Научная статья
УДК 913
doi: 10.17223/25421379/22/8

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫСОТ – SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM И MERIT DEM НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНОЙ И ПОЙМЕННОЙ ЗОНЫ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НИЖНЯЯ КАМА»

Станислав Сергеевич Рязанов[1], Валентина Ивановна Кулагина[2]

[1, 2] Институт проблем экологии и недропользования АН РТ (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан»), Казань, Россия
[1] RStanislav.soil@gmail.com
[2] viksoil@mail.ru

Аннотация. Оценена вертикальная точность четырех наиболее распространенных глобальных и квазиглобальных моделей высот на примере залесенных террасовых и открытых пойменных участков национального парка «Нижняя Кама». Оценка проведена в сравнении с цифровой моделью рельефа, построенной на основе топографической карты масштаба 1:100000. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) отображения абсолютных высот лесных зон парка представлена в убывающем порядке: ALOS WORLD 3D (17,71 м), ASTER GDEM (12,18 м), SRTM (9,19 м), MERIT DEM (7,80 м). Среднеквадратичная ошибка определения абсолютных высот для пойменных участков уменьшается в ряду: ASTER GDEM (8,39 м), ALOS WORLD 3D (4,68 м), SRTM (4,48 м), MERIT DEM (3,35 м).

Ключевые слова: *цифровая модель рельефа, цифровая модель высот, моделирование рельефа, растительность, ALOS WORLD 3D, SRTM, ASTER GDEM, MERIT DEM*

Для цитирования: Рязанов С.С., Кулагина В.И. Сравнительная оценка вертикальной точности цифровых моделей высот – SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM и MERIT DEM на примере лесной и пойменной зоны национального парка «Нижняя Кама» // Геосферные исследования. 2022. № 1. С. 107–117. doi: 10.17223/25421379/22/8

Original article
doi: 10.17223/25421379/22/8

COMPARATIVE ACCURACY ASSESSMENT OF DIGITAL ELEVATION MODELS (SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM, MERIT DEM) ON THE EXAMPLE OF FOREST AND FLOODLAND ZONES OF THE NATIONAL PARK “NIZHNYAYA KAMA”

Stanislav S. Ryazanov[1], Valentina I. Kulagina[2]

[1, 2] Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution «Tatarstan Academy of Sciences»), Kazan, Russia
[1] RStanislav.soil@gmail.com
[2] viksoil@mail.ru

Abstract. Background. Digital elevation models are important data sources for solving a number of practical and scientific problems. All available global remote sensing data are digital surface models by definition as they represent an earth surface with all natural and man-made objects on it. At the moment, there is no globally consistent digital terrain model, which is free of building and trees canopy and represents relief itself. A significant contribution to the creation of such models was made by D. Yamazaki et al., presented “Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM” (MERIT DEM). The novelty of this terrain model is that it attempts to remove vegetation bias and other random and systematic errors of the other sources, such as SRTM and ALOS WORLD 3D. The current study was performed to assess the local accuracy of the MERIT DEM, as well as other four open DEMs in comparison to topographical survey data on the example of the forest and floodplain areas. Materials and methods. Accuracy assessment was performed on the example of the National Park “Nizhnyaya Kama”, located on the north-east part of the Republic of Tatarstan, Russia (Fig. 1). Four digital elevation models were assessed: SRTM, ASTER GDEM, ALOS WORLD 3D and MERIT DEM. Available data of topographic maps at a scale of 1:100,000 were used as the assessment basis. The topographic data was vectorized and interpolated using Multilevel B-Splines (MBS) (Fig. 2a). A test subset (2,000 points) was sampled from the vectorized topographic data, including contour lines points and single landmark points (Fig. 2b). The test subset was used to calculate accuracy metrics: absolute values of minimal and maximal elevation difference, mean difference, Pearson’s correlation coefficient, and root-mean-square error (RMSE). In addition, vertical profiles were extracted from the elevation models. Results. The interpolated elevation model MBS was characterized by the highest accuracy as expected. The

© Рязанов С.С., Кулагина В.И., 2022

RMSE = 1.67, and near-zero mean error allowed to conclude adequate representation of the park's relief. The range of elevation values for the forest areas were 54.27–176.11 m with the mean of 109.39 (Fig 3a). The remote sensed digital elevation models had the lowest accuracies (Table 1). The elevation values were 6.08–15.88 m higher than the actual topographical data. The corrected model MERIT DEM had the lowest error values in comparison to the remote sensed models. Nevertheless, the mean error and RMSE of the MERIT DEM were higher than of the interpolated MBS model. In the floodplain areas the models were ordered in the following order by the increase of the mean elevation: ASTER GDEM (50.1 m) < SRTM (52.3 m) < MBS (55.1 m) < ALOS WORLD 3D (57.2 m) < MERIT DEM (57.4 m). The mean errors and root mean squared errors of the remote sensed DEMs were lower in comparison to the forest areas (Table 2). Conclusion. The results showed that the overall accuracy of open digital elevation models increase in the order of ASTER GDEM < ALOS WORLD 3D < SRTM < MERIT DEM. The vertical profiles showed high noisiness of the ASTER GDEM and ALOS WORLD 3D for the forest and floodplain areas of the park.

Keywords: *elevation map, digital terrain model, DTM, DEM, DSM*

For citation: Ryazanov, S.S. & Kulagina, V.I. (2022) Comparative accuracy assessment of digital elevation models (SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM, MERIT DEM) on the example of forest and floodland zones of the national park "Nizhnyaya Kama". *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 107–117. doi: 10.17223/25421379/22/8

Введение

Цифровые модели высот (digital elevation model, DEM) – важный источник данных для решения ряда практических и научных задач [Kenward, 2000]. В общем определении цифровая модель высот – это трехмерная проекция земной поверхности. Их, в свою очередь, можно разделить на две группы: цифровые модели рельефа (digital terrain model, DTM), свободные от деревьев, зданий и других объектов; цифровые модели поверхности (digital surface model, DSM), которые описывают земную поверхность со всеми природными и искусственными объектами на ней [Alganci et al., 2018].

Существуют три основных источника данных о рельефе: оцифрованные топографические карты; полевые данные, полученные с использованием инструментальной геопривязки, и данные дистанционного зондирования, полученные при помощи различных видов аэро- и космосъемки. Каждый из источников имеет свои преимущества и недостатки.

Проекты по созданию глобальной модели высот берут свое начало еще до массового применения спутниковых данных. Из наиболее распространенных стоит отметить следующие.

GTOPO30 – глобальная цифровая модель высот с пространственным разрешением 30 угловых секунд (примерно 1 км). Данная модель высот представлена в 1996 г. Центром наблюдения за ресурсами Земли и науки Геологической службы США (U.S. Geological Survey). Модель составлена из различных картографических источников путем их цифровизации и последующей интерполяции, охватывает территорию Земли от 90° с.ш. до 90° ю.ш. [Gesch et al., 1999].

GLOBE (Global Land One-kilometer Base Elevation) – проект международной команды, первая версия продукта появилась в 1999 г. Основные характеристики такие же, как и у GTOPO30, – пространственное разрешение составляет 30 угловых секунд, охват от 180° з.д. до 180° в.д. и от 90° с.ш. до 90° ю.ш. В основе GLOBE лежат 11 источников данных, многие из которых также являются составными продуктами. Вышеупомянутый GTOPO30, в том числе, служил одной из основ при создании GLOBE [Global…, 1999].

Явным недостатком цифровых моделей высот, составленных из множества источников, является неоднородность их характеристик – метода составления, показателей точности, датума и пр. [Global…, 1999]. Результаты космической съемки изначально лишены данного недостатка. Особую популярность среди открытых источников дистанционных данных о рельефе земной поверхности получили несколько проектов:

SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) – радиолокационная топографическая миссия шаттла. SRTM – совместный проект NASA и NIMA (США), а также немецкого центра Deutsches Zentrum fur Luft- and Raumfahrt по использованию радиолокационного интерферометра на борту космического шаттла для создания глобально согласованной цифровой карты высот для широт южнее 60° с.ш. и севернее 60° ю.ш. с пространственным разрешением в 1 угловую секунду (примерно 30 м) [Kocak, 2005]. Съемка проведена в феврале 2000 г.

ASTER DEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) – модель высот, полученная NASA в 1999 г. с использованием стереоскопических фотографий земной поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне. Пространственное разрешение выше, чем у SRTM, и составляет 15 м.

ALOS World 3D – еще один глобальный проект создания цифровой модели поверхности/высот, полученный на основе данных Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) на борту Advanced Land Observing Satellite (ALOS). Проект запущен Японским агентством аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) с коммерческими партнерами NTT DATA Corp. и Remote Sensing Technology Centre of Japan (RESTEC) в 2006 г. [Tadono et al., 2014].

Все данные дистанционного зондирования Земли, в том числе перечисленные выше, по определению являются моделями поверхности [Elkhrachy, 2018]. В то же время задачи геоморфологического анализа и моделирования, почвенного картографирования, экологического анализа, учитывающие абсолютное или относительное положение в рельефе, по понятным причинам должны проводится на основе моделей рельефа. Особые сложности в этой связи вызывают задачи изучения залесенных территорий. Применение цифровых моделей высот в этом случае требует предварительной коррекции. В работах [Gallant et al., 2012; Baugh et al., 2013] такая коррекция была выполнена путём смещения на высоту древесного покрова.

6. Цифровая модель рельефа *MERIT (Multi-Error-Removed Improved-Terrain)* представлена D. Yamazaki и соавт. [2017], как глобально согласованная цифровая модель рельефа с высокой вертикальной точностью. Данная ЦМР разработана на основе нескольких цифровых моделей поверхности, включая данные SRTM и ALOS WORDL 3D. Повышение точности достигается за счет коррекции систематических и случайных ошибок, а также коррекции смещения на высоту деревьев на лесных участках. Смещение на высоту деревьев оценивалось на основе сравнения цифровых моделей высот, глобальных данных лесного покрова и данных дистанционного зондирования ICESat [Yamazaki et al., 2017].

Цель настоящей работы состояла в сравнении вертикальной точности различных цифровых моделей высот на примере залесенных и свободных от лесного покрова участков. В качестве примера выступила территория национального парка «Нижняя Кама». Проведена оценка возможности применения скорректированной модели рельефа MERIT для локального геоморфологического анализа залесенных территорий.

Объекты и методы

Область исследования. Национальный парк «Нижняя Кама» 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, а также двух пойменных участков общей площадью 8 259 га (рис. 1).

Рельеф водораздельных участков эрозионно-денудационный склоновый с абсолютными отметками 63–180 м. Для правобережья р. Кама характерны эоловые формы рельефа, с параболическими и продольными дюнами, эоловыми буграми и котловинами выдувания. Левобережье р. Кама сложено элювиальными нерасчлененными четвертичными отложениями. Рельеф представлен невысокими поверхностями с незначительными врезами рек. Пойменные участки – аллювиальные равнины с незначительными перепадами высот до 6 м над нормальным подпорным уровнем Нижнекамского водохранилища.

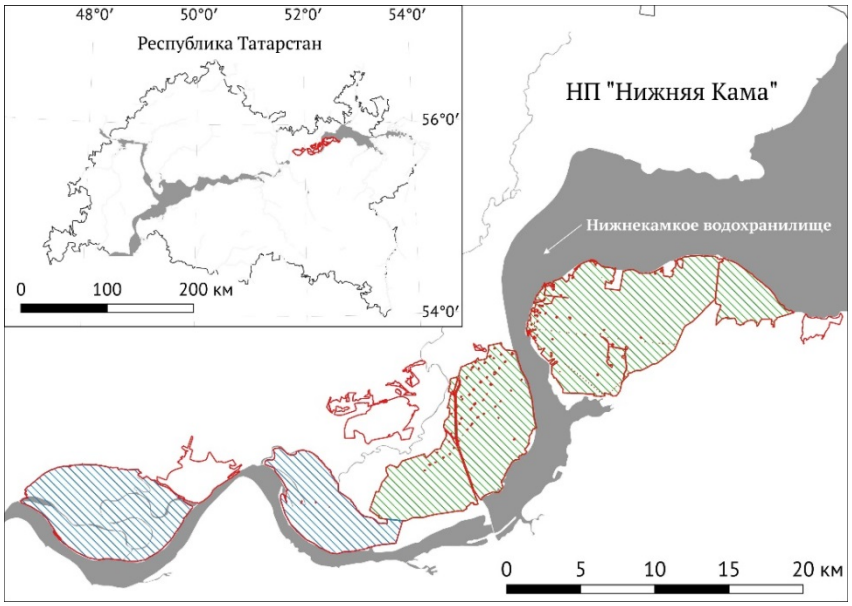

Рис. 1. Территория Национально парка «Нижняя Кама». Штриховкой выделены участки, использованные для оценки моделей рельефа: зеленым – лесные участки, синим – пойменные участки

Fig. 1. The territory of the National Park “Nizhnyaya Kama”; shaded zones indicate areas used for terrain models assessment: green color – forest areas, blue color – floodplain areas

Модели высот и предварительная обработка. В работе проведено сравнение четырех глобальных и квазиглобальных цифровых моделей высот:

– SRTM. В работе использовалась третья версия данной модели высот, представленная NASA в 2015 г. Исходный продукт имеет пространственное разрешение в 1 угловую секунду (примерно 30 м). Предыдущие исследования вертикальной точности сообщали о среднеквадратичной ошибке в 12,4 и 11,9 м на территории Европы и Евразии, соответственно. Локальные исследования точности дают оценку в 6,5 м [Alganci et al., 2018];

– ALOS WORLD 3D. В работе использована вторая версия коррекции ошибок. Изначально модель рельефа разработана с пространственным разрешением 5 м, однако открытая некоммерческая версия имеет разрешение в 1 угловую секунду. Предыдущие работы оценивают точность данной модели высот в 3,7–5,7 м [Alganci et al., 2018];

– ASTER GDEM. Использована третья версия модели высот, выпущенная NASA в 2019 г. Исходное пространственное разрешение составляет 30 м. Локальный анализ точности модели второй версии показывал среднеквадратичную ошибку в 6,9 м [Alganci et al., 2018];

– MERIT DEM. Исходные растровые данные имеют пространственное разрешение в 3 угловые секунды (примерно 90 м) [Yamazaki et. al. 2017]. Показано, что глобальный прирост точности модели MERIT составил 39 % относительно исходных моделей высот.

Все перечисленные источники изначально поставляются в системе координат WGS84, значения растров представляют ортометрические высоты на основе геоида EGM96. Для анализа модели высот были перепроецированы на растр с разрешением 90 м.

Подготовка контрольных 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. 2, a). Согласно ГКИНП-30, «на топографических картах масштабов 1:25 000, 1:50 000 и 1:100 000 средние ошибки в положении горизонталей по высоте относительно ближайших точек съемочного обоснования не должны превышать в плоскоравнинных районах, соответственно, 1, 3 и 6 м и в равнинных, пересеченных и всхолмленных районах с преобладающими углами наклона до 6° – 2, 4 и 9 м» [ГКИНП-30, 1977].

Данные топосъемки были вручную векторизованы и перепроецированы в систему координат WGS84 для дальнейшего анализа. Итоговая топографическая основа представлена отдельными характерными точками местности (634 точки), а также векторным слоем горизонталей, который для проведения интерполяции конвертировался в точечный слой (всего 29 895 узлов).

Для сравнения цифровых моделей рельефа с данными о рельефе, полученных при помощи оцифровки топографической карты, была проведена пространственная интерполяция значений топографической съемки при помощи метода иерархических базисных сплайнов (Multilevel B-Splines, MBS). В данной работе использована реализация алгоритма, представленная в ГИС SAGA [Conrad et al., 2015]. Данный метод основан на применении аппроксимации на основе B-сплайнов для контрольных сеток с последовательно увеличивающимся разрешением. Подробное описание алгоритма доступно в работе S. Lee и соавт. [1997]. Максимальный уровень аппроксимации (‘Maximum level’ программе SAGA GIS) – основной параметр, определяющий степень сглаженности итоговой интерполированной поверхности. Чем больше параметр, тем меньше расхождение с точечными данными. Для построения ЦМР в работе применялся уровень ‘Maximum level’ = 14.

Оценка точности. Точность цифровых моделей рельефа/поверхности, а также точность интерполяции топографических данных оценивалась на основе набора проверочных точек (2 тыс. шт.), стратифицированным случайным образом отобранных из исходного набора топографических данных. В тестовую выборку попали как точки, входящие в изолинии, так и отдельные характерные точки местности. Расположение точек тестирования представлено на рис. 2, b.

Для тестовых точек вычислялись следующие показатели: модуль минимальной и максимальной разницы между значениями топографических данных и оцениваемыми моделями высот, средняя разница, коэффициент корреляции по Пирсону, среднеквадратичная ошибка (*RMSE*) [Elkhrachy, 2018]. Расчет *RMSE* проводился согласно формуле

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

где: v_{ri} – референсная высота в точке i; v_{mi} – высота по оцениваемой карте высот в точке i; n – количество контрольных точек.

Также оценены вертикальные продольные профили для различных географических направлений для всех оцениваемых моделей рельефа/высот. Расположение профилей представлено на рис. 2, b.

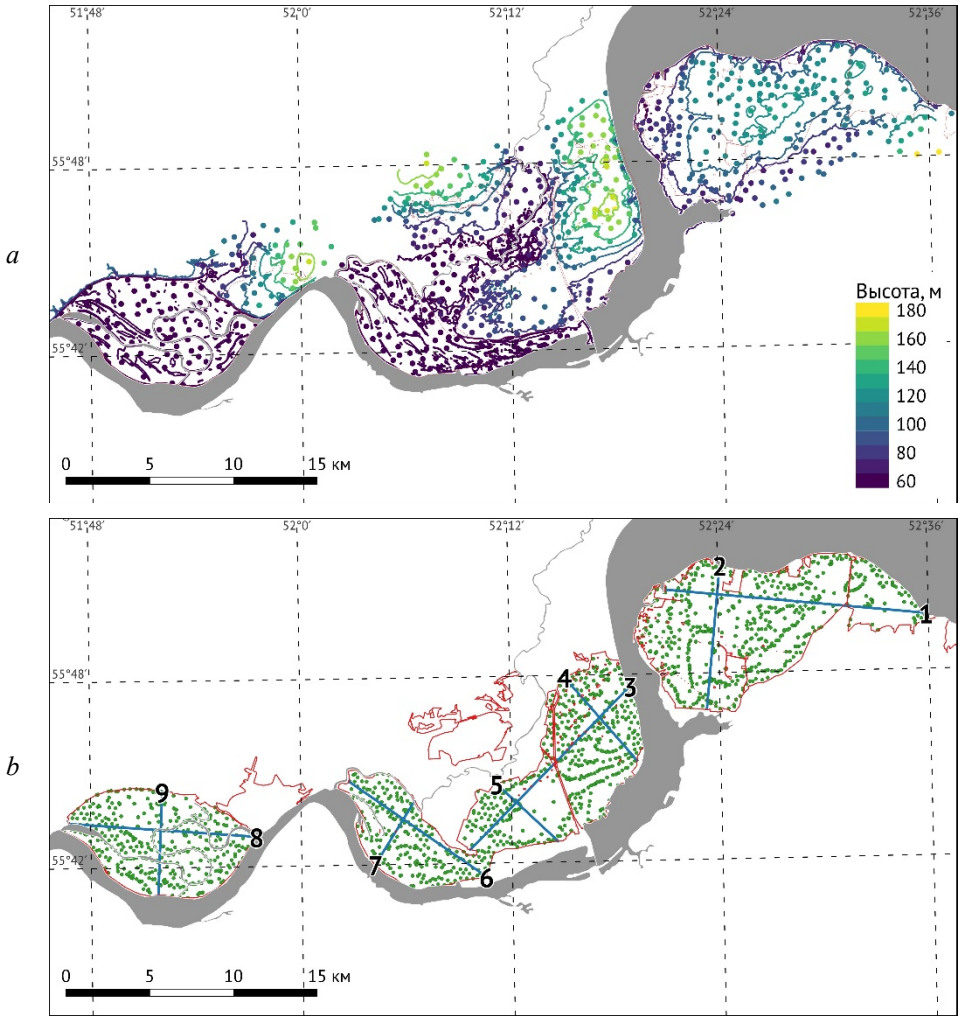

Рис. 2. Топографические данные, использованные для интерполяции (a); расположение точек, использованных для оценки точности, и продольные профили (b)

Fig. 2. Topographic data used for interpolation (a); location of points used to assess accuracy and vertical profiles (b)

Результаты и обсуждение

Лесные участки. На рис. 3 отображены карты моделей высот лесных участков национального парка «Нижняя Кама», в том числе на рис. 3, а – модель рельефа, полученная путем интерполяции топографических данных методом MBS.

После этапов предварительной обработки проведена оценка точности цифровых моделей рельефа и высот. Для лесных участков выборка проверочных точек состояла из 402 характерных точек местности и 905 узлов изолиний. Результаты приведены в табл. 1.

Модель рельефа MBS, полученная путем интерполяции топографических данных, ожидаемо обладает наибольшей точностью. Среднеквадратичная ошибка *RMSE* = 1,67 м, а также околонулевое значение средней ошибки позволяют заключить, что итоговая карта адекватно отражает рельеф национального парка «Нижняя Кама». Размах высотных значений для лесных участков парка составляет 54,27–176,11 м со средней высотой 109,39 м (рис. 3, а).

Модели высот – продукты дистанционного зондирования Земли – обладают наибольшей погрешностью для лесных территорий (табл. 1). Это также закономерный результат, поскольку данные модели отражают поверхность Земли со всеми находящимися на ней объектами. При этом значения высот моделей в среднем на 6,08–15,88 м выше в сравнении с топографической съемкой. Более низкие значения среднеквадратичной ошибки и средней ошибки модели SRTM можно объяснить эффектом проникновения радарного сигнала вглубь кроны деревьев, в зависимости от их густоты и плотности покрытия [Miliaresis, Delikaraoglou, 2009].

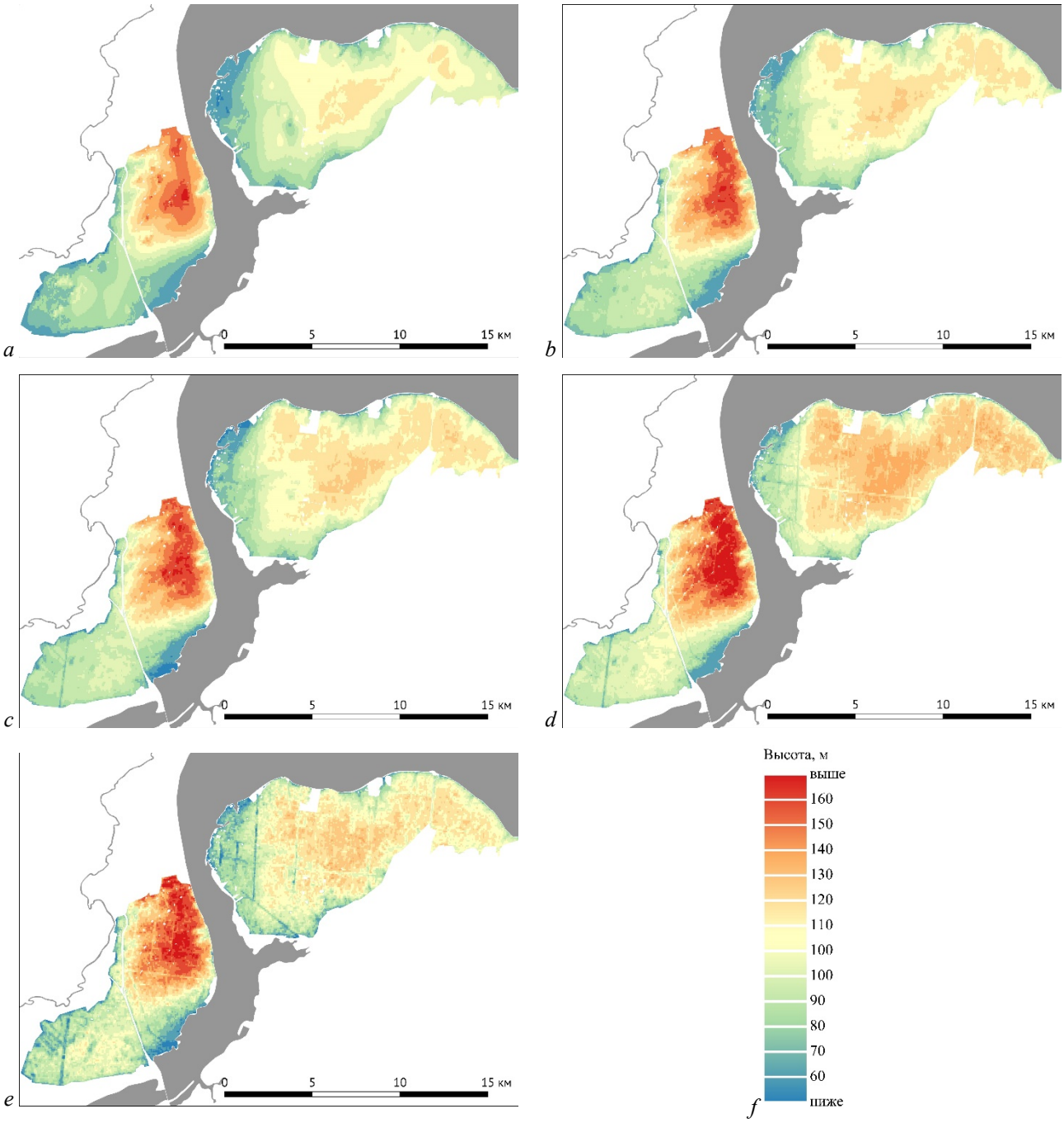

Рис. 3. Визуализация моделей высот для лесных зон
a – MBS; b – MERIT DEM; c – SRTM; d – ALOS WORLD 3D; e – ASTER GDEM, f – легенда

Fig. 3. Elevation models for forest areas
a – MBS; b – MERIT DEM; c – SRTM; d – ALOS WORLD 3D; e – ASTER GDEM; f – Legend

Размах значений данных SRTM для обследуемой территории составляет 56,04–178,52 м, среднее 110,64 м; размах данных ALOS WORLD 3D равен 58,42–188,24 м, среднее 120,14 м; размах высот ASTER GDEM составляет 40,56–186,77 м, среднее 112,18 м. В целом данные модели высот можно расположить в следующем порядке по увеличению точности отображения рельефа лесных зон обследуемой территории: ALOS WORLD 3D < ASTER GDEM < SRTM (табл. 1).

Авторы представили глобальную модель рельефа *MERIT DEM* как результат коррекции систематиче-

ских и случайных ошибок существующих на тот момент версий SRTM, ALOS WORLD 3D и др. Также отмечается, что данная модель прошла процедуру коррекции смещения на высоту деревьев [Yamazaki et al., 2017]. Для территории обследования цифровая модель рельефа MERIT действительно обладает наименьшей погрешностью относительно топографической съемки как по показателю среднеквадратичной ошибки, так и по значениям максимальной разницы (табл. 1). Данная DEM также характеризуется наименьшим смещением (средней ошибкой) относительно топографии в сравнении с другими открытыми источниками данных о рельефе. Вместе с тем метрики ошибок остаются высокими относительно интерполированной модели MBS, что позволяет заключить о недостаточной коррекции смещения на высоту деревьев в данном локальном случае.

Второй этап оценки точности цифровых моделей заключался в оценке пяти продольных профилей; их расположение представлено на рис. 2, b. Итоговые профили для DEM и профиль интерполированных данных топографической съемки представлены на рис. 4. Продольные профили рельефа подтверждают результаты точечной оценки точности данных SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM и MERIT DEM.

Наибольшим смещением относительно земной поверхности обладают данные модели высот ALOS WORLD 3D. При оценке абсолютных значений по всей территории обследования разница между ALOS WORLD 3D и топографической съемкой лежит в пределах от –24,15 м до 45,4 м при среднем значении в 17,51 м.

Профили цифровой модели MERIT практически полностью повторяют профили данных SRTM, на которой она, вероятно, была основана в первую очередь (Pearson's $r = 0{,}99$, $p < 0{,}001$). Разница высот между моделями SRTM и MERIT DEM составляет в среднем 1,25 м (размах –17,17–9,14 м). Создателям данной модели лишь частично удалась коррекция ошибок и смещения на высоту деревьев – различия с данными топосъемки лежат в пределах от –18,25 до 30,76 м со средним в 6,76 м.

Профили моделей ALOS WORLD 3D и ASTER GDEM характеризуются наибольшей зашумленностью (рис. 4). Данные модели также имеют наименьшую корреляцию с данными топографических карт (табл. 1).

Минимальные погрешности для всех моделей рельефа в сравнении с интерполированной топосъемкой наблюдаются для открытых участков местности – лугов, дорожных участков, вырубок, что выражается в схожести профилей на локальных понижениях (рис. 4).

Пойменные участки. Цифровые модели рельефа относительно ровных пойменных участков с незначительными перепадами высот (53–60 м по данным топографической карты) отличаются значительной неоднородностью отображения территории (рис. 5). Так, модели можно ранжировать по увеличению средней высоты: ASTER GDEM (50,1 м) < SRTM (52,3 м) < MBS (55,1 м) < ALOS WORLD 3D (57,2 м) < MERIT DEM (57,4 м). Коэффициент вариации модели высот ASTER GDEM составляет 11,1 %, для остальных – меньше 6 %.

Оценка точности пойменных участков национального парка проведена на основе 127 характерных точек местности и 565 узлов изолиний (рис. 1). Результаты приведены в табл. 2.

Оценка точности цифровых моделей высот относительно данных топографических карт показывает значительно меньшие значения среднеквадратичной ошибки для пойменных зон в сравнении с территорией парка, занятого лесом (табл. 2). По точности отображения рельефа модели высот можно расположить в следующем порядке: ASTER GDEM < ALOS WORLD 3D < SRTM < MERIT DEM < MBS. Коэффициент корреляции данных дистанционных моделей рельефа значительно меньше, чем для лесных участков. Это объясняется малым разбросом высот данной территории.

Таблица 1

Метрики точности цифровых моделей высот для лесных участков

Table 1

Accuracy metrics of digital elevation models for the forest areas

Модель высот	|Min Err|	|Max Err|	*ME*	*RMSE*	Pearson's *r*
MBS	0,00	21,12	–0,11	1,67	1,00
MERIT DEM	0,01	25,46	5,75	7,80	0,97
SRTM	0,04	35,80	6,83	9,19	0,96
ALOS WORLD 3D	0,01	35,87	15,88	17,71	0,95
ASTER GDEM	0,00	43,54	8,09	12,18	0,93

Примечание. |Min Err| – модуль минимального значения ошибки; |Max Err| – модуль максимального значения ошибки; *ME* – средняя ошибка; *RMSE* – среднеквадратичная ошибка; Pearson's *r* – коэффициент корреляции по Пирсону.

Notes. |Min Err| – the modulus of the minimum error value; |Max Err| – the absolute value of the error; *ME* – the mean error; *RMSE* – the root mean square error; Pearson's *r* – the Pearson correlation coefficient.

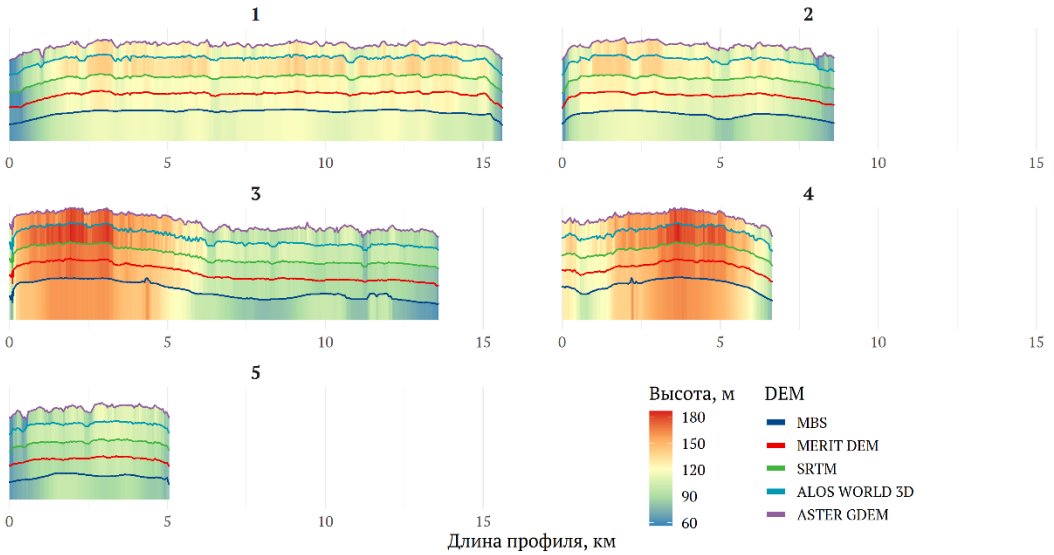

Рис. 4. Продольные профили лесных участков Национального парка «Нижняя Кама»

Fig. 4. Vertical profiles of the forest areas of the National Park “Nizhnyaya Kama”

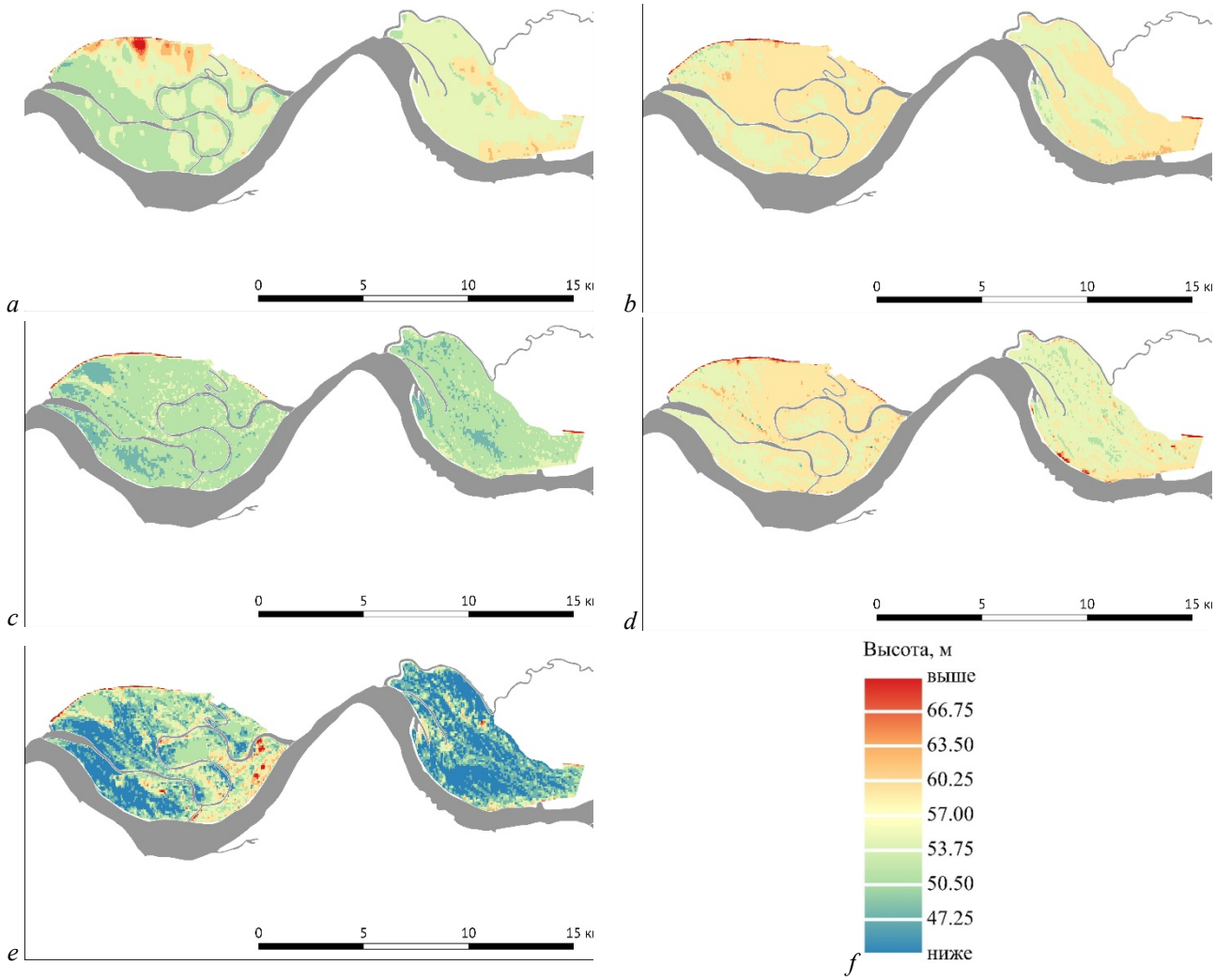

Рис. 5. Визуализация моделей высот для пойменных зон

a – MBS; b – MERIT DEM; c – SRTM; d – ALOS WORLD 3D; e – ASTER GDEM, f – легенда

Fig. 5. Elevation models for floodplain areas

a – MBS; b – MERIT DEM; c – SRTM; d – ALOS WORLD 3D; e – ASTER GDEM; f – Legend

Таблица 2

Метрики точности цифровых моделей высот для пойменных участков

Table 2

Accuracy metrics of digital elevation models for the floodplain areas

Модель	|Min Err|	|Max Err|	*ME*	*RMSE*	Pearson's *r*
MBS	0,00	14,74	0,08	1,22	0,90
MERIT DEM	0,02	19,74	2,18	3,35	0,55
SRTM	0,00	21,43	–2,94	4,48	0,52
ALOS WORLD 3D	0,01	32,65	2,11	4,68	0,41
ASTER GDEM	0,00	36,22	–5,32	8,39	0,34

Примечания. |Min Err| – модуль минимального значения ошибки; |Max Err| – модуль максимального значения ошибки; *ME* – средняя ошибка; RMSE – среднеквадратичная ошибка; Pearson's *r* – коэффициент корреляции по Пирсону.

Notes. |Min Err| – the modulus of the minimum error value; |Max Err| – the absolute value of the error; *ME* – the mean error; *RMSE* – the root mean square error; Pearson's *r* – the Pearson correlation coefficient.

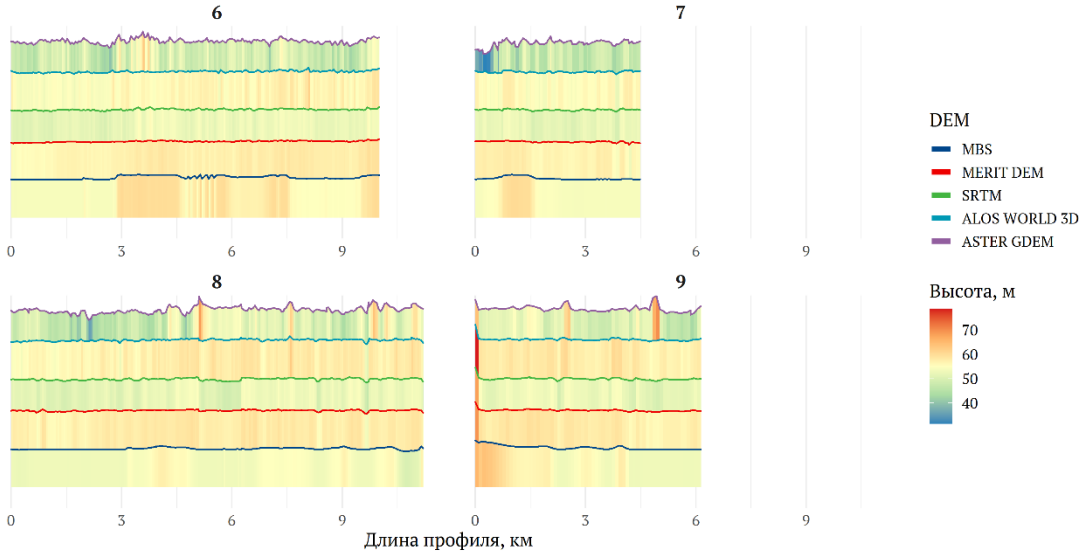

Рис. 6. Продольные профили пойменных участков Национального парка «Нижняя Кама»

Fig. 6. Vertical profiles of the forest areas of the National Park "Nizhnyaya Kama"

Средняя ошибка указывает на то, что модели SRTM и ASTER GDEM недооценивают значения высот пойменных участков на 2,94 и 5,32 м соответственно. Действительно, минимальные значения этих моделей оказываются даже ниже нормального подпорного уровня водохранилища – 50,1 м у ASTER GDEM и 52,3 м у SRTM.

Таким образом, можно заключить, что скорректированная модель рельефа MERIT DEM является наиболее подходящим источником данных о рельефе из всех рассмотренных. Интересно, что данная модель не показывает такого же смещения, как SRTM, но которой она основана. При этом коэффициент корреляции модели MERIT DEM и модели SRTM наибольший и составляет $r = 0{,}95$ ($p < 0{,}00$).

Профили моделей высот также подтверждают полученные результаты (рис. 6). Модель высот ASTER GDEM аналогично показывает наиболее зашумленные профили для пойменной территории. Наиболее плавные перепады высот наблюдаются у цифровой модели MERIT DEM, коэффициент вариации для нее был наименьшим и составил 4,0 %. Это, в свою очередь, может мешать при расчете гидрологических параметров данной территории. Так, профили MERIT DEM имеют незначительные перепады высот при пересечении русла рек (профили 9 и 8), которые наиболее отчетливо представлены на профилях интерполированной модели MBS и дистанционной модели SRTM.

Заключение

Цифровые модели высот – необходимые источники данных для множества прикладных задач. Настоящая работа приводит результаты сравнения четырех открытых цифровых источников данных о

рельефе на примере террасовых и пойменных зон национального парка «Нижняя Кама» с использованием метрик локальной точности. Оценка высотной точности, а также результаты сравнения с интерполированными данными топографической карты масштаба 1:100 000 показывают, что рассмотренные модели высот, полученные методами дистанционного зондирования, можно расположить в следующем порядке по увеличению точности: ASTER GDEM < ALOS WORLD 3D < SRTM. Продольные профили моделей высот показывают высокую зашумленность ASTER GDEM и ALOS WORLD 3D как для участков, занятых лесным покровом, так и для открытых пойменных территорий. Применение данных моделей в прикладных задачах потребует дополнительных этапов сглаживания. Среднее вертикальное смещение моделей ASTER GDEM, ALOS WORLD 3D и SRTM, вызванное плотным лесным покровом территории обследования, составило 6,83–15,88 м. Для открытых пойменных участков значения средней ошибки менее значительны. Модели SRTM и ASTER GDEM показывают недооценку абсолютных высот (–2,94 и –5,32 м соответственно), в то время как модель ALOS WORLD 3D переоценивает высоты в среднем на 2,11 м.

Из всех рассмотренных моделей высот наибольшей точностью характеризуется модель MERIT DEM, представленная D. Yamazaki и соавт. [2017], как результат коррекции систематических и случайных ошибок других моделей рельефа. Среднеквадратичная ошибка для лесных и пойменных участков составила 7,80 и 3,35 м соответственно, что меньше соответствующих оценок для ASTER GDEM, ALOWS WORLD 3D и SRTM, но превышает ошибку интерполированных значений топографической карты. Это в свою очередь, ограничивает применение данной модели для практических задач.

Список источников

ГКИНП-30. Геодезические, картографические инструкции нормы и правила. Основные положения по содержанию топографических карт масштабов 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000 [Текст] // Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. 1977.

Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models // IJGI. 2018. V. 7, No. 3. P. 114. doi: 10.3390/ijgi7030114

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

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 // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. P. 1991–2007. doi: 10.5194/gmd-8-1991-2015

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. V. 9, No. 4. P. 1807–1817. doi: 10.1016/j.asej.2017.01.007

Gallant J.C., Read A.M., Dowling T.I. Removal of tree offsets from SRTM and other digital surface models // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2012. V. XXXIX-B4. P. 275–280. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-275-2012

Gesch D.B., **Verdin K.L.**, **Greenlee S.K.** New land surface digital elevation model covers the Earth // Eos Trans. AGU. 1999. V. 80, No. 6. P. 69. doi: 10.1029/99EO00050

Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE). Digital Elevation Model, Version 1.0. Documentation Version 1.0 / eds. by D.A. Hastings, P.K. Dunbar. Boulder, Colorado : United States Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1999. 139 p.

Kenward T. Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions // Remote Sensing of Environment. 2000. V. 74, No. 3. P. 432–444. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00136-X

Kocak G. Accuracy assessment of interferometric digital elevation models derived from the Shuttle Radar Topography Mission X- and C-band data in a test area with rolling topography and moderate forest cover // Opt. Eng. 2005. V. 44, No. 3. P. 036201. doi: 10.1117/1.1870000

Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines // IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics. 1997. V. 3, No. 3. P. 228–244. doi: 10.1109/2945.620490

Miliaresis G., Delikaraoglou D. Effects of Percent Tree Canopy Density and DEM Misregistration on SRTM/NED Vegetation Height Estimates // Remote Sensing. 2009. V. 1, No. 2. P. 36–49. doi: 10.3390/rs1020036

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. V. II-4. P. 71–76. doi: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014

Yamazaki D., **Ikeshima D.**, **Tawatari R.**, **Yamaguchi T.**, **O'Loughlin F.**, **Neal J.C.**, **Sampson C.C.**, **Kanae S.**, **Bates P.D.** A high-accuracy map of global terrain elevations // Geophysical Research Letters. 2017. P. 10.

References

GKINP-30. Geodezicheskie, kartograficheskie instruktsii normy i pravila. Osnovnye polozheniya po soderzhaniyu topograficheskikh kart masshtabov 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000 [Geodetic, cartographic instructions norms and rules. Basic provisions on the content of topographic maps of scales 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000] // Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR [Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR]. 1977. In Russian

Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models // IJGI. 2018. V. 7 (3). pp. 114. doi: 10.3390/ijgi7030114

Baugh C.A., Bates P.D., Schumann G., Trigg M.A. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy // Water Resour. Res. 2013. V. 49 (9). pp. 5276–5289. doi: 10.1002/wrcr.20412

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 // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. pp. 1991–2007. doi: 10.5194/gmd-8-1991-2015

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. V. 9 (4). pp. 1807–1817. doi: 10.1016/j.asej.2017.01.007

Gallant J.C., Read A.M., Dowling T.I. Removal of tree offsets from SRTM and other digital surface models // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2012. V. XXXIX-B4. pp. 275–280. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-275-2012

Gesch D.B., Verdin K.L., Greenlee S.K. New land surface digital elevation model covers the Earth // Eos Trans. AGU. 1999. Vol. 80 (6). p. 69. doi: 10.1029/99EO00050

Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE). Digital Elevation Model, Version 1.0. Documentation Version 1.0 / eds. D.A. Hastings, P.K. Dunbar. Boulder, Colorado: United States Departament of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1999. 139 p.

Kenward T. Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions // Remote Sensing of Environment. 2000. V. 74 (3). pp. 432–444. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00136-X

Kocak G. Accuracy assessment of interferometric digital elevation models derived from the Shuttle Radar Topography Mission X- and C-band data in a test area with rolling topography and moderate forest cover // Opt. Eng. 2005. V. 44 (3). pp. 036201. doi: 10.1117/1.1870000

Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines // IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics. 1997. V. 3 (3). pp. 228–244. doi: 10.1109/2945.620490

Miliaresis G., Delikaraoglou D. Effects of Percent Tree Canopy Density and DEM Misregistration on SRTM/NED Vegetation Height Estimates // Remote Sensing. 2009. V. 1 (2). pp. 36–49. doi: 10.3390/rs1020036

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. V. II-4. pp. 71–76. doi: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014

Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R., Yamaguchi T., O'Loughlin F., Neal J.C., Sampson C.C., Kanae S., Bates P.D. A high-accuracy map of global terrain elevations // Geophysical Research Letters. 2017. p. 10.

Информация об авторах:
Рязанов С.С., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан»), Казань, Россия.
E-mail: RStanislav.soil@gmail.com
Кулагина В.И., кандидат биологических наук, заведующая лабортаорией экологии почв, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан»), Казань, Россия.
E-mail: viksoil@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:
Ryazanov S.S., Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution «Tatarstan Academy of Sciences»), Kazan, Russia.
E-mail: RStanislav.soil@gmail.com
Kulagina V.I., Cand. Sci. (Biology), Head of Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution «Tatarstan Academy of Sciences»), Kazan, Russia.
E-mail: viksoil@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.11.2020; одобрена после рецензирования 11.12.2021; принята к публикации 18.03.2022.

The article was submitted 27.11.2020; approved after reviewing 11.12.2021; accepted for publication 18.03.2022