

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОТКРЫТЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Оперативное получение достоверной информации о рельефе местности с достаточной детализацией является одной из главенствующих задач в областях народного хозяйства, развития территорий или исследований крупных территориальных единиц. Множественность источников ошибок в материалах дистанционного зондирования Земли обусловлена рядом факторов, а получаемые модели местности имеют определенную степень генерализации, что напрямую влияет на корректность цифровых моделей рельефа. Данная статья посвящена анализу существующих методов оценки погрешностей открытых цифровых моделей рельефа с целью повышения их точности. Корректные цифровые модели рельефа имеют высокое подобие действительности и могут быть использованы при региональных исследованиях в части определения морфометрических показателей территории.

**Ключевые слова:** цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли, древесно-кустарниковая растительность, нормальное распределение Гаусса, интерполяционный полином Лагранжа, локальная интерполяция.

**Введение.** Открытые пространственные данные, полученные с использованием дистанционного зондирования Земли, позволяют формировать приближенные цифровые модели рельефа (ЦМР) местности. Подобные модели позволяют осуществлять оперативный мониторинг процессов различного уровня с должной степенью достоверности в части отражения геометрических особенностей территорий при определённой степени генерализации. Повышение точности и достоверности исходных данных для построения ЦМР в настоящее время весьма актуально. Вопросам моделирования ЦМР и их параметризации в геоинформационных системах (ГИС) посвящены работы как отечественных (Павлова А. И. [1], Капралов Е. Г. [2], Хромых В. В. и Хромых О. В. [3], и др.), так и зарубежных учёных (Джарвис [4], Тачикава [5], Сонг [6] и др.).

Большинство авторов и исследователей используют, как правило, классические, зарекомендовавшие себя методы формирования ЦМР с использованием стандартных моделей рельефа GRID (регулярная сеть) и TIN (нерегулярная триангуляционная сеть), созданным из стереотопографических картографических произведений, при этом достигая качественных и оперативных результатов исключительно на локальных участках (с учётом микроформ рельефа). На уровне региона, бассейна крупной реки или целого государства такие источники данных становятся сильно генерализованными и понижают степень достоверности получаемых результатов.

Цифровые модели рельефа (ЦМР, DEM) необходимо рассматривать в качестве поверхностей без каких-либо артефактов типа растения или здания и сооружения. Имеющиеся сегодня цифровые модели рельефа, полученные по данным дистанци-

онного зондирования Земли (ДЗЗ) и являющиеся наиболее доступными и исследованными, — это SRTM, Aster, ALOS World 3D [7, 8], при этом имеются также коммерческие продукты типа WorldDEM от компании Airbus Defence and Space или NextMap World 10 и NextMap World 30 от компании Intermap и др. Исследования в данной работе опираются непосредственно на продукты, имеющие общий доступ и не требующие материальных затрат. Такие ЦМР обладают некоторым количеством ошибок в виде часто встречаемых искажений углов наклона и абсолютного смещения на участках, занятых лесной растительностью [9–11], которые не полностью исключаются в процессе обработки исходных данных ДЗЗ [12, 13].

**Анализ существующих методов оценки погрешностей.** Использование доступных данных и автоматизированных алгоритмов обработки данных средствами ГИС позволяет исключить ошибки, связанные с растительным покровом, и позволяет строить 2D сетки водотоков [12]. Кроме ошибок наклона и растительного покрова на ЦМР Ямазаки [8], Хиртом [13] и Такаку [14], отмечается наличие стохастических всплесков, источником которых являются непосредственно датчики приема сигнала на спутниках дистанционного зондирования. Также ими установлено наличие искажений на участках стыковки полос сканирования земной поверхности, что вызвано непосредственно технологией полосного зонирования. Для идентификации артефактов различного происхождения в 2017 году Кристианом Хиртом [13] было предложено использовать метод максимального наклона, опирающийся на вычисление градиентов наклона поверхности с максимальными показателями и дальнейшее их дешифрирование. В 2017 году группой ученых была подготовлена

откорректированная модель DEM [8], в которой исправлены все основные компоненты ошибок для выполнения гидравлических расчетов, где участки, занятые растительностью, не вовлечены в фактический расчет, а использованы в качестве поверхности для определения связи стока водных объектов [12]. Многие научно-исследовательские учреждения также готовили свои версии ЦМР, из состава которых по их утверждениям исключены те или иные ошибки для использования при решении прикладных задач [15]. Среди указанных работ имеются некоторые особенности: во-первых, все исследования направлены на корректировку модели рельефа в целом в общем объеме предоставляемых данных и не концентрируются на локальных участках местности; во-вторых, большинство исследований используют для работ модели SRTM и Aster; в-третьих, во всех работах для восстановления одной матрицы высот используется некоторая другая DEM. Учитывая это, можно сказать, что восстановление отсутствующих значений высот, устранение артефактов различного происхождения и составление единой бесшовной модели рельефа остается сложной задачей.

Идентификация артефактов исходных ЦМР возможна при наличии объективных данных на дату создания моделей. В работе [16] был предложен метод корректуры поверхности путем выявления растительного покрова и дальнейшей генерации рельефа с исключением высотной составляющей на участках, покрытых древесно-кустарниковой растительностью. При этом оценка точности по корректурным значениям показала линейную величину в  $\pm 3$  м. Несмотря на допустимые количественные результаты, форма топографической поверхности остается с некоторым количеством артефактов в виде всплесков по граничным (стыковым) элементам. Появление подобных артефактов вызвано также использованием локальной интерполяции.

Основная часть исследований в получении качественных характеристик ЦМР, выраженных численно в виде ошибки (обычно — СКП, RMSE), опираются на использование эталонных значений высот, полученных натурными измерениями спутниковым навигационным оборудованием или данных топографических планов или карт [17].

При исследованиях земной поверхности ее модель удобно описать в виде двумерной растровой матрицы, где каждый элемент является аналогом

пикселя изображения или элементарным объектом геоинформационной системы. В простом случае каждая ячейка имеет одно определенное состояние или значение в зависимости от дискретного или непрерывного пространства признаков.

Как правило, при восстановлении элементов поверхностей используются интерполяционные методы, которые подразделяют на глобальные и локальные.

Методы глобальной интерполяции применяют для выявления детерминантных составляющих моделей. Они основаны на подборе общей функции на всей окрестности точек и, как следствие, применяются для восстановления функции высоты на всей заданной поверхности и могут быть использованы при оценке точности модели в целом.

Методы локальной интерполяции применяют для выявления стохастических составляющих моделей. Они опираются на определении частных функций по соседним точкам, основаны на принципе автокорреляции. Данный принцип предполагает пропорциональную зависимость расположения элементов модели и их влияния друг на друга.

Главным недостатком методов локальной интерполяции Рейтер [18] считает использование ограниченного количества входных данных для применения функции интерполяции. Поэтому входные данные, используемые для вычисления каждой функции, образуют «окно», которое перемещается по набору данных. По сравнению с глобальными, локальные методы обычно дают менее гладкие поверхности. Они не так чувствительны к резким изменениям высоты, потому что их влияние не распространено на всю поверхность, а только на локальные участки. Сложность использования методов локальной интерполяции заключается в рациональном (необходимом и достаточном) определении размера «окно поиска» (количество используемых точек данных или радиус поиска) и используемой функции [16]. Такая функция должна обеспечить учет каждого стохастического артефакта смежной ячейки и численно определить ее вес (степень влияния). При подборе размерности окрестности также следует учитывать распределение степени влияния исходя из условия, что величины весов каждого последующего смежного пикселя при приближении к краю окрестности будут стремиться к 0. Также необходимо учесть, что пиксели, принадлежащие группе древесной раститель-

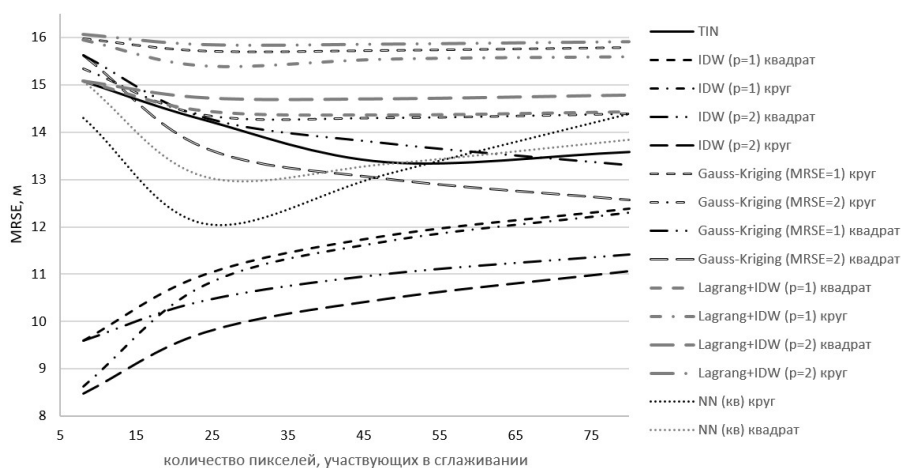


Рис. 1. График распределения ошибки интерполяции поверхностей сглаживания лесной растительности различными методами

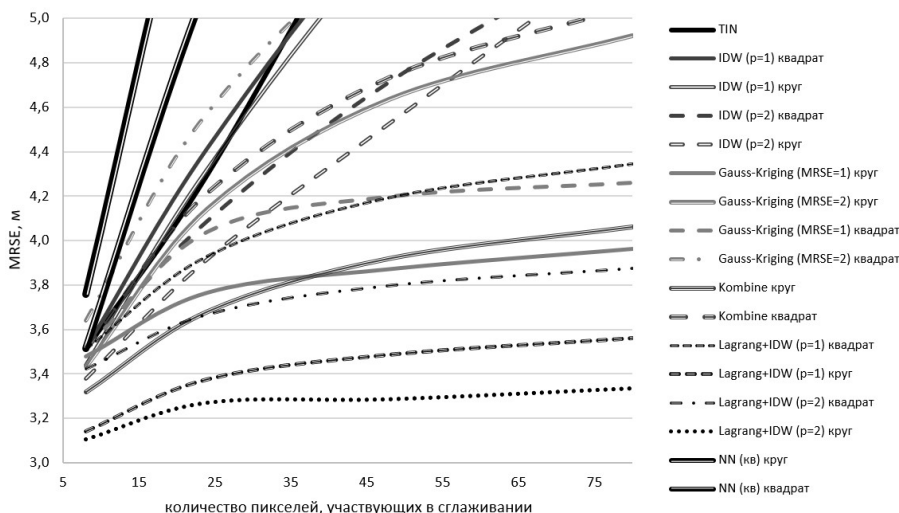


Рис. 2. График распределения ошибки интерполяции поверхностей сглаживания лесной растительности (с учетом кроны) различными методами

ности, не включаются в обработку до момента их корректуры.

Несмотря на существование большого количества методов интерполяции: метод нерегулярной триангуляционной сетки (TIN); метод обратных взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW), метод естественного соседства (Natural Neighbor, NN), методы Кригинга (Kriging), метод радиальной базисной функции (Radial basis functions, RBF) и пр., в аналитических вычислениях использовались методы интерполяции с различными весовыми коэффициентами: TIN, IDW (с использованием степеней веса «1» и «2»), Kriging (с использованием функции нормального распределения Гаусса степеней «1» и «2», и комбинированных), NN. Результаты восстановления значений приведены на рис. 1.

Для подтверждения ранних предположений, что использование дополнительно коэффициентов позволяет учесть зависимость (состояние пикселя), расчет влияния был осуществлен с использованием интерполяционного полинома Лагранжа. Полученные коэффициенты, распределенные пропорционально удаленности каждого последующего пикселя относительно точки интерполяции, были использованы в круговом и квадратном «окне поиска». Результаты восстановления значений рельефа после исключения средней кроны приведены на рис. 2.

Количественно оценить качество любой модели возможно путем анализа её на предмет наличия и оценки погрешностей. Математическое ожидание приравнивается к соответствующим теоретическим характеристикам, называя их несмещённой оценкой, и выявляет систематические погрешности наряду со случайными. Средняя квадратическая погрешность является состоятельной и несмещённой оценкой дисперсии. Вероятностной моделью распределения случайной погрешности является их нормальное распределение.

Отсутствие большой выборки значений является проблемой для области исследования распространения ошибок в модели рельефа. Некоторые авторы использовали практический подход, сравнивая различные методы интерполяции. Предполагается, что распределение ошибок в ЦМР описывается законом Гаусса. Однако немногочисленные исследования, которые описывали подчинение ошибок нор-

мальному распределению, не были подтверждены в дальнейшем. В работах [19] и [20] отмечается, что распределение ошибок ЦМР значительно отличается от нормального распределения Гаусса.

Вопросы оценки точности ЦМР неотделимы от сравнения точности самих методов интерполяции. Для оценки и сопоставления характеристик различных методов интерполяции используется метод кроссвалидации. Точность методов интерполяции описывается целым рядом показателей: средняя ошибка (MEAN), средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя квадратическая ошибка (RMSE), максимальная (MAX) и минимальная (MIN) по абсолютной величине разность выборки.

Как отмечал в своей работе Монкот [21], использование при качественной оценке вертикальной составляющей цифровой модели рельефа (RMSE) предполагает, что средняя ошибка будет равна нулю, о чем свидетельствуют и свойства ошибок. В исследованиях Монкота [21] и Вайса [22] также отмечается, что такая мера оценки как RMSE тесно связана с характером рельефа и будет отличаться при исследованиях равнинного или горного рельефа. Кроме того, Вайс [23], а через несколько лет Флоринский [24] отмечали, что даже незначительные ошибки в высотной составляющей модели рельефа могут сильно повлиять на производные морфометрические характеристики.

Во многих исследованиях по определению качества методов интерполяции цифровых моделей рельефа используется, как правило, малое количество эталонных (контрольных) значений, что является недостаточным для объективного оценивания ситуации [25]. Для решения этой задачи Стэфен Вайс [26] предложил подход, который состоит в том, чтобы разредить сеть точек с высотами в модели, т.е. понизить пространственное разрешение, а затем, используя интерполяционный метод, восстановить модель обратно и провести сравнение с первоначальной моделью. Он получил в оценке достаточно большое количество равномерно распределённых по всей оцениваемой поверхности контрольных точек.

Таким образом, можно отметить, что при оценке точности ЦМР используется два основных подхода:

— использование наборов точечных эталонных элементов, высоты которых определены с заведомо большей точностью;

— использование вспомогательных или производных поверхностей с математическим описанием.

Каждый из используемых подходов обладает своими преимуществами и недостатками. Стэфен Вайс [26] предложил использовать оба подхода для оценки ЦМР и определения законов распределения ошибок.

В результате применения методов интерполяции и оценки точности моделей рельефа установлено, что наилучшими качественными характеристиками обладает метод IDW при использовании малых размерностей окрестности ( $D = 1$  или  $D = 2$ ). В данном исследовании для восстановления цифровых поверхностей рельефа будет использован метод интерполяции IDW с коэффициентом степени «2». Главным критерием при восстановлении поверхности рельефа является сохранение гидрологической корректности. Кроме того, использование любого из методов интерполяции при восстановлении значений ячеек ЦМР требует дополнительных коэффициентов, позволяющих усовершенствовать их и повысить точность.

#### Обработка данных для оценки точности ЦМР.

При выполнении оценочных работ по вычислению точности геометрии поверхности результирующие данные сильно зависят от количества эталонных значений, однако получаемые отклонения могут быть использованы в дальнейшем для целей корректировки моделей и последующих переформирований геометрии поверхности.

Учитывая вариативности пластики топографической поверхности, предлагается при аналитических сопоставлениях использовать не поверхностные модели, а способ профилирования. Динамические режимы спутникового позиционирования, обеспечивающие непрерывный сбор навигационных данных с установленной заранее дискретностью, позволяют оперативно получать координатно-временное описание положения приемника. В данной работе использована навигационная аппаратура геодезической точности, позволяющая производить запись данных с дискретностью до 1 с. При полевых экспериментальных работах для уменьшения объема данных дискретность их записи определялась в 5 с. Оборудование устанавливалось на автомобиле и при передвижении автомобиля осуществляло постоянную регистрацию данных. Обработка и уравнивание координат и высот измеренных значений проводилось в режиме постобработки. Полученные наборы точек были приведены к высотному значению полотна дорожного покрытия вне зависимости от его качества. Оценка точности по результатам уравнивания спутниковых наблюдений показала точностные характеристики в 0,5 м, что считаем достаточным для исследуемой территории. Общая протяженность треков составила около 86 км, количество контрольных узлов с отметками составило несколько более чем 1,6 тыс. На рис. 3 показан фрагмент профиля наиболее пересеченного участка полевой и лесной дороги протяженностью 1,7 км.

Учитывая вышесказанное, следует отметить основное, что проведение сплошной оценки точности ЦМР не является объективным в связи с различными качествами входных данных, которые можно классифицировать на две группы: участки, занятые лесными массивами, и участки, свободные от растительности. Обработку следует проводить с использованием в виде эталонных значений наборов данных о пунктах государственной геодезической сети, в т.ч. о пунктах плановых геодезических сетей

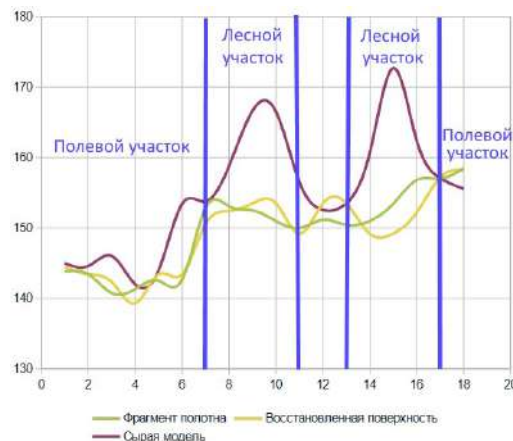


Рис. 3. Фрагмент верификационного профиля

с известными высотными отметками и о пунктах высотной геодезической сети. Оценку точности результатов корректуры поверхности можно осуществлять с применением набора полевых данных в виде набора точек по линейным объектам. При вычислении характеристик точности следует разделять показатели на оценку открытых территорий и оценку территорий, занятых древесной растительностью. Особенностью использования данных государственной геодезической сети (ГГС) при формировании и оценки точности поверхностей рельефа, является отсутствие этапа полевого сбора информации. Однако при этом объективность данных является сильно дифференцированной ввиду низкой плотности данных контрольных показателей на рассматриваемой территории. Для анализа точностных параметров возможно использование описанного способа сбора данных в виде геодезических наблюдений оперативного характера и высокой степенью достоверности.

Процедура обработки данных, приведенная на рис. 4, описывает процессы преобразования информации и извлечения данных о геометрических показателях объекта анализа на ограниченной территории. Результатом работ служат три набора данных для оценки точности: объединенный — RMSE (terGGS), в состав которого входят все контрольные точки; рельефный — RMSE (DEM), в состав которого входят контрольные точки, расположенные на открытых участках местности; лесной — RMSE (DTM), в состав которого входят контрольные точки, попадающие на участки, занятые лесной растительностью.

Получаемые в результате подготовки данных наборы численных характеристик могут использоваться для вычисления различных оценочных показателей, построения графиков модели распределения, построения математических поверхностей распределения значений ошибок в пространстве изучаемой территории и т.д. с использованием средств ГИС.

На рис. 5 приведен график распределения отклонений по классифицируемым показателям, откуда видно, как распределяются ошибки на участках, занятых лесной растительностью, и на открытых территориях. При этом также видно, что при оценке всего участка ЦМР распределение близко к закону Гаусса.

По своим показателям материал STRM близок к параметрам традиционных картографических ма-

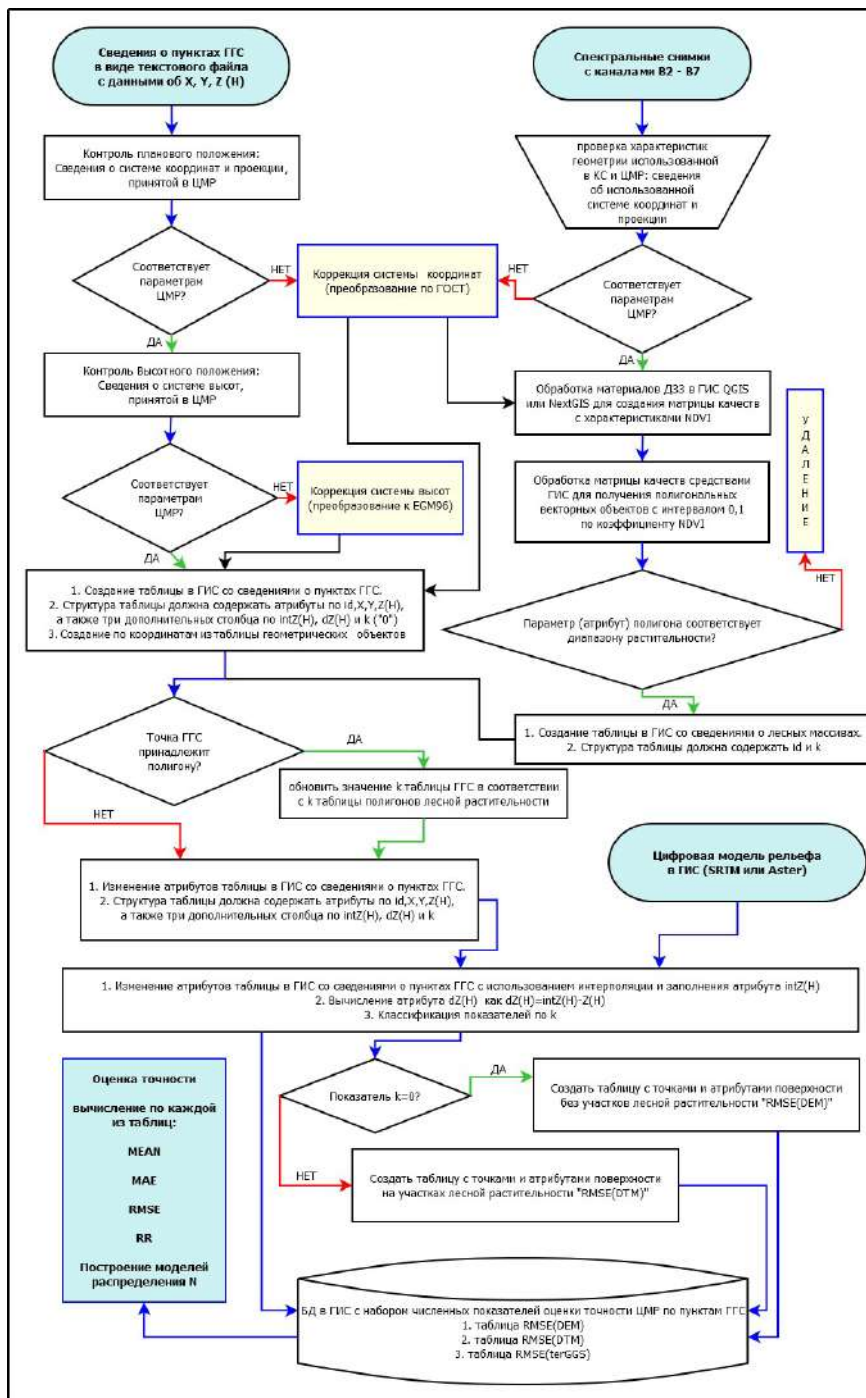


Рис. 4. Процедура обработки данных при подготовке показателей для оценки точности ЦМР

териалов, отличие обусловлено только из-за пространственного разрешения обрабатываемого изображения. Оба метода оценки, с использованием топографической поверхности и с применением выборочных точечных значений, дали одинаковый качественный и количественные результаты, несмотря на множественные геометрические и графические преобразования данных, что говорит об их взаимозаменяемости.

Использование пунктов ГГС для оценки, в случае оперативного изучения новой территории, является более простым по сравнению с применением топографической поверхности [27], т.к. он исключает этап дополнительных преобразований моделей из регулярной решетки в TIN и обратно. Повышение достоверности данных возможно при

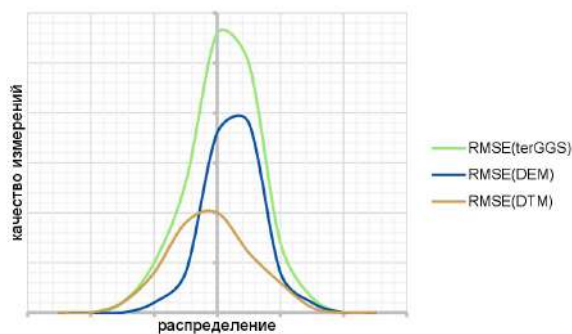


Рис. 5. Вероятностная модель распределения погрешностей при оценке точности ЦМР по классифицированным участкам

использовании также сведений натуральных измерений, имеющих высокую оперативность сбора. Такими методами служат геодезические спутниковые определения в динамических режимах. Таким образом, именно метод с использованием отдельной эталонной точечной выборки должен быть использован при оценке точности моделей. Также с целью повышения достоверности сведений возможно использование оперативных собранных данных натуральных (наземных) геодезических измерений с применением спутниковых навигационных систем, позволяющих оценить качественные показатели модели без существенных затрат. Полученные расхождения при анализе поверхности и собранных полевых данных можно использовать при дальнейшей корректуре рассматриваемой поверхности и приведении ее к топографической корректности.

В сравнении с первоначальным («сырым») вариантом откорректированных поверхности имеют более высокую степень точности, и основной объем отклонений (около 90 %) находится в пределах  $\pm 3$  м. Используя данные новых ЦМР, можно получить модель рельефа с высотой сечения в 5 метров (СКП 1,7 м, что составляет более 85 % всех данных SRTM и Aster GDEM).

Применение откорректированных (восстановленных) ЦМР может найти свое отражение в целом ряде гидрологических, геоморфологических, экологических и т.д. исследований. При этом такие ЦМР будут обладать достаточной точностью.

**Заключение.** Разработанный и обоснованный метод коррекции исходных данных для построения цифровых моделей рельефа средствами геоинформационных систем с применением метода локальной интерполяции в отличие от существующих методов восстановления поверхностей рельефа позволяет выполнить работы на неограниченных территориях вне зависимости от плотности растительного покрова и использовать малое количество информации (размерность матрицы для сглаживания от  $3 \times 3$  до  $5 \times 5$ ). Созданные с применением данного метода цифровые модели рельефа имеют высокое подобие действительной форме рельефа и могут быть использованы при региональных исследованиях в части определения морфометрических показателей рельефа. Недостатком использования такого метода остается то, что поправки в исходную модель вносятся повсеместно и полностью не устраняют влияние растительного покрова, т.е. на участках древесно-кустарниковой растительности будут встречаться остаточные отклонения, но имеющие абсолютные значения, локально поддающиеся повторной корректировке.

#### Библиографический список

1. Павлова А. И. Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа // *Автоматрия*. 2017. Т. 53, № 2. С. 86–94. DOI: 10.15372/AUT20170210. EDN: YKIFYZB.
2. Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тикунов В. С. [и др.]. *Геоинформатика* / под ред. В. С. Тикунова. Москва: Академия, 2010. 391 с. ISBN 978-5-7695-6468-0.
3. Хромых В. В., Хромых О. В. Опыт автоматизированного морфометрического анализа долинных геосистем Южного Притомыя на основе цифровой модели рельефа // *Вестник Томского государственного университета*. 2007. № 298. С. 208–210. EDN: KHNFOP.
4. Jarvis A., Rubiano J., Nelson A. [et al.]. Practical use of SRTM data in the tropics — Comparisons with digital elevation

models generated from cartographic data // *Centro International de Agricultura Tropical (CIAT)*. Cali, Colombia, 2004. № 198. 36 p.

5. Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A. [et al.]. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 — Summary of Validation Results // *Archive Center and the Joint Japan-US ASTER Science Team*. 2011. 28 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/255280829\\_ASTER\\_Global\\_Digital\\_Elevation\\_Model\\_Version\\_2\\_-\\_Summary\\_of\\_validation\\_results](https://www.researchgate.net/publication/255280829_ASTER_Global_Digital_Elevation_Model_Version_2_-_Summary_of_validation_results) (дата обращения: 01.10.2023).
6. Song C., Fan C., Zhu J. [et al.]. A comprehensive geospatial database of nearly 100 000 reservoirs in China // *Earth System Science Data*. 2022. № 14 (9). P. 4017–4034. DOI: 10.5194/essd-14-4017-2022.
7. Павлова А. Н. Геоинформационное моделирование речного бассейна по данным спутниковой съемки STRM (на примере бассейна р. Терешки) // *Известия Саратовского университета*. Науки о Земле. 2009. Т. 9, № 1. С. 39–44. EDN: JVCBHW.
8. Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R. [et al.]. A high-accuracy map of global terrain elevations // *Geophysical Research Letters*. 2017. № 44 (11). P. 5844–5853. DOI: 10.1002/2017GL072874.
9. Коротин А. С., Попов Е. В. Оценка точности цифровых моделей рельефа, применяемых для территориальных исследований // *ГРАФИКОН'2015: тр. юбилейной 25-й Междунар. науч. конф. Протвино, 22–25 сентября 2015 г.* Москва: Изд-во ИФТИ (Протвино), 2015. С. 102–106. EDN: UNFQOB.
10. Черниковский Д. М. Оценка связей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов на основе цифровых моделей рельефа ASTER и SRTM // *Сибирский лесной журнал*. 2007. № 3. С. 28–39.
11. Lefsky M. A. A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System // *Geophysical Research Letters*. 2010. № 37 (15). P. 1–5. DOI: 10.1029/2010GL043622.
12. Huili C., Qiuhua L., Yong L. [et al.]. Hydraulic correction method (HCM) to enhance the efficiency of SRTM DEM in flood modeling // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 559. P. 56–70. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.056.
13. Hirt C. Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): The Maximum Slope Approach and its application for complete screening of the SRTM v4.1 and MERIT DEMs // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 207. P. 27–41. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.037.
14. Takaku J., Iwasaki A., Tadono T. Adaptive filter for improving quality of ALOS PRISM DSM // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2016. P. 5370–5373. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730399.
15. Robinson N., Regetz J., Guralnick R. P. EarthEnv-DEM90: a nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90 m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. № 87. P. 57–67. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.11.002.
16. Коротин А. С., Попов Е. В. Реконструкция местности на основе откорректированных цифровых моделей рельефа // *Проблемы машиноведения: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. Омск, 23–24 апреля 2019 г.* Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 283–289. EDN: ZHFUDB.
17. Gesch D., Oimoen M., Danielson J. [et al.]. Validation of the ASTER global digital elevation model version 3 over the conterminous United States // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Prague, Czech Republic, 2016. Vol. XLI-B4. P. 143–148. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-143-2016.
18. Reuter H. I., Nelson A., Jarvis A. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data // *International Journal of Geographical Information Science*. 2007. № 21 (9). P. 983–1008. DOI: 10.1080/13658810601169899.

19. Bonin O., Rousseaux F. Digital terrain model computation from contour lines: how to derive quality information from artifact analysis // *Geoinformatica*. 2005. № 9 (3). P. 253–268. DOI: 10.1007/s10707-005-1284-2.

20. Oksanen J., Sarjakoski T. Uncovering the statistical and spatial characteristics of fine topographic DEM error // *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. № 20 (4). P. 345–369. DOI: 10.1080/13658810500433891.

21. Monckton C. G. An investigation into the spatial structure of error in digital elevation data // *Innovations in GIS*. London, 1994. P. 201–211. ISBN 978-0-429-20439-5.

22. Wise S. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours // *Hydrological Processes*. 2000. № 14 (11–12). P. 1909–1929. DOI: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/123.0.CO;2-6.

23. Wise S. M., Lane S. N., Richards K. S. [et al.]. The effect of GIS interpolation errors on the use of DEMs in geomorphology // *Landform Monitoring, Modeling and Analysis*. Wiley, Chichester, 1998. P. 139–164. ISBN 978-0-471-96977-8.

24. Florinsky I. V. Errors of signal processing in digital terrain modeling // *International Journal of Geographical Information Science*. 2002. № 16 (5). P. 475–501. DOI: 10.1080/13658810210129139.

25. Дворкин Б. А., Дудкин С. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // *Геоматика*. 2013. № 2. С. 16–36. EDN: SVUTID.

26. Wise S. Cross-validation as a means of investigating DEM interpolation error // *Computers & Geosciences*. 2011. Vol. 37, № 8. P. 987–991. DOI: 10.1016/j.cageo.2010.12.002.

27. Сонюшкин А. В. Совершенствование технологий создания ортофотопланов по космическим изображениям высокого разрешения: дис. ... канд. техн. наук. Москва: Изд-во МИИГАиК, 2015. 117 с.

**КОРОТИН Антон Сергеевич**, старший преподаватель кафедры геоинформатики, геодезии и кадастра Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ), г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 8401-4026

AuthorID (РИНЦ): 808295

AuthorID (SCOPUS): 57216799168

ORCID: 0009-0007-9636-3963

ResearcherID: JHS-4533-2023

Адрес для переписки: antonkorotin@yandex.ru

**ПОПОВ Евгений Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры инженерной графики и информационного моделирования ННГАСУ, г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 8156-5998

AuthorID (РИНЦ): 663542

AuthorID (SCOPUS): 56585437200

ORCID: 0000-0002-3058-2369

ResearcherID: F-6001-2013

Адрес для переписки: popov\_eugene@list.ru

#### Для цитирования

Коротин А. С., Попов Е. В. Оценка точности открытых цифровых моделей рельефа местности // *Омский научный вестник*. 2024. № 3 (191). С. 64–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-64-72.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024 г.

© А. С. Коротин, Е. В. Попов

## ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF OPEN DIGITAL TERRAIN MODELS

**Prompt receipt of reliable information about the terrain with sufficient detail is one of the main tasks in the fields of national economy, territorial development or research of large territorial units. The multiplicity of error sources in Earth remote sensing materials is due to a number of factors, and the resulting terrain models have a certain degree of generalization, which directly affects the correctness of digital terrain models. This article is devoted to the analysis of existing methods for estimating errors of open digital terrain models in order to increase their accuracy. Correct digital elevation models have a high similarity to reality and can be used in regional studies to determine the morphometric indicators of the territory.**

**Keywords: digital terrain model, remote sensing of the Earth, tree and shrub vegetation, normal Gaussian distribution, Lagrange interpolation polynomial, local interpolation.**

### References

1. Pavlova A. I. Analiz metodov interpolirovaniya vysot tochek dlya sozdaniya tsifrovyykh modeley rel'yefa [Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models] // *Avtometriya. Avtometriya*. 2017. Vol. 53, no. 2. P. 86–94. DOI: 10.15372/AUT20170210. EDN: YKFYZB. (In Russ.).
2. Kapralov E. G., Koshkarev A. V., Tikunov V. S. [et al.]. *Geoinformatika [Geoinformatics]* / Ed. by V. S. Tikunova. Moscow, 2010. 391 p. ISBN 978-5-7695-6468-0. (In Russ.).
3. Khromykh V. V., Khromykh O. V. Opyt avtomatizirovannogo morfometricheskogo analiza dolinnykh geosistem Yuzhnogo Pritom'ya na osnove tsifrovoy modeli rel'yefa [The experience of automatized morphometric analysis of geosystems based on digital elevation model of the tom valley] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Tomsk State University Journal*. 2007. No. 298. P. 208–210. EDN: KHNFOF. (In Russ.).
4. Jarvis A., Rubiano J., Nelson A. [et al.]. Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data // *Centro International de Agricultura Tropical (CIAT)*. Cali, Colombia, 2004. No. 198. 36 p. (In Engl.).
5. Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A. [et al.]. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results // *Archive Center and the Joint Japan-US ASTER Science Team*. 2011. 28 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/255280829\\_ASTER\\_Global\\_Digital\\_Elevation\\_Model\\_Version\\_2\\_-\\_Summary\\_of\\_validation\\_results](https://www.researchgate.net/publication/255280829_ASTER_Global_Digital_Elevation_Model_Version_2_-_Summary_of_validation_results) (accessed: 01.10.2023). (In Engl.).
6. Song C., Fan C., Zhu J. [et al.]. A comprehensive geospatial database of nearly 100 000 reservoirs in China // *Earth System Science Data*. 2022. No. 14 (9). P. 4017–4034. DOI: 10.5194/essd-14-4017-2022. (In Engl.).
7. Pavlova A. N. Geoinformatsionnoye modelirovaniye rechnogo basseyna po dannym sputnikovoy s"yemki STRM (na primere basseyna r. Tereshki) [Geoinformation modeling of the river basin based on STRM satellite imagery data (on the example of the Tereshki River basin)] // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Nauki o Zemle. Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*. 2009. Vol. 9, no. 1. P. 39–44. EDN: JVCBHW. (In Russ.).
8. Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R. [et al.]. A high-accuracy map of global terrain elevations // *Geophysical Research Letters*. 2017. No. 44 (11). P. 5844–5853. DOI: 10.1002/2017GL072874. (In Engl.).
9. Korotin A. S., Popov E. V. Otsenka tochnosti tsifrovyykh modeley rel'yefa, primenyayemykh dlya territorial'nykh issledovaniy [Evaluation of precision of digital elevation models used for territorial studies] // *GRAFIKON'2015. GRAPHICON'2015*. Moscow, 2015. P. 102–106. EDN: UNFQOB. (In Russ.).
10. Chernikhovskiy D. M. Otsenka svyazey morfometricheskikh kharakteristik rel'yefa s kolichestvennyimi i kachestvennyimi kharakteristikami lesov na osnove tsifrovyykh modeley rel'yefa ASTER i SRTM [Assessment of relationships of morphometric characteristics of relief with quantitative and qualitative characteristics of forests based on digital elevation models ASTER and SRTM] // *Sibirskiy lesnoy zhurnal. Siberian Journal of Forest Science*. 2007. No. 3. P. 28–39. (In Russ.).
11. Lefsky M. A. A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System // *Geophysical Research Letters*. 2010. No. 37 (15). P. 1–5. DOI: 10.1029/2010GL043622. (In Engl.).
12. Huili C., Qiuhua L., Yong L. [et al.]. Hydraulic correction method (HCM) to enhance the efficiency of SRTM DEM in flood modeling // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 559. P. 56–70. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.056. (In Engl.).
13. Hirt C. Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): The Maximum Slope Approach and its application for complete screening of the SRTM v4.1 and MERIT DEMs // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 207. P. 27–41. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.037. (In Engl.).
14. Takaku J., Iwasaki A., Tadono T. Adaptive filter for improving quality of ALOS PRISM DSM // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2016. P. 5370–5373. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730399. (In Engl.).
15. Robinson N., Regetz J., Guralnick R. P. EarthEnv-DEM90: a nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90 m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. No. 87. P. 57–67. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.11.002. (In Engl.).



16. Korotin A. S., Popov E. V. Rekonstruktsiya mestnosti na osnove otkorrektirovannykh tsifrovyykh modeley rel'yefa [Terrain reconstruction based on corrected digital elevation models] // Problemy mashinovedeniya. *Problems of Mechanical Engineering*. Omsk, 2019. P. 283–289. EDN: ZHFUDB. (In Russ.).
17. Gesch D., Oimoen M., Danielson J. [et al.]. Validation of the ASTER global digital elevation model version 3 over the conterminous United States // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague, Czech Republic, 2016. Vol. XLI-B4. P. 143–148. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-143-2016. (In Engl.).
18. Reuter H. I., Nelson A., Jarvis A. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data // International Journal of Geographical Information Science. 2007. No. 21 (9). P. 983–1008. DOI: 10.1080/13658810601169899. (In Engl.).
19. Bonin O., Rousseaux F. Digital terrain model computation from contour lines: how to derive quality information from artifact analysis // Geoinformatica. 2005. No. 9 (3). P. 253–268. DOI: 10.1007/s10707-005-1284-2. (In Engl.).
20. Oksanen J., Sarjakoski T. Uncovering the statistical and spatial characteristics of fine toposcale DEM error // International Journal of Geographical Information Science. 2006. No. 20 (4). P. 345–369. DOI: 10.1080/13658810500433891. (In Engl.).
21. Monckton C. G. An investigation into the spatial structure of error in digital elevation data // Innovations in GIS. London, 1994. P. 201–211. ISBN 978-0-429-20439-5. (In Engl.).
22. Wise S. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours // Hydrological Processes. 2000. No. 14 (11–12). P. 1909–1929. DOI: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/123.0.CO;2-6. (In Engl.).
23. Wise S. M., Lane S. N., Richards K. S. [et al.]. The effect of GIS interpolation errors on the use of DEMs in geomorphology // Landform Monitoring, Modeling and Analysis. Wiley, Chichester, 1998. P. 139–164. ISBN 978-0-471-96977-8. (In Engl.).
24. Florinsky I. V. Errors of signal processing in digital terrain modeling // International Journal of Geographical Information Science. 2002. No. 16 (5). P. 475–501. DOI: 10.1080/13658810210129139. (In Engl.).
25. Dvorkin B. A., Dudkin S. A. Noveyshiye i perspektivnyye sputniky distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Up-to-date and advanced remote sensing satellites] // Geomatika. *Geomatics*. 2013. No. 2. P. 16–36. EDN: SVUTID. (In Russ.).
26. Wise S. Cross-validation as a means of investigating DEM interpolation error // Computers & Geosciences. 2011. Vol. 37, no. 8. P. 987–991. DOI: 10.1016/j.cageo.2010.12.002. (In Engl.).
27. Sonyushkin A. V. Sovershenstvovaniye tekhnologiy sozdaniya ortofotoplanov po kosmicheskim izobrazheniyam vysokogo razresheniya [Improvement of technologies for creating orthophotomaps from high-resolution space images]. Moscow, 2015. 117 p. (In Russ.).

---

**KOROTIN Anton Sergeevich**, Senior Lecturer of Geoinformatics, Geodesy and Cadastre Department, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU), Nizhny Novgorod.  
SPIN-code: 8401-4026  
AuthorID (RSCI): 808295  
AuthorID (SCOPUS): 57216799168  
ORCID: 0009-0007-9636-3963  
ResearcherID: JHS-4533-2023  
Correspondence address: antonkorotin@yandex.ru

**POPOV Evgeny Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Engineering Graphics and Information Modeling Department, NNGASU, Nizhny Novgorod.  
SPIN-code: 8156-5998  
AuthorID (RSCI): 663542  
AuthorID (SCOPUS): 56585437200  
ORCID: 0000-0002-3058-2369  
ResearcherID: F-6001-2013  
Correspondence address: popov\_eugene@list.ru

#### For citations

Korotin A. S., Popov E. V. Assessment of the accuracy of open digital terrain models // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 3 (191). P. 64–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-64-72.

Received February 27, 2024.

© A. S. Korotin, E. V. Popov