2,007	-0,018	0,281	0,000015	3,587	0,089	0,267	0,28

Таблица 3

**Результаты оценки точности ЦМР для склонов,
полученные различными методами (количество опорных точек для оценки 1077)**

Метод	Ошибки ($Z_i - Z_0$)				Абсолютные ошибки				RMSE
	Минимальная	Максимальная	Среднее значение	Стандартное отклонение	Минимальная	Максимальная	Среднее значение	Стандартное отклонение	
TIN	-22,538	23,452	-0,176	4,411	0,0042	23,452	2,738	3,463	4,39
KR_OR	-27,822	36,341	-0,519	7,633	0,012	36,341	5,253	5,603	7,68
KR_LIN	-30,224	39,426	-0,612	8,477	0,012	39,426	5,844	6,171	8,50
KR_EXP	-1,485	1,553	-0,006	0,302	0,00005	1,553	0,184	0,239	0,30
KR_GAUSS	-35,437	42,987	-0,744	9,543	0,012	42,987	6,624	6,909	9,57
KR_UNIV	-30,942	43,013	-0,680	9,112	0,0024	43,014	6,309	6,609	9,14
NN	-3,698	3,387	-0,010	0,384	0,00044	3,698	0,224	0,311	0,38
SP_REG	-0,105	0,095	-0,0003	0,014	0	0,105	0,008	0,012	0,01
SP_TEN	-0,212	0,178	-0,0002	0,031	0,000008	0,212	0,018	0,025	0,03
IDW	-0,242	0,345	-0,001	0,042	0,000008	0,345	0,025	0,034	0,04
ANUDEM	-7,103	5,902	0,061	0,606	0,000015	7,103	0,207	0,567	0,60

Таблица 4

**Результаты оценки точности ЦМР для участков пойм рек,
полученные различными методами (количество опорных точек для оценки 685)**

Метод	Ошибки ($Z_i - Z_0$)				Абсолютные ошибки				RMSE
	Минимальная	Максимальная	Среднее значение	Стандартное отклонение	Минимальная	Максимальная	Среднее значение	Стандартное отклонение	
TIN	-22,538	37,246	0,369	3,785	0,015	37,245	2,298	3,031	5,50
KR_OR	-27,748	32,385	0,862	6,363	0,0026	32,385	4,406	4,670	9,63
KR_LIN	-31,227	34,129	0,980	7,118	0,007	34,129	4,939	5,217	10,66
KR_EXP	-1,659	3,176	0,020	0,267	0,00008	3,176	0,151	0,221	0,27
KR_GAUSS	-35,461	36,632	1,132	8,131	0,00069	36,632	5,636	5,970	8,21
KR_UNIV	-28,865	34,876	1,332	7,802	0,023	34,876	5,150	5,678	7,92
NN	-3,238	6,904	0,036	0,412	0,00015	6,904	0,186	0,369	0,41
SP_REG	-0,064	0,104	0,008	0,012	0,000008	0,104	0,007	0,012	0,01
SP_TEN	-0,176	0,399	0,002	0,003	0,000004	0,398	0,015	0,025	0,03
IDW	-0,296	0,827	0,004	0,05	0,000015	0,8266	0,023	0,044	0,05
ANUDEM	-6,270	10,992	-0,015	0,576	0,0024	10,992	0,141	0,559	0,58

ние абсолютной ошибки — от 0,149 до 0,276 м. В целом величина средней квадратической ошибки данных методов не превышает 0,30 м. Другие методы — ординарного кригинга, универсального кригинга, нерегулярной сети треугольников (TIN) — обладают наибольшими ошибками ME, MAE и RMSE. Значение RMSE этих методов может достигать более 5 м.

При оценке точности ЦМР для склоновых земель величины стандартных отклонений ошибок в сравнении с равнинными участками возрастают (табл. 3). Сплайн-методы и метод IDW позволили смоделировать ЦМР с наименьшими ошибками. Значения ME и MAE и стандартных отклонений незначительные (менее 0,03 м), величины RMSE не превышают 0,04 м. Для методов KR_EXP, NN, ANUDEM характерна меньшая точность построения ЦМР, ошибки RMSE составили от 0,30 до 0,60 м. Наименее точными оказались методы TIN, KR_OR, KR_LIN, KR_GAUSS, KR_UNIV, так как значение RMSE составляет от 4 до 9 м и более.

При моделировании ЦМР для участков пойм рек наименьшие ошибки вычислены для сплайн-методов и метода обратных взвешенных расстояний с RMSE от 0,01 до 0,05 м (табл. 4). Наибольшие ошибки MAE и RMSE получены для методов TIN, KR_OR, KR_LIN, KR_GAUSS, KR_UNIV. Метод создания ЦМР на основе нерегулярной сети треугольников TIN-модели из-за локальной природы не изменяет глобальные характеристики набора данных. Этот метод является методом негладкой интерполяции, поскольку на границах полигонов возникают скачки функции.

Заключение. Результаты оценки точности показали, что сплайн-методы (регуляризованный и Tenson) и IDW позволяют создавать ЦМР с наименьшими ошибками для различных условий рельефа: равнинных и склоновых участков, а также пойм рек. Поверхность, рассчитанная с помощью IDW, сильно зависит от выбора окрестности точки. Поэтому в исследованиях для метода IDW был задан переменный радиус поиска, коэффициент степени принят равным 2. Метод кригинга проявил себя гибким и быстрым, однако выбор модели вариограммы существенно влияет на результаты построения ЦМР. Для различных условий рельефа метод кригинга с экспоненциальной моделью вариограммы оказался наиболее точным в сравнении с другими методами кригинга. В целом методы кригинга с экспоненциальной моделью вариограммы, ближайшего соседства и ANUDEM позволяют создавать ЦМР, близкие по точностным показателям. Метод ANUDEM отличается возможностью быстро обрабатывать различные типы данных в виде точек, линий и корректно отображать поверхность с плавно изменяющимися по высоте участками и участками с резким перепадом высот. Метод на основе TIN-модели быстрый и может рассматриваться как начальный этап создания ЦМР. Для повышения точности необходимы дополнительные сведения о высотах объектов природного и искусственного характера.

Таким образом, использование метода интерполяции зависит от задач исследований, от ожидаемых результатов оценки точности. В случае необходимости создания наиболее точных моделей ЦМР территории Омской области подходят методы SP_REG, SP_TEN, IDW, а для построения гидрологически корректной модели лучше применять метод ANUDEM.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ayeni B., Samuel K. J.** An evaluation of digital elevation modeling in GIS and cartography // *Geo-spatial Inform. Sci.* 2014. **17**, Is. 2. P. 139–144.
2. **McBratney A. B., Mendonça Santos M. L., Minasny B.** On digital soil mapping // *Geoderma.* 2003. **117**, Is. 1–2. P. 3–52.
3. **Zhang J. X., Chang K.-T., Wu J. Q.** Effects of DEM resolution and source on soil erosion modelling: A case study using the WEPP model // *Intern. Journ. Geograph. Inform. Sci.* 2008. **22**, Is. 8. P. 925–942.

4. **Павлова А. И.** Применение методов цифрового моделирования рельефа для картографирования эрозионных земель // В мире научных открытий. 2016. № 2(74). С. 159–169.
5. **Павлова А. И., Каличкин В. К.** Использование материалов космической съемки и ГИС для геоморфологического районирования территории // Сиб. вестн. сельскохоз. науки. 2009. № 11. С. 5–14.
6. **Каличкин В. К., Павлова А. И.** Технология автоматизированной оценки земель сельскохозяйственного назначения для кадастровых целей // Сиб. вестн. сельскохоз. науки. 2008. № 4. С. 5–11.
7. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications** /Eds. T. Hengl, H. I. Reuter. Ser.: Developments in Soil Science. Vol. 33. Elsevier, 2009. Ch. 1: Geomorphometry: A brief guide /R. J. Pike, I. S. Evans, T. Hengl. 2008. P. 3–30.
8. **Studies on Environmental and Applied Geomorphology** /Eds. T. Piacentini, E. Miccadei. In tech, 2012. 294 p. Ch. 3: Geomorphological instability triggered by heavy rainfall: Examples in the Abruzzi region (Central Italy) /E. Miccadei, T. Piacentini, F. Daverio, R. Di Michele.
9. **Сравнение методов интерполяции.** Официальный сайт ESRI. 2016. URL: http://downloads2.esri.com/support/documentation/ao_/Using_ArcGIS_Spatial_Analyst.pdf (дата обращения: 08.02.2017).
10. **Как работает инструмент** обратных взвешенных расстояний. Официальный сайт ESRI. 2016. URL: <http://pro.arcgis.com/ru/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm> (дата обращения 16.02.2017).
11. **Chilés J. P., Delfiner P.** Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. N. Y.: Wiley, 2012. 734 p.
12. **Zimmerman D., Pavlik C., Ruggles A., Armstrong M. P.** An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting // Math. Geology. 1999. **31**, Is. 4. P. 375–390.
13. **Hofierka J., Parajka J., Mitasova H., Mitas L.** Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension // Trans. in GIS. 2002. **6**, Is. 2. P. 135–150.
14. **Terrain Analysis: Principles and Applications** /Eds. J. P. Wilson, J. C. Gallant. N. Y.: John Wiley & Sons, 2000. 520 p. Ch. 2: Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape /M. F. Hutchinson, J. C. Gallant. P. 29–50.
15. **Tan Q., Xu X.** Comparative analysis of spatial interpolation methods: An experimental study // Sensors & Transducers Journ. 2014. **165**, Is. 2. P. 155–163.
16. **Progress in Spatial Data Handling** /Eds. A. Riedl, W. Kainz, G. A. Elmes. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 942 p. An evaluation of spatial interpolation accuracy of elevation data /Q. Weng. P. 805–824.

Поступила в редакцию 21 июня 2016 г.