

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА ПРИМЕРЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НИЖНЯЯ КАМА»

С.С. Рязанов¹, В.И. Кулагина²

^{1,2} *Институт проблем экологии и недропользования АН РТ (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан»), лаборатория экологии почв*

¹ *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: RStanislav.soil@gmail.com*

² *Заведующий лабораторией, канд. биол. наук; e-mail: viksoil@mail.ru*

Проведено сравнение методов интерполяции топографических данных для создания гидрологически корректной цифровой модели рельефа на примере залесенных территорий национального парка «Нижняя Кама», Республика Татарстан, Россия. Для работы использованы доступные топографические карты территории парка в масштабе 1 : 100 000. Методы интерполяции – метод обратного взвешенных расстояний с различными параметрами степени p (IDW1, IDW2, IDW3, IDW4), ординарный кригинг с моделями вариограммы Матерна (OKMat) и сферической (OKSph), метод иерархических базисных сплайнов (MBS), метод сплайнов типа тонкой пластины (TPS) – оценивались по показателю вертикальной точности и по гидрологической точности. Гидрологическая точность вычислялась на основе расстояния сети каналов, выделенных на основе интерполированных моделей рельефа, от их реального расположения на местности. Результаты оценки на основе узлов изолиний и характерных точек местности показали, что метод обратного взвешенных расстояний характеризуется наибольшей погрешностью при создании цифровой модели высот. Геостатистические и сплайновые методы обладают схожей точностью. По точности выделения сети каналов методы располагаются в порядке: IDW1 – IDW3 – MBS – IDW4 – IDW2 – OKSph – TPS – OKMat. В целом, можно заключить, что для задач, требующих гидрологически корректной модели рельефа, методы TPS и ординарный кригинг позволяют получить наиболее реалистичное отображение рельефа. В частности, метод ординарного кригинга с моделью вариограммы Матерна является наиболее корректным интерполятором из рассмотренных для обследованной территории НП «Нижняя Кама».

Ключевые слова: ГИС, DEM, DTM, DSM, интерполяция, кригинг, IDW, сплайны, топография

ВВЕДЕНИЕ

Данные о рельефе – необходимый источник информации для решения практических и научных задач. В настоящее время, благодаря высокой доступности и степени покрытия земной поверхности, наибольшее распространение и популярность получили данные дистанционного зондирования Земли [Elkhrachy, 2018]. Такие проекты, как SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) и ALOS World 3D (Advanced Land Observing Satellite) предоставляют открытый доступ к глобально согласованным цифровым картам высот с пространственным разрешением в 1" (примерно 30 м) [Tadono et al., 2014].

В общем определении цифровая модель высот DEM – это 3D-проекция земной поверхности [Alganci et al., 2018]. Все цифровые модели, в свою очередь, можно разделить на две группы: 1) цифровые модели рельефа (digital terrain model, DTM), свободные от деревьев, зданий и других объектов; 2) цифровые модели поверхности (digital surface model, DSM), которые описывают земную поверхность со всеми природными и искусственными объектами на ней [Alganci et al., 2018]. Все данные

дистанционного зондирования Земли, в том числе перечисленные выше, по определению являются моделями поверхности, DSM [Elkhrachy, 2018]. В то же время задачи геоморфологического моделирования, почвенного картографирования, экологического анализа, учитывающие абсолютное или относительное положение в рельефе, по понятным причинам должны проводиться на основе моделей рельефа DTM. Особые сложности в связи с этим вызывают задачи изучения залесенных территорий. Применение открытых моделей высот в этом случае требует предварительной коррекции смещения на высоту древесного покрова [Baugh et al., 2013].

Другим подходом является пространственная интерполяция данных наземных топографических исследований и существующих топографических карт [Ерицян, 2013; Soyacan, Soyacan, 2009]. Сложность в этом случае вызывает выбор наиболее корректного подхода.

В целом, все доступные техники пространственной интерполяции можно разделить на детерминированные (метод ближайших соседей (Nearest Neighbour), метод естественной окрестности

(Natural Neighbour), метод обратно взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighted), семейство сплайновых техник и пр.) и геостатистические методы (кригинг и его вариации). Существует также группа специализированных методов интерполяции, разработанных для получения гидрологически корректных цифровых моделей рельефа из точечных и / или контурных данных. В их число входят методы ANUDEM [Hutchinson et al., 2011], метод Х.Р. Руи с соавт. [2016] и пр. Широкое применение последних ограничивает коммерческая и проприетарная система распространения программных комплексов, в которых они реализованы.

Несмотря на большое количество работ, посвященных сравнению методов интерполяции топографических данных, выбор конкретной техники для отдельного исследования по-прежнему не является predetermined и зависит от структуры исходных данных, сложности рельефа, сценария применения и пр. [Alcaras et al., 2019; Arun, 2013; Pavlova, 2017]. Например, В. Ajvazi и К. Czimber [2019] показали, что метод обратно взвешенных расстояний применим при плотном и равномерном распределении точек обследования, кригинг – при наличии пространственной автокорреляции и анизотропии, метод естественной окрестности – при наличии линий разрывов на местности или нерегулярных форм данных, а сплайны – когда выборка данных не включает экстремумы интерполируемого явления. В том числе специализированные методы интерполяции цифровых моделей рельефа, такие как упомянутый ANUDEM, показывают высокую точность для равнинных территорий, но остаются неудовлетворительными для горной местности [Boreggio et al., 2018].

При общем интересе к получению максимальной вертикальной точности, значительно меньше работ посвящено влиянию выбранного метода интерполяции на вторичные производные цифровой модели высот. В. Szygula [2016] показал, что выбор метода интерполяции незначительно влияет на такие морфометрические параметры, как крутизна склонов, экспозиция и кривизна поверхности. Вместе с тем отмечается критическое влияние процессов предварительной обработки (сглаживание, удаление локальных понижений и т. п.) на извлечение гидрологических

параметров, включая суммарный сток, топографический индекс влажности, сеть водных каналов [Lauermann, 2016]. И они, в свою очередь, влияют на результаты исследований на основе геоморфологического анализа [Корецкú, Čížková, 2010]. С учетом известного влияния различных методов пространственной интерполяции на сглаженность итоговой поверхности, вопрос их воздействия на топографические и гидрологические производные остается мало изученным.

Цель данной работы заключается в сравнении различных методик интерполяции при построении цифровой модели рельефа на основе векторизованной топографической карты масштабом 1 : 100 000 для территории национального парка «Нижняя Кама».

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Область обследования. Парк располагается на северо-востоке Республики Татарстан в пределах физико-географических районов Восточное Предкамье и Восточное Закамье (рис. 1). Общая площадь составляет 26 460 га. На территории парка расположены как пойменные зоны, занятые луговой растительностью, так и водоразделы, покрытые лесными ценозами. Исследование проведено на основе двух лесных участков общей площадью 18 751 га.

Лесные участки национального парка характеризуются высокой степенью залесенности – 98,1%. Наибольшую площадь на данной территории зани-

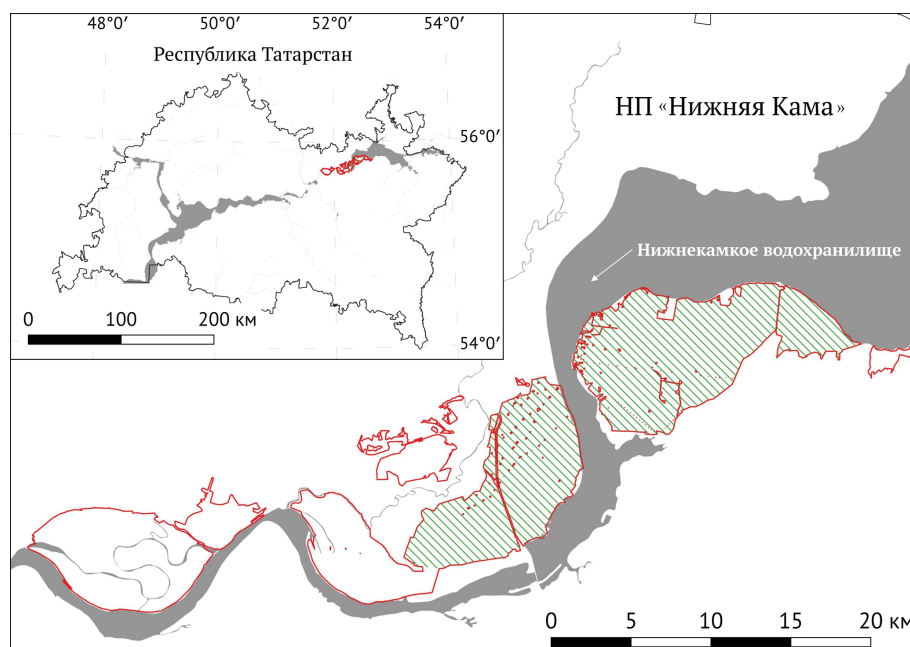


Рис. 1. Территория НП «Нижняя Кама». Штриховкой выделены лесные участки, использованные для оценки моделей рельефа

Fig. 1. Territory of the "Nizhnaya Kama" National Park. Hatching shows forest areas involved in the terrain models assessment

мают сосняки лишайниково-мшистые (42,3%), сосняки сложные (34,1%) и дубняки кленово-липовые (14,3%) [Гареев и др., 2009].

Рельеф изучаемых участков эрозионно-денудационный склоновый с абсолютными отметками 63–180 м. Для правобережья р. Камы характерны эоловые формы рельефа с параболическими и продольными дюнами, эоловыми буграми и котловинами выдувания. Левобережье р. Камы сложено элювиальными нерасчлененными четвертичными отложениями. Рельеф представлен невысокими поверхностями с незначительными врезами рек.

Подготовка топографических данных. Для оценки точности цифровых моделей рельефа были использованы доступные данные топографических карт территории национального парка в масштабе 1:100 000 (сост. ФГУП «Госгисцентр») (рис. 2А). Данные топосъемки были вручную векторизованы

и перепроецированы в прямоугольную систему координат UTM зона 39N для дальнейшей обработки. Итоговая топографическая основа представлена отдельными характерными точками местности (528 точек), а также векторным слоем горизонталей, который для проведения интерполяции конвертировался в точечный слой (всего 21 768 узлов).

Общая выборка данных делилась на тренировочный (90% всех точек) и тестовый (10% всех точек) наборы данных таким образом, чтобы в них сохранялось исходное соотношение узлов изолиний и характерных точек местности. Так, тренировочный набор данных, использованный в процессе интерполяции, состоял из 20 292 узлов изолиний и 503 характерных точек местности. Тестовый набор данных, использованный для оценки точности полученных цифровых моделей высот, состоял из 948 узлов изолиний и 25 характерных точек местности.

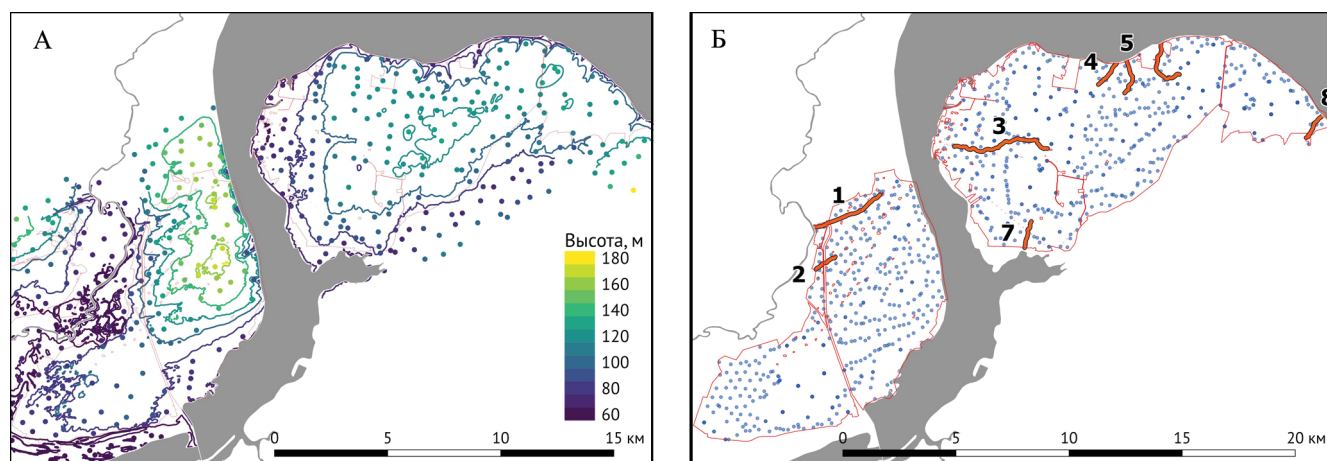


Рис. 2. Материалы обследования: А – топографические данные, использованные для интерполяции;

Б – расположение точек, использованных для оценки точности, и временные водотоки, обозначенные цифрами

Fig. 2. Survey materials: A – topographical data used for interpolation; Б – location of points used for accuracy assessment, and temporary streams (labeled by numbers)

Методы интерполяции. Основой интерполяции служил растр с пространственным разрешением 30 м, спроецированный в системе координат UTM зона 39N. Данное пространственное разрешение выбрано для соответствия другим наиболее распространенным источникам данных о рельефе, в частности SRTM и ALOS World 3D. В работе использовано четыре метода пространственной интерполяции, широко применяемых для такого рода задач [Ajvazi, Czimber, 2019].

Метод обратно взвешенных расстояний (*Inverse distance weighting, IDW*). Один из наиболее распространенных методов пространственной интерполяции данных. Основан на допущении, что схожесть значений пространственно распределенной переменной z уменьшается с увеличением расстояния

dp [Knotters et al., 2010]. Степень p – основной параметр, критически влияющий на сглаженность итогового результата интерполяции.

В работе использованы четыре варианта интерполяции методом IDW с различными значениями степени p : IDW1, IDW2, IDW3, IDW4. Дополнительно для всех вариантов IDW при расчете интерполированных поверхностей использованы параметры: максимальное количество точек на квадрант местности вокруг прогнозируемого значения равно 25, минимальное количество точек для расчета нового значения равно 100, максимальное расстояние для поиска ближайших точек составляет 7 км [Pebesma, 2003].

Ординарный кригинг (*Ordinary Kriging, OK*). Кригинг – семейство геостатистических методов

интерполяции. Данный метод нашел широкое применение в задачах цифрового почвенного картографирования [Li, Heap, 2003]. Ординарный кригинг проводит прогноз значений на основе локального взвешенного среднего окружающих точек. Веса вычисляются на основе модели вариограммы – функции зависимости схожести значений точек от расстояния. Подробное введение в теорию геостатистики дано в [Webster, Oliver, 2007; Goovaerts, 1997].

В работе оценено два варианта ординарного кригинга: OKSph – с использованием сферической модели вариограммы и OKMat – с использованием модели вариограммы Матерна. Параметры, определяющие количество точек, использующихся для прогноза, были идентичны таковым для метода IDW.

Метод иерархических базисных сплайнов (*Multilevel B-Splines, MBS*). Данный алгоритм разработан для получения сглаженной поверхности путем интерполяции рассеянных или неравномерно распределенных точечных данных. Алгоритм основан на применении аппроксимации на основе В-сплайнов для контрольных сеток с последовательно увеличивающимся разрешением. Так, первая итерация алгоритма использует наиболее грубую контрольную сетку Φ_0 для получения исходной сглаженной аппроксимации f_0 , которая, как правило, характеризуется большими расхождениями (остатками) с интерполируемыми точками данных $\Delta^1 z = z - f_0(x, y)$. Следующая итерация алгоритма использует увеличенное разрешение контрольной сетки Φ_1 для получения функции f_1 , аппроксимирующей остаток Δz . Сумма $f_0 + f_1$ позволяет уменьшить расхождение $\Delta^2 z = z - f_0(x, y) - f_1(x, y)$ для каждой точки исходного набора данных с координатами x, y . Данная операция инкрементно повторяется с увеличением разрешения контрольной сетки. Стоит отметить, что только самая первая грубая сеть Φ_0 применяется к исходным данным для получения глобальной формы функции f . Все последующие более мелкие сетки используются для уменьшения остатков аппроксимации. Подробное описание алгоритма доступно в работе [Lee et al., 1997].

С практической точки зрения, контролируя основную параметр ('Maximum level' в программе SAGA GIS), можно задавать степень сглаженности итоговой интерполированной поверхности. Чем больше параметр, тем меньше расхождение с точечными данными. Также стоит отметить высокую оптимизацию данного метода – на больших наборах данных метод MBS значительно выигрывает в скорости у других примененных в данной работе методов интерполяции.

Для построения ЦМР применялся уровень 'Maximum level' = 14.

Метод сплайнов типа тонкой пластины (*Thin plate spline, TPS*). Алгоритм также применяется для сглаженной интерполяции рассеянных значений на основе принципа минимальной энергии [Keller, Borkowski, 2019]. Функция TPS минимизирует кривизну поверхности, вводя штрафы в направлении, ортогональном основной плоскости. Параметр регуляризации контролирует требование итоговой поверхности проходить через все исходные точки, тем самым определяет сглаженность и локальные ошибки интерполяции. При значении параметра регуляризации равного 0, интерполяционная поверхность максимально точно проходит через исходные точки, повторяя поверхность, подогнанную методом наименьших квадратов [Donato, Belongie, 2002].

Оценка высотной точности. Точность интерполяции топографических данных оценивалась на основе тестового набора данных, состоящего из 948 узлов изолиний и 25 характерных точек местности, отобранных из исходного набора топографических данных стратифицированным случайным образом. Расположение точек тестирования представлено на рисунке 2Б.

Для тестовых точек вычислялись следующие показатели: средняя разница (ME), коэффициент корреляции по Пирсону между известными и интерполированными значениями, среднеквадратичная ошибка (RMSE) и отношение дисперсий тестовых и прогнозных значений (RVar) [Elkhrachy, 2018]. Расчет RMSE проводился согласно формуле:

$$RMSE = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{ri} - v_{mi})^2}, \quad (1)$$

где v_{ri} – известная высота в точке i ; v_{mi} – высота по интерполированной цифровой модели рельефа в точке i ; n – количество контрольных точек.

Оценка гидрологической корректности. Для оценки точности интерполированных моделей рельефа с гидрологической точки зрения было проведено сравнение расположения водных каналов, выделенных в процессе гидрологического анализа, с их реальным положением на местности.

Поскольку на обследуемой территории нет постоянных рек, гидрологическая точность оценена на основе временных водотоков. Их реальное расположение обозначено вручную на основе топографической карты местности, а также спутниковых снимков высокого пространственного разрешения. Всего выделено восемь временных водотоков различной длины (см. рис. 2Б).

Выделение водных каналов на основе интерполированных моделей рельефа проведено согласно общему алгоритму: 1) заполнение локальных понижений с применением метода L. Wang и H. Liu [2006]; 2) расчет водосборной площади популярным

методом D_{∞} , который определяет направление потока в одном или двух направлениях в зависимости от крутизны склона [Korecký, Čížková, 2010]; 3) извлечение сети потенциальных водотоков; 4) выделение потоков для анализа. Все выделенные потоки (см. рис. 2Б) относятся к 1-му и 2-му порядкам согласно схеме нумерации водотоков по А. Стралеру [Tarbodon et al., 1991].

Для расчета расстояния между водотоками был адаптирован метод, предложенный в [Lauerman et al., 2016]: 1) внутри общей описывающей области двух водотоков создавалось 100 равномерно распределенных векторных линий, направление линий выбиралось перпендикулярным основным направлениям водотоков; 2) затем извлекались отрезки, ограниченные с двух сторон сравниваемыми водотоками; 3) в качестве меры схожести водотоков вычислялась средняя длина отрезков между водотоками (синие пунктирные линии на рис. 3). Стоит отметить, что в качестве меры сравнения не учитывалась длина водотоков, поскольку данный параметр сильно зависит от значения суммарного стока при извлечении сети каналов.

Использованное ПО. Для проведения гидрологического анализа и интерполяции методами MBS и TPS использовались реализации соответствующих алгоритмов в ГИС SAGA [Conrad et al., 2015]. Интерполяция методами IDW и ОК проведена при помощи пакета gstat для статистической среды R [R Core Team, 2020; Pebesma, 2004]. Векторизация топографических данных и итоговое оформление картографических материалов проведено при помощи геоинформационной системы QGIS [QGIS Association, 2021].

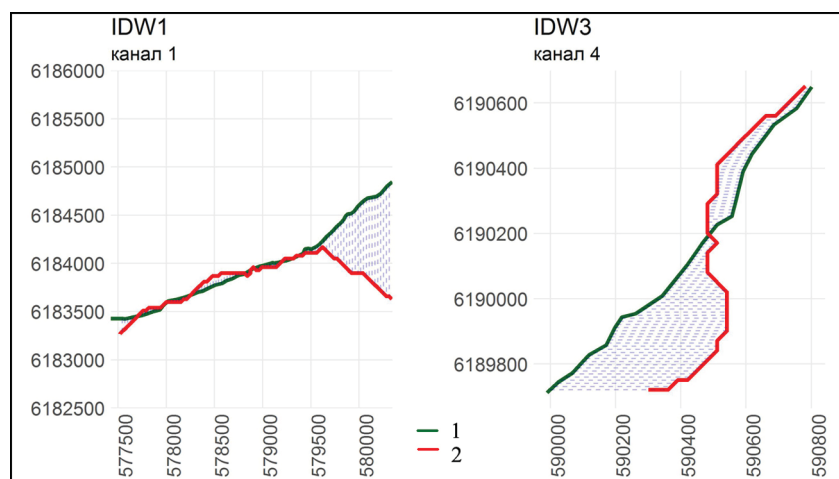


Рис. 3. Примеры расчета расстояния между расположением реальных (1) и прогнозных (2) временных водотоков

Fig. 3. Examples of calculating distances between the location of actual (1) and predicted (2) temporary streams

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты интерполяции и вертикальная точность. В результате пространственной интерполяции тренировочной выборки топографических данных получены карты – цифровые модели рельефа, представленные на рисунке 4.

В случае ординарного кригинга были построены изотропные модели вариограмм:

– для метода OKSph – сферическая модель вариограммы с параметрами: наггет = 0, порог = 1024,42, размах = 7163,47; сумма квадратичных ошибок подгонки вариограммы SSErr = 107,67;

– для метода OKMat – модель вариограммы Матерна с параметрами: наггет = 0, порог = 1245,4, размах = 4654,54; SSErr составил 261,24.

Результаты оценки вертикальной точности представлены в таблице 1. Общая точность методов интерполяции, оцененная как по точкам, составляющим узлы изолиний, так и по характерным точкам местности, возрастает в ряду: IDW1 < IDW2 < IDW3 < IDW4 < MBS < OKMat < OKSph < TPS. Все оцениваемые методы интерполяции характеризуются отрицательным смещением (средней ошибкой), значение которой возрастает в том же порядке, что и среднеквадратичная ошибка. Соотношение дисперсий исходных точек и интерполированных значений для большинства методов равно единице, за исключением метода обратно взвешенных расстояний со значениями силы 1, 2 и 3, что, в свою очередь, указывает на сглаживающий эффект данных методов интерполяции.

При оценке точности на основе только характерных точек местности все методы показывают более низкую точность – значение RMSE возрастает в 1,5–2 раза (см. табл. 1). Метод IDW характеризуется наибольшими значениями среднеквадратичной ошибки и наибольшей недооценкой прогнозируемых высот, и также значительно сглаживает дисперсию высот характерных точек местности с некоторым снижением сглаживания при увеличении параметра силы. Метод ординарного кригинга показывает высокую точность интерполяции, при этом различия между применяемыми моделями вариограмм незначительны.

Лучшим методом интерполяции по результатам оценки точности является сплайновый интерполятор TPS – с наименьшей среднеквадратичной ошибкой, минимальным смещением и минимальным сглаживающим эффектом.

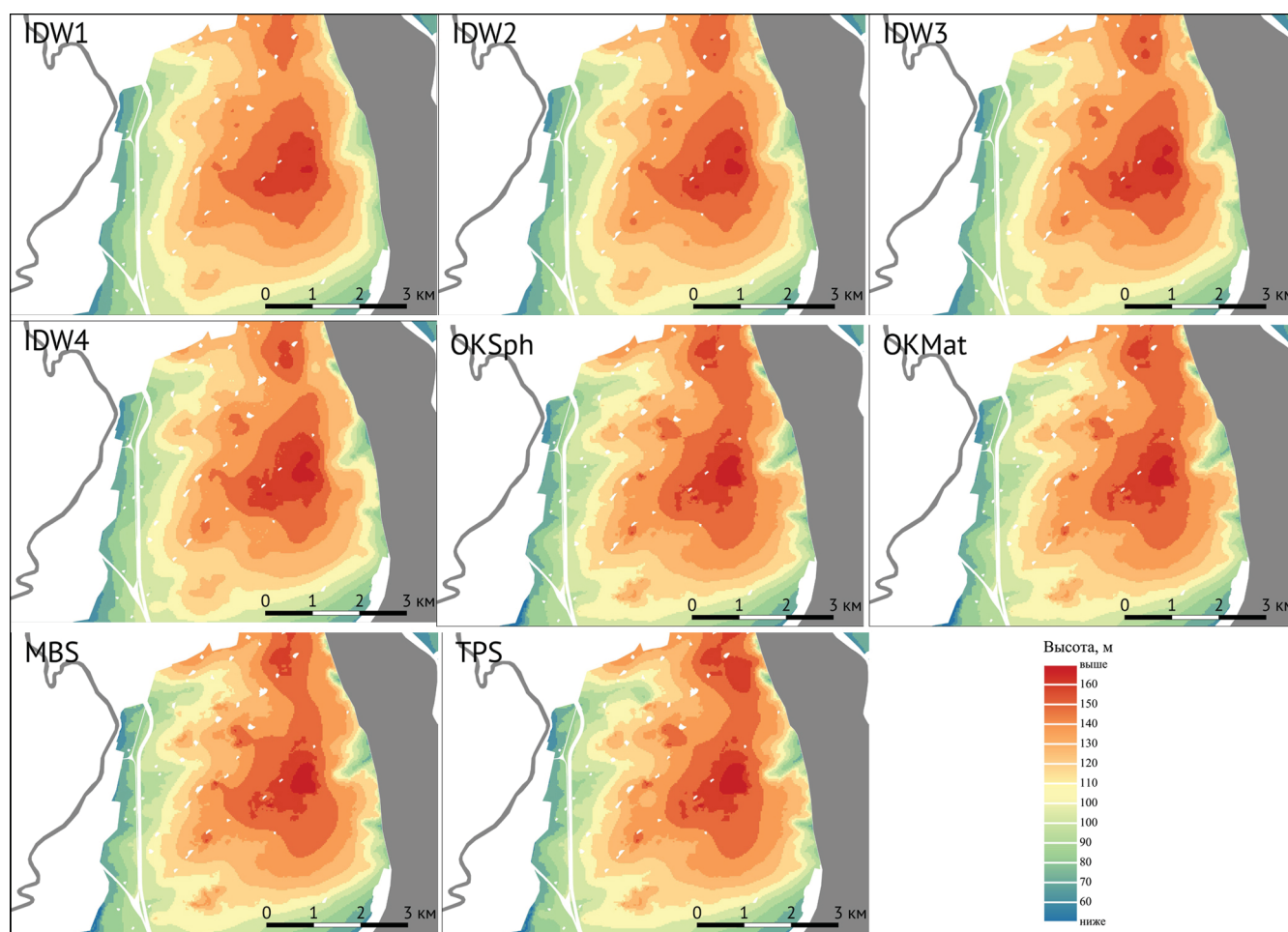


Рис. 4. Результаты интерполяции топографических данных, фрагмент карты

Fig. 4. Results of the interpolation of topographic data, map fragment

Таблица 1
Оценка точности интерполяции по всем проверочным точкам и только по характерным точкам местности

Метод	ME	RMSE	Pearson's r	RVar
Все точки				
IDW1	-1,01	5,60	0,98	0,90
IDW2	-0,67	3,90	0,99	0,96
IDW3	-0,49	3,40	0,99	0,99
IDW4	-0,41	3,30	0,99	1,00
OKSph	-0,18	2,10	1,00	1,00
OKMat	-0,19	2,10	1,00	1,00
MBS	-0,24	2,40	1,00	1,00
TPS	-0,10	1,90	1,00	1,00
Характерные точки местности				
IDW1	-4,35	8,20	0,95	0,73
IDW2	-3,90	7,90	0,95	0,78
IDW3	-3,56	7,70	0,95	0,82
IDW4	-3,32	7,50	0,95	0,87
OKSph	-0,44	4,30	0,98	0,98
OKMat	-0,46	4,30	0,98	0,98
MBS	-1,07	4,90	0,97	1,02
TPS	-0,11	3,70	0,98	0,97

Гидрологическая корректность. Временные водотоки, извлеченные на основе интерполированных цифровых моделей рельефа, а также водотоки, выделенные на основе топографических карт и снимков земной поверхности, представлены на рисунке 5. Варианты интерполяции IDW1 и MBS позволили выделить только семь из восьми водотоков – оба метода не обозначили временный канал № 7 (см. рис. 5).

Итоги оценки близости расположения выделенных каналов с реальными временными водотоками представлены в таблице 2.

По точности выделения сети каналов методы интерполяции располагаются в следующем порядке: IDW1 – IDW3 – MBS – IDW4 – IDW2 – OKSph – TPS – OKMat. Таким образом, несмотря на то что метод интерполяции на основе тонкостенных сплайнов показал наибольшую точность, метод геостатистической интерполяции с вариограммой Матерна характеризуется большей точностью с точки зрения моделирования гидрологических объектов.

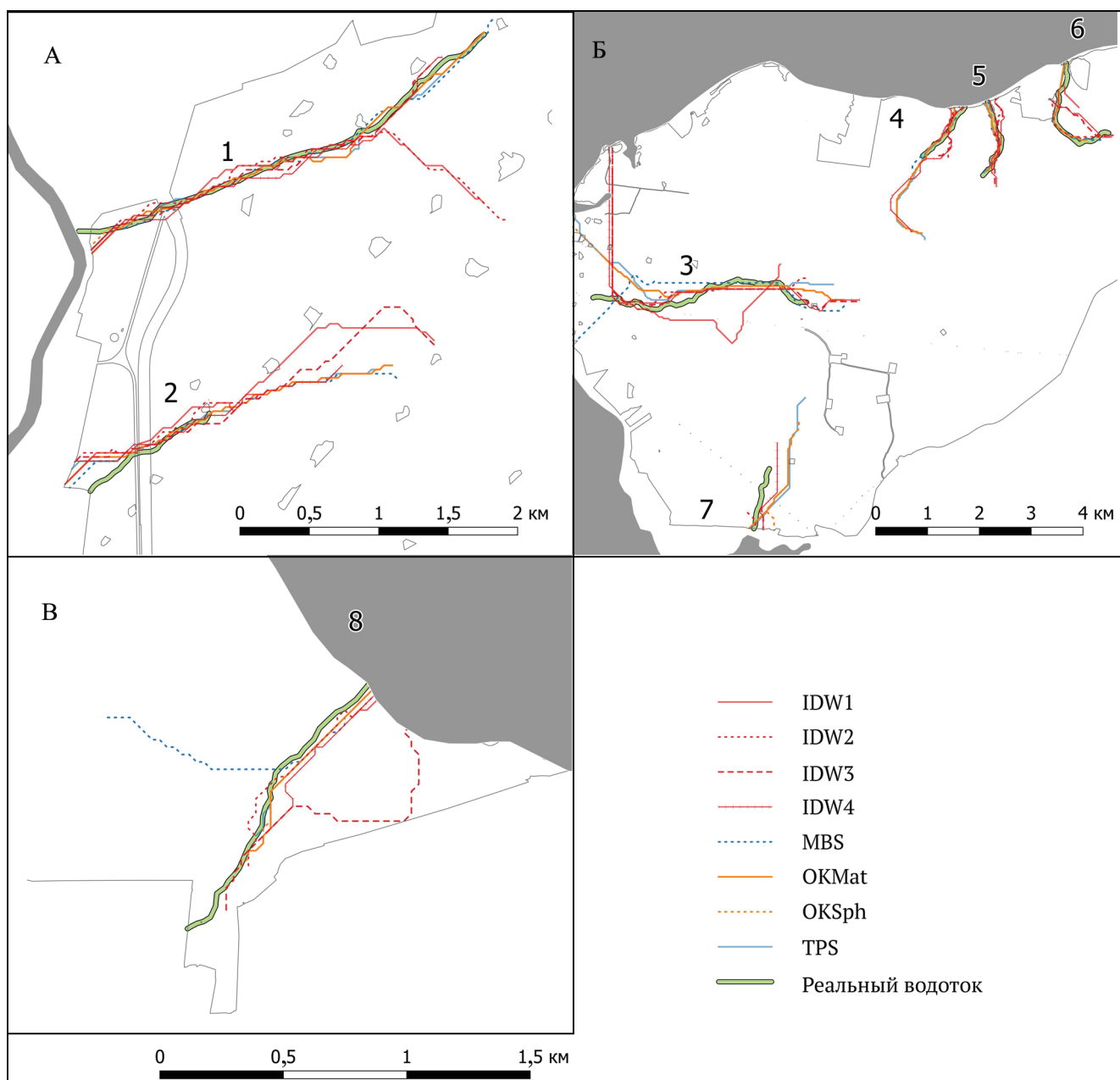


Рис. 5. Сравнение расположения временных водных потоков, выделенных на основе ЦМР: А–В – увеличенные фрагменты территории обследования. Цифрами обозначены оцениваемые временные водотоки

Fig. 5. Comparison of the location of temporary water streams identified on the basis of the DEM: A–B – enlarged fragments of the surveyed territory. The numbers indicate temporary streams under evaluation

Сплайновый метод MBS, несмотря на то что характеризуется как низкой средней ошибкой, так и низкой среднеквадратичной ошибкой, неожиданно плохо передает расположение сети каналов в сравнении методами OKSph, OKMat и TPS.

ВЫВОДЫ

В работе проведено сравнение нескольких методов пространственной интерполяции для задачи построения цифровой модели рельефа из векторизованных данных топографической съемки местности. Сравнение на основе вертикальной точности

показало, что группа методов обратно взвешенных расстояний имеет наименьшую точность независимо от параметра степени. Различия между геостатистическими методами кригинга с различными моделями вариограмм и сплайновыми методами незначительны.

С точки зрения гидрологического анализа, сеть каналов, выделенная на основе методов IDW, характеризуется наибольшими расстояниями от реального расположения временных водотоков на обследуемой территории. В целом, можно заключить, что для задач, требующих гидрологически

корректной модели рельефа, методы TPS и ординарный кригинг позволяют получить наиболее реалистичную картину местности. В частности,

метод ОКMat является наиболее корректным интерполятором для обследованной территории НП «Нижняя Кама».

Таблица 2

Средние расстояния временных водных потоков по данным цифровых моделей от их реального расположения

№ канала	IDW1	IDW2	IDW3	IDW4	MBS	OKMat	OKSph	TPS
1	195,0	198,0	30,3	42,8	33,0	33,4	31,3	33,3
2	107,2	84,6	66,0	57,3	46,2	58,3	58,3	52,5
3	367,1	132,7	102,3	99,3	204,5	213,7	241,4	255,0
4	103,9	173,7	150,1	154,5	39,2	46,7	46,7	42,1
5	35,7	71,8	90,2	92,0	48,5	44,8	44,8	47,0
6	193,6	233,3	404,7	346,9	139,8	142,7	142,7	143,6
7	N/A	46,2	131,5	179,1	N/A	268,6	335,2	306,1
8	97,4	44,5	282,0	73,6	579,9	35,5	32,8	30,6
Среднее	157,1	123,1	157,1	130,7	155,9	105,5	116,6	113,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гареев Р.М., Кулагин А.В., Блафф Л.В., Яруллин Ф.Х., Соловьев Д.А., Прохоров В.Е., Артемьева Т.И. Комплексное изучение лесных экосистем национального парка «Нижняя Кама» и оценка воздействия на них объектов нефтедобычи // Экологический консалтинг. 2009. Т. 1. № 33. С. 2–10.
- Ерицян Г.Г. Сравнение цифровых моделей рельефа, полученных с топографических карт масштаба 1 : 50 000, 1 : 100 000 и 1 : 200 000 с ЦМР SRTM // Известия НАН РА. Науки о Земле. 2013. Т. 66. № 1. С. 34–47.
- Ajvazi B., Czimmer K. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo, *Geodesy and cartography*, 2019, vol. 45, no. 5, p. 43–48, DOI: 10.3846/gac.2019.7921.
- Alcaras E., Parente C., Vallario A. Comparison of different interpolation methods for DEM production, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2019, vol. 6, no. 4, p. 1654–1659, DOI: 10.30534/ijatcse/2019/91842019.
- Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models, *Intern. Journal of Geo-Information*, 2018, vol. 7, no. 3, p. 114, DOI: 10.3390/ijgi7030114.
- Arun P.V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2013, vol. 16, no. 2, p. 133–139, DOI: 10.1016/j.ejrs.2013.09.001.
- Baugh C.A., Bates P.D., Schumann G., Trigg M.A. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy, *Water Resour. Res.*, 2013, vol. 49, no. 9, p. 5276–5289, DOI: 10.1002/wrcr.20412.
- Boreggio M., Bernard M., Gregoretti C. Evaluating the Differences of Gridding Techniques for Digital Elevation Models Generation and Their Influence on the Modeling of Stony Debris Flows Routing: A Case Study From Rovina di Cancia Basin (North-Eastern Italian Alps), *Front. Earth Sci.*, 2018, vol. 6, p. 89, DOI: 10.3389/feart.2018.00089.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, vol. 8, p. 1991–2007, DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Donato G., Belongie S. Approximate Thin Plate Spline Mappings and Principal Warps, *Computer Vision – ECCV 2002: European Conference on Computer Vision: Lecture Notes in Computer Science*, A. Heyden, G. Sparr, M. Nielsen, P. Johansen (eds.), Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2002, vol. 2352, p. 21–31, DOI: 10.1007/3-540-47977-5_2.
- Elkhrachy I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia, *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9, no. 4, p. 1807–1817, DOI: 10.1016/j.asej.2017.01.007.
- Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation: Applied Geostatistics*, New York, Oxford, Oxford University Press, 1997, 485 p.
- Hutchinson M.F., Xu T., Stein J.A. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure, *Geomorphometry*, Redlands, CA, 2011, p. 19–22.
- Keller W., Borkowski A. Thin plate spline interpolation, *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93, no. 9, p. 1251–1269, DOI: 10.1007/s00190-019-01240-2.
- Knotters M., Heuvelink G.B.M., Hoogland T., Walvoort D.J.J. A Disposition of interpolation techniques, Wageningen, Netherlands, Alterra Wageningen UR, 2010, 92 p.
- Kopecký M., Čížková Š. Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? Topographic wetness index in vegetation ecology, *Applied Vegetation Science*, 2010, vol. 13, no. 4, p. 450–459, DOI: 10.1111/j.1654-109X.2010.01083.x.
- Lauermann M., Betz F., Cyffka B. Channel Network Derivation from Digital Elevation Models – An Evaluation of Open-Source Approaches, *Conference, Central Asia GIS Conference, Eichstätt, Germany, Catholic University Eichstätt-Ingolstadt*, 2016, p. 8.

- Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines, *IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics*, 1997, vol. 3, no. 3, p. 228–244, DOI: 10.1109/2945.620490.
- Li J., Heap A.D. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*, Canberra, Australia, Australian Government, Geoscience Australia, 2003, 137 p.
- Pavlova A.I. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models, *Optoelectron Instrument Proc.*, 2017, vol. 53, no. 2, p. 171–177, DOI: 10.3103/S8756699017020108.
- Pebesma E.J. *Gstat user's manual*, Dept. of Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 2003, 108 p.
- Pebesma E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package, *Computers & Geosciences*, 2004, vol. 30, p. 683–691.
- Rui X.-P., Yu X.-T., Lu J., Ashraf M.A., Song X.-F. An algorithm for generation of DEMs from contour lines considering geomorphic features, *Earth Sci. Res. Journal*, 2016, vol. 20, no. 2, p. 1–9, DOI: 10.15446/esrj.v20n2.55348.
- Soycan A., Soycan M. Digital elevation model production from scanned topographic contour maps via thin plate spline interpolation, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2009, vol. 34, no. 1, p. 121–134.
- Szypula B. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods, *Landform Analysis*, 2017, vol. 32, p. 45–58, DOI: 10.12657/landfana.032.004.
- Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2014, vol. II-4, p. 71–76, DOI: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014.
- Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrological Processes*, 1991, vol. 5, no. 1, p. 81–100, DOI: 10.1002/hyp.3360050107.
- Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling, *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, vol. 20, no. 2, p. 193–213, DOI: 10.1080/13658810500433453.
- Webster R., Oliver M.A. *Geostatistics for Environmental Scientists: Statistics in practice*, 2nd ed., England, John Wiley & Sons Ltd, 2007, 318 p.
- Электронные ресурсы
- QGIS Association. QGIS Geographic Information System, 2021, URL: <http://www.qgis.org/> (дата обращения 02.02.2021).
- R Core Team. A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021, URL: <https://www.R-project.org/> (дата обращения 02.02.2021).

Поступила в редакцию 04.02.2021

После доработки 06.10.2021

Принята к публикации 22.11.2021

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF THE DIGITAL TERRAIN MODEL INTERPOLATION (CASE STUDY OF THE “NIZHNAYA KAMA” NATIONAL PARK)

S.S. Ryazanov¹, V.I. Kulagina²

^{1,2} *Institute of Ecology and Subsoil Use of the Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of the State institution “Tatarstan Academy of Sciences”), Laboratory of Soil Ecology*

¹ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: Rstanislav.soil@gmail.com*

² *Head of the Laboratory, Ph.D. in Biology; e-mail: viksoil@mail.ru*

Spatial interpolation methods for generation of a digital terrain model were compared for the forested areas of the “Nizhnaya Kama” National Park (Republic of Tatarstan, Russia). The available topographic maps of the park territory at a scale of 1 : 100 000 were used. The interpolation methods, namely the inverse distance weighting with different power parameters p (IDW1, IDW2, IDW3, IDW4), ordinary kriging with Matern (OKMat) and spherical (OKSph) variogram models, multilevel b-splines (MBS) and thin plate splines (TPS), were evaluated in terms of vertical accuracy and hydrological precision. The hydrological precision was calculated based on the distance of the channel network identified on the basis of interpolated terrain models from their actual location. The results of the assessment based on the nodes of isolines and characteristic points of the terrain showed that the method of inverse weighted distances produces the greatest error when creating a digital elevation model. Geostatistical and spline methods had similar accuracies. According to the precision of the channel network positioning, all methods were arranged in the following order: IDW1 – IDW3 – MBS – IDW4 – IDW2 – OKSph – TPS – OKMat. The general conclusion is that TPS and ordinary kriging methods allow obtaining the most realistic representation of relief for the tasks requiring a hydrologically correct terrain model. In particular, the ordinary kriging method with the Matern variogram model was the most correct interpolator for the surveyed territory of the “Nizhnaya Kama” National Park.

Keywords: GIS, DEM, DTM, DSM, interpolation, kriging, IDW, splines, topography

REFERENCES

- Ajvazi B., Czimer K. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo, *Geodesy and cartography*, 2019, vol. 45, no. 5, p. 43–48, DOI: 10.3846/gac.2019.7921.
- Alcaras E., Parente C., Vallario A. Comparison of different interpolation methods for DEM production, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2019, vol. 6, no. 4, p. 1654–1659, DOI: 10.30534/ijatce/2019/91842019.
- Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models, *Intern. Journal of Geo-Information*, 2018, vol. 7, no. 3, p. 114, DOI: 10.3390/ijgi7030114.
- Arun P.V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2013, vol. 16, no. 2, p. 133–139, DOI: 10.1016/j.ejrs.2013.09.001.
- Baugh C.A., Bates P.D., Schumann G., Trigg M.A. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy, *Water Resour. Res.*, 2013, vol. 49, no. 9, p. 5276–5289, DOI: 10.1002/wrcr.20412.
- Boreggio M., Bernard M., Gregoretti C. Evaluating the Differences of Gridding Techniques for Digital Elevation Models Generation and Their Influence on the Modeling of Stony Debris Flows Routing: A Case Study from Rovina di Cancia Basin (North-Eastern Italian Alps), *Front. Earth Sci.*, 2018, vol. 6, p. 89, DOI: 10.3389/feart.2018.00089.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, vol. 8, p. 1991–2007, DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Donato G., Belongie S. Approximate Thin Plate Spline Mappings and Principal Warps, *Computer Vision – ECCV 2002: European Conference on Computer Vision: Lecture Notes in Computer Science*, A. Heyden, G. Sparr, M. Nielsen, P. Johansen (eds.), Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2002, vol. 2352, p. 21–31, DOI: 10.1007/3-540-47977-5_2.
- Elkhrachy I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia, *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9, no. 4, p. 1807–1817, DOI: 10.1016/j.asej.2017.01.007.
- Eritsyan G.G. Sravnenie tsifrovyykh modelei rel'efa, poluchennykh s topograficheskikh kart masshtaba 1 : 50 000, 1 : 100 000, 1 : 200 000 s TsMR SRTM [Comparison of digital terrain models driven from 1 : 50 000, 1 : 100 000 and 1 : 200 000 topographical maps, with DEM SRTM], *Izvestiya NAN RA, Nauki o Zemle*, 2013, vol. 66, no. 1, p. 34–47 (In Russian).
- Gareev R.M., Kulagin A.V., Blatt L.V., Yarullin F.Kh., Solov'ev D.A., Prokhorov V.E., Artem'eva T.I. Kompleksnoe izuchenie lesnykh ekosistem natsional'nogo parka "Nizhnyaya Kama" i otsenka vozdeistviya na nikh ob"ektov nefte dobychi [Comprehensive study of forest ecosystems of the "Nizhnyaya Kama" National Park and assessment of the impact of oil production facilities over them], *Ekologicheskii konsalting*, 2009, vol. 1, no. 33, p. 2–10. (In Russian).
- Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation: Applied Geostatistics*, New York, Oxford, Oxford University Press, 1997, 485 p.
- Hutchinson M.F., Xu T., Stein J.A. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure, *Geomorphometry*, Redlands, CA, 2011, p. 19–22.
- Keller W., Borkowski A. Thin plate spline interpolation, *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93, no. 9, p. 1251–1269, DOI: 10.1007/s00190-019-01240-2.
- Knotters M., Heuvelink G.B.M., Hoogland T., Walvoort D.J.J. A Disposition of interpolation techniques, Wageningen, Netherlands, Alterra Wageningen UR, 2010, 92 p.
- Kopecký M., Čížková Š. Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? Topographic wetness index in vegetation ecology, *Applied Vegetation Science*, 2010, vol. 13, no. 4, p. 450–459, DOI: 10.1111/j.1654-109X.2010.01083.x.
- Lauermann M., Betz F., Cyffka B. Channel Network Derivation from Digital Elevation Models – An Evaluation of Open-Source Approaches, *Conference, Central Asia GIS Conference, Eichstätt, Germany, Catholic University Eichstätt-Ingolstadt*, 2016, p. 8.
- Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines, *IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics*, 1997, vol. 3, no. 3, p. 228–244, DOI: 10.1109/2945.620490.
- Li J., Heap A.D. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*, Canberra, Australia, Australian Government, Geoscience Australia, 2003, 137 p.
- Pavlova A.I. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models, *Optoelectron Instrument Proc.*, 2017, vol. 53, no. 2, p. 171–177, DOI: 10.3103/S8756699017020108.
- Pebesma E.J. *Gstat user's manual*, Dept. of Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 2003, 108 p.
- Pebesma E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package, *Computers & Geosciences*, 2004, vol. 30, p. 683–691.
- Rui X.-P., Yu X.-T., Lu J., Ashraf M.A., Song X.-F. An algorithm for generation of DEMs from contour lines considering geomorphic features, *Earth Sci. Res. Journal*, 2016, vol. 20, no. 2, p. 1–9, DOI: 10.15446/esrj.v20n2.55348.
- Soycan A., Soycan M. Digital elevation model production from scanned topographic contour maps via thin plate spline interpolation, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2009, vol. 34, no. 1, p. 121–134.
- Szypuła B. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods, *Landform Analysis*, 2017, vol. 32, p. 45–58, DOI: 10.12657/landfana.032.004.
- Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2014, vol. II-4, p. 71–76, DOI: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014.
- Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrological Processes*, 1991, vol. 5, no. 1, p. 81–100, DOI: 10.1002/hyp.3360050107.

- Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling, *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, vol. 20, no. 2, p. 193–213, DOI: 10.1080/13658810500433453.
- Webster R., Oliver M.A. *Geostatistics for Environmental Scientists: Statistics in practice*, 2nd ed., England, John Wiley & Sons Ltd, 2007, 318 p.
- Web sources*
- QGIS Association, QGIS Geographic Information System, 2021, URL: <http://www.qgis.org/> (access date 02.02.2021).
- R Core Team, A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020, URL: <https://www.R-project.org/> (access date 02.02.2021).

Received 04.02.2021

Revised 06.10.2021

Accepted 01.11.2021