

25.00.35
УДК 528.8
DOI:

ГЕОИНФОРМАТИКА
10.37493/2308-4758.2023.3.4

Антонов С. А.,
Перегудов С. В.

Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр,
г. Михайловск, Россия

СРАВНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ
РЕЛЬЕФА

Введение.

ГИС-технологии позволяют анализировать большие массивы пространственных данных, к которым относятся и цифровые модели рельефа, полученные на основе материалов дистанционного зондирования Земли. Они представляют собой важный источник данных для расчета и картографирования различных явлений и процессов, которые находятся в тесной взаимосвязи с рельефом и охватывают обширные территории. В статье представлены результаты оценки точности трех наиболее популярных глобальных цифровых моделей рельефа: ALOS World 3D, SRTM, ASTER.

Материалы и методы
исследований.

Оценка цифровых моделей рельефа проводилась на территории Буденновского городского округа Ставропольского края. Анализ ошибок морфометрических показателей был выполнен на основе сравнения исследуемых цифровых моделей рельефа и данными Государственного научно-внедренческого центра геоинформационных систем и технологий (ГосГисЦентр), которые были представлены в виде топографических карт. Анализ результатов исследования проводился на основе математико-статистических методов. Суммарная выборка сравниваемых точек составила 5322.

Результаты исследований
и их обсуждение.

На основании полученного массива данных каждой из цифровых моделей местности проведен сравнительный анализ выборок. В результате определено, что наименьшую точность показала модель ASTER. Данные проекта SRTM показали незначительные отклонения. Наибольшей точностью обладает цифровая модель рельефа, построенная на базе данных ALOS W3D.

Выводы.

Несмотря на то, что рассматриваемые цифровые модели местности имеют схожие характеристики, были обнаружены отличительные особенности каждой из них. Полученные данные позволят упростить выбор наиболее подходящей цифровой модели местности с учетом требований, необходимых для выполнения различных задач, а также повысить точность получаемых результатов.

Ключевые слова:

цифровая модель местности, ЦММ, точность ЦМР, цифровая модель рельефа, ЦМР

Antonov S. A., North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center,
Peregudov S. V. Mikhailovsk, Russia

Comparison of Digital Relief Models

Introduction. GIS technologies make it possible to analyze large amounts of spatial data, which include digital elevation models derived from remote sensing data. They are an important source of data for calculating and mapping various phenomena and processes that are closely interrelated with the relief, and cover vast areas. The article presents the results of the accuracy assessment of the three most popular global digital elevation models: ALOS World 3D, SRTM, and ASTER.

Materials and research methods. The evaluation of digital elevation models was carried out on the territory of Budennovsky urban district of Stavropol Krai. Error analysis of morphometric indicators was performed based on the comparison of the studied digital elevation models and the data of the State Research and Development Center of Geoformation Systems and Technologies – GosGisCenter, which were presented in the form of topographic maps. The analysis of the results of the study was carried out based on mathematical and statistical methods. The total sample of compared points equals 5322.

Research results and their discussion. Based on the obtained dataset of each of the digital terrain models, a comparative analysis of the samples was carried out. As a result, it was determined that the ASTER model showed the lowest accuracy. SRTM project data showed insignificant deviations. The digital terrain model based on ALOS W3D data has the highest accuracy.

Conclusions. Despite its popularity and at first glance similarity of the data, a number of features of each of the digital terrain models were identified. The data obtained will simplify the selection of a digital terrain model, taking into account the requirements needed to perform various tasks, as well as improve the accuracy of the results obtained.

Keywords: digital elevation model, DEM, DTM accuracy, digital terrain model, DTM

Введение

Цифровые модели высот (Digital Elevation Model – DEM), полученные на основе данных дистанционного зондирования Земли, представляют собой ценные фундаментальные данные для различных наблюдений, в том числе связанных с сельским хозяйством – анализ эрозии, экспозиции пашни и т.д.

Цифровые модели высот делятся на 2 категории:

- цифровая модель местности (поверхности) (ЦММ) (от Digital Surface Model) и
- цифровая модель рельефа (ЦМР) (от Digital Terrain Model).

ЦММ отображает данные с учетом всех объектов, расположенных на поверхности (здания, лес и т.д.). ЦМР, напротив, отображает данные исключительно рельефа местности, без строений, лесов и т. д. [14].

Использование глобальных цифровых моделей высот позволяет получать различные морфометрические данные, которые используются как в прикладных работах, так и в научных [15].

При проведении наблюдений важно учитывать, что, несмотря на легкодоступность и распространенность, они имеют погрешности, вызванные сложным рельефом, деревьями, строениями и т.д. [16].

Картографирование различных показателей требует оценки точности данных. Точность ЦМР напрямую влияет на качество расчетов и технологические цепочки, поэтому важно выбрать наиболее подходящую цифровую модель с учетом цели, требований к точности и масштаба каждого исследования [17].

С учётом особенностей региона модели поверхности имеют различные показатели точности. Так в работе С.С. Рязанова на примере национального парка «Нижняя Кама» было определено, что данные SRTM и ASTER на участках с отсутствием древесной растительности ниже эталонных, а в модели ALOS они завышены [6].

В работе И.А. Ашаткина для оценки точности цифровых моделей местности использовались морфометрические показатели, такие как углы наклона и длины склонов. Сравнение результатов показало, что модели SRTM и AW3D30 более точно отображают углы наклона, в то время как модель ASTER GDEM v.2 более точно отображает длины склонов [2].

По данным наблюдений К.А. Мальцева, проводившихся в верховьях бассейна р. Ведуги, расположенного на восточном склоне

Среднерусской возвышенности, наибольшую точность показала модель SRTM [3].

Минеевым А.Л. установлено, что для Архангельской области наиболее подходящей из доступных цифровых моделей местности является ASTER GDEM [5].

Zhao Sh проведено сравнение двух цифровых моделей местности на территории Китая – ASTER GDEM и SRTM. В результате было определено, что наибольшую точность показала модель ASTER [24].

При анализе рельефа Филиппин с помощью ALOS, ASTER и SRTM Santillan было обнаружено, что все три модели преувеличивают значения высот. Однако измерения высоты с использованием AW3D30 были признаны наиболее точными [7].

Таким образом, можно сказать, что точность цифровых моделей высот является неоднородной.

В нашем исследовании цифровые модели местности, полученные от различных спутников, сравнивались для оценки их точности на территории Буденновского городского округа Ставропольского края. В рамках этого исследования были использованы данные наиболее популярных глобальных цифровых моделей, находящихся в свободном доступе: ASTER, SRTM и ALOS W3D.

Материалы и методы исследований

Запущенный в 2000 году национальным управлением США по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) проект Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) создал первую бесплатную глобальную цифровую модель поверхности для земель между 60° с. ш. и 59° ю. ш.

В 2017 году НАСА выпустило доработанную версию цифровой модели рельефа Shuttle Radar Topography Mission, известную как «SRTM Plus» или SRTM NASA Version 3, которая и использовалась в нашем исследовании [8].

SRTM v.3 представляет собой данные с разрешением в 1 угловую секунду (~30 м на экваторе), состоящие из 16-битных чисел со знаками, привязанными по горизонтали к Всемирной геодезичес-

кой системе 1984 года (WGS84) и по вертикали к Гравитационной модели Земли 1996 года (EGM96). Примечательно, что в применяемом датчике SAR S-диапазон использовался датчиком SRTM для измерения высоты наземных и не наземных объектов на поверхности Земли. Поскольку волна S-диапазона не может проникнуть сквозь густую растительность или здания, полученные данные представляют собой не только рельеф поверхности, но и объектов, расположенных на ней [18, 23]. Точность 30-метровой цифровой модели местности (ЦММ) SRTM, указанная производителем как абсолютная погрешность по высоте, составляет менее 16 м и относительная погрешность по высоте менее 10 м [11].

В 2009 году Министерство экономики и торговли промышленности (METI) Японии и НАСА выпустили усовершенствованный космический отражательный радиометр Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), охватывающий территорию между 83° с. ш. и 83° ю. ш., расширяя охват за пределы SRTM [12].

В июне 2009 года стал доступен глобальный набор данных о высоте ASTER DEM v.1. ЦММ ASTER была создана с использованием оптических изображений, полученных датчиком METI ASTER, установленным на спутник НАСА Terra. Модель была сгенерирована с использованием изображений стереопар.

В 2011 году была выпущена улучшенная версия ASTER DEM v.2 в 1 угловую секунду. По сравнению с версией ASTER DEM v.1, она улучшила пространственное разрешение, повысила точность по горизонтали и вертикали, а также обеспечила лучшую идентификацию водоемов за счет использования 260 000 дополнительных стереопар [20].

В 2019 году была выпущена ASTER Global DEM v.3, которая и использовалась при проведении исследования. Данная версия модели демонстрирует значительные улучшения по сравнению с предыдущей. Однако пользователям сообщается, что встречаются незначительные аномалии и артефакты [9].

ASTER DEM представляет собой 16-битные целые числа со знаком, привязанным по горизонтали к WGS84 и по вертикали к EGM96. За период наблюдения более 7 лет (2000–2007 гг.)

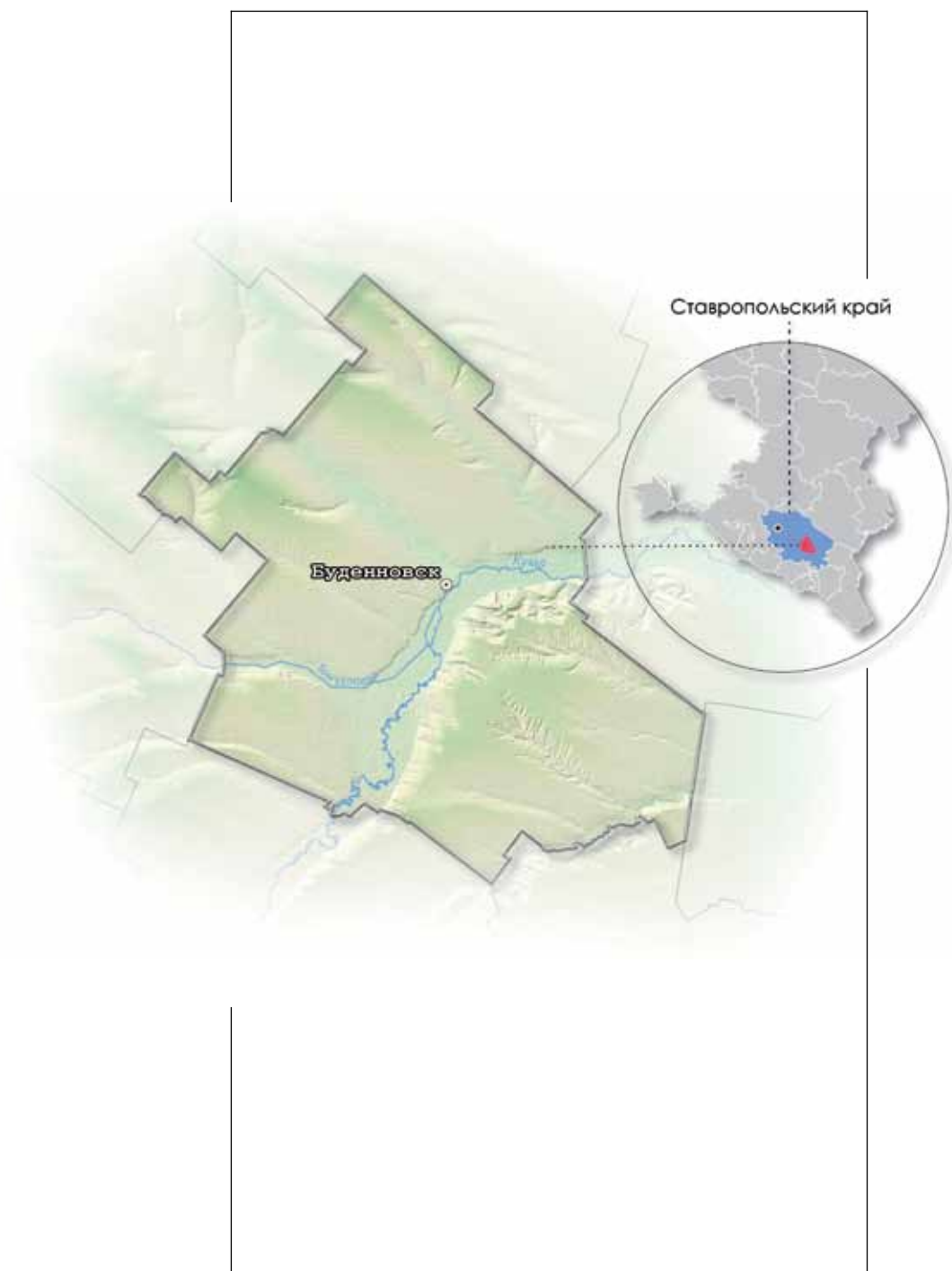


Рис. 1. Территория исследования.
Fig. 1. Study area.

было собрано около 1 260 000 сцен наборов стереоскопических данных ЦММ, каждая из которых покрывает площадь 60х60 км. При этом топография большинства регионов замерялась несколько раз [13].

В 2015 году в свободном доступе появилась глобальная цифровая модель местности Advanced Land Observing Satellite World 3D 30 v.1 – ALOS World 3D–30 m. Глобальные данные AW3D 30 DEM были получены с использованием измерений панхроматического прибора дистанционного зондирования для стереокартографирования PRISM. Оператор спутника – Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) с коммерческим партнером NTT Data Corporation и Японским центром технологий дистанционного зондирования (RESTEC).

Оптический датчик на борту ALOS применялся с 2006 по 2011 гг., используя пары стереоизображений PRISM с разрешением 2,5 м для создания глобальной ЦММ между широтами 80° с. ш. и 80° ю. ш. NTT Data и RESTEC распространяют цифровую модель местности высокого разрешения с размером пиксела приблизительно 5 м в коммерческих целях. JAXA сгенерировала цифровую модель местности размером 1° × 1° с разрешением в 1 угловую секунду (~30 м) путём повторной выборки 5-метровой ЦММ ALOS и выпустила эти данные под свободной лицензией в 2015 году [10]. Средние значения отметок модели представляют собой 16-битные числа со знаком, привязанным к горизонтальному WGS84 и вертикальному EGM96 датумам (характеристикам эллипсоида). Вертикальная точность матрицы высот, указанная производителем, составляет 5 м. Тем не менее, некоторые исследователи обозначают, что вертикальная точность AW3D30 не превышает 4,1 м [21, 22].

Для оценки точности моделей ASTER, SRTM и ALOS на территории Ставропольского края в качестве тестового участка была использована территория Буденновского городского округа (ГО) (рис. 1).

Общая площадь территории исследования составляет 3122 км². Буденновский ГО лежит на территории Терско-Кумской низменности в юго-восточной части Ставропольского края. Рельеф представ-

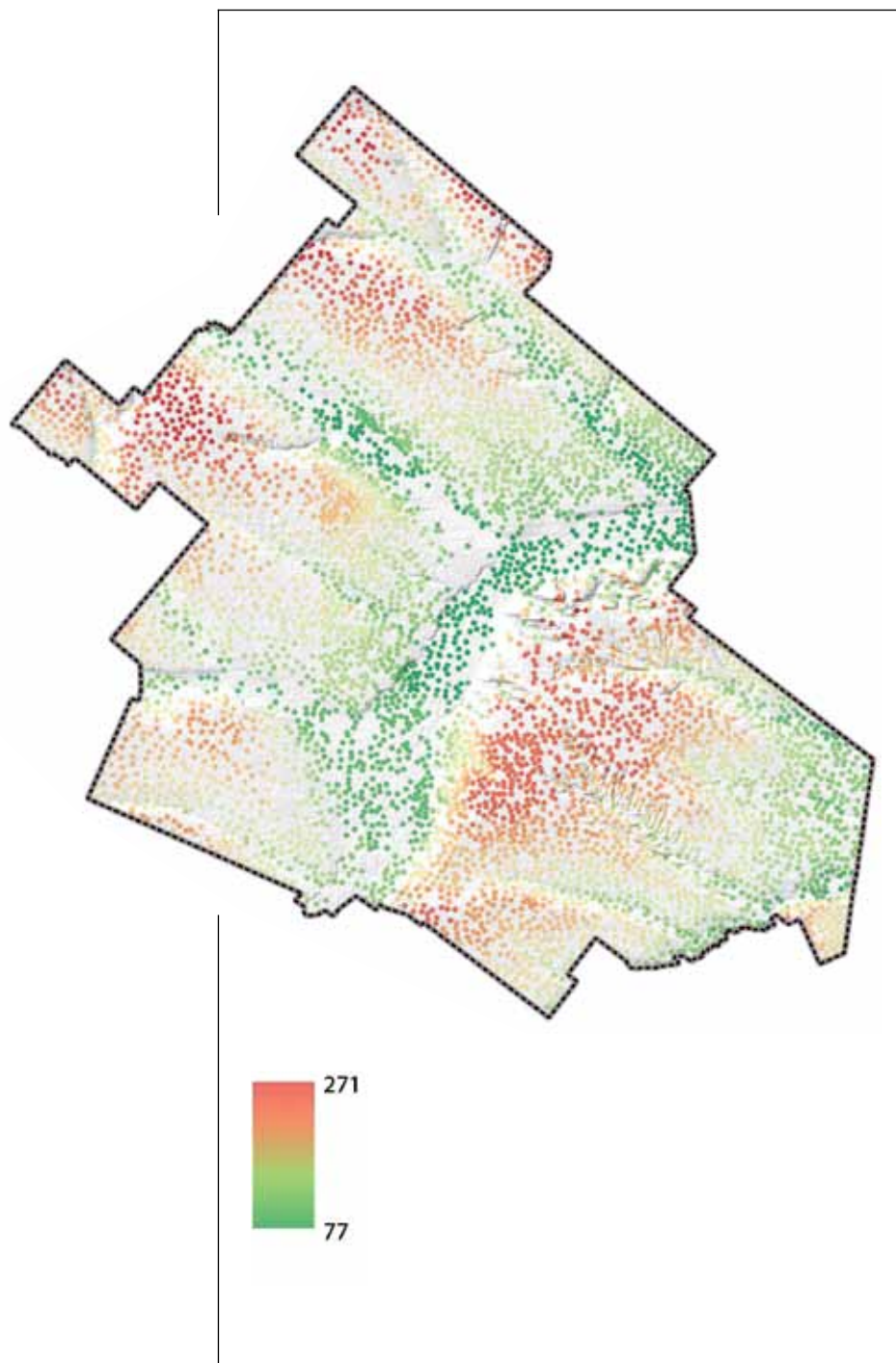


Рис. 2.

Распределение отметок высот на территории исследования.

Fig. 2. Distribution of elevations in the study area.

ляет собой плоскую низменную равнину. На западе равнина переходит в слегка приподнятую Прикумскую возвышенность. Местность сильно расчленена оврагами и балками.

Территория района подвержена сильной антропогенной нагрузке, поскольку на территории района ведется активная сельскохозяйственная деятельность. По данным наблюдений 2022 года распаханность 81 % территории [1].

В качестве эталона высот использовались данные с топографических планов Государственного научно-внедренческого центра геоинформационных систем и технологий (ГосГисЦентр – ГГЦ) масштабом 250 м [4]. Они были созданы в 2000-х годах в качестве гражданской альтернативы советским топографическим планам Генштаба, имеющим ограничения по пользованию.

Для оценки точности DEM на топографических планах были оцифрованы отметки высот с последующим созданием буферных зон диаметром 1 м и определением зональной статистики по каждой цифровой модели высот. Суммарная выборка составила 5322 точки (рис. 2).

Наблюдения проводились с помощью бесплатного программного комплекса QGIS v.3.22.7. с открытым исходным кодом, широко используемым во всем мире.

В дополнение к основному программному обеспечению в QGIS существует широкий спектр модулей, подготовленных сообществом QGIS и многими образовательными и исследовательскими группами. Данная программа позволяет проводить широкий спектр наблюдений, в частности при работе с ЦММ создает модели крутизны склона, экспозиции, теневое рельефа.

Для визуализации распределения выборок применялась формула Стерджесса, которая позволяет определить величину интервала без предварительного установления числа групп. Расчет проводился согласно формулам 1 и 2 [19].

$$k = 1 + 3.322 \log N, \quad (1)$$

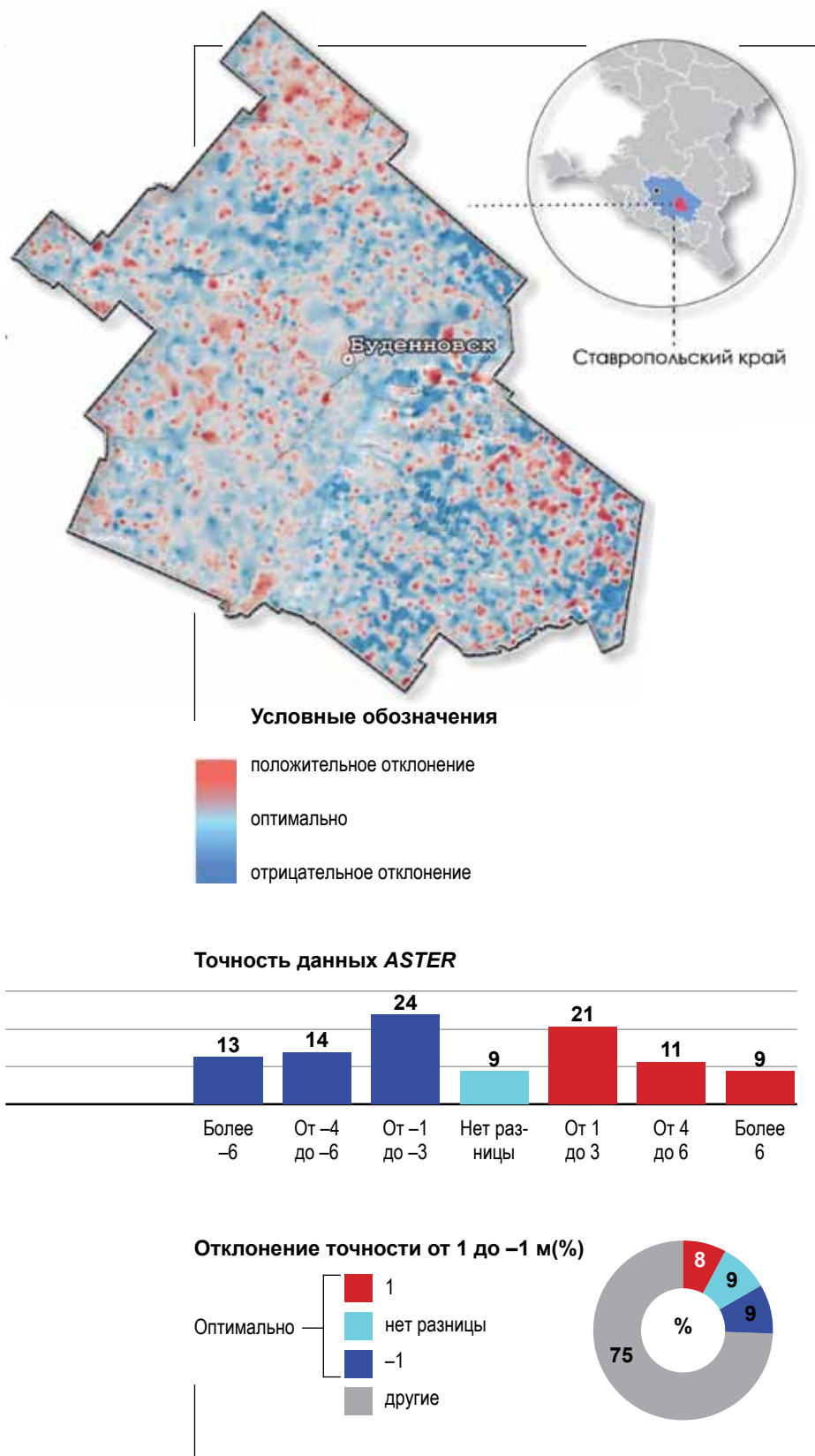


Рис. 3.

Результаты анализа данных ASTER.

Fig. 3. Results of ASTER data analysis.

$$i = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k}, \quad (2)$$

где N – количество значений выборки,
 k – число групп,
 $x_{\max/\min}$ – максимальное и минимальное значение в выборке,
 i – интервал.

Применение этих формул целесообразно при большом числе единиц совокупности, при этом используются равные интервалы. По полученным данным была построена гистограмма распределения, которая в дальнейшем трансформирована в полигон распределения. Также для анализа выборки использовались различные показатели описательной статистики.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате проведенного исследования на территории Буденновского городского округа при использовании материалов ASTER DEM в выборке полученных данных отмечается сильный разброс высот относительно топографического плана ГосГисЦентра (рис. 3).

Так, 41 % отметок высот имеют значения выше, чем на топоплане, а 50 % лежат ниже, чем по данным ГГЦ. Соответствуют только 464 (9 %) точки.

В целом, разница положительных и отрицательных отклонений в рамках муниципального образования носит характер равномерного распределения.

Одним из показателей точности был выбран диапазон отклонений в пределах от -1 до 1 м. Для цифровой модели местности ASTER в этом регионе в оптимальный диапазон входит 1352 точки, что составляет 25 %.

По результатам использования материалов проекта SRTM в рамках Буденновского ГО был проведен анализ и выявлен ряд особенностей. Большая часть отметок высот имеет отрицательное отклонение относительно данных ГосГисЦентра. Так 78 % отметок высот расположены ниже, чем на топоплане, что на 27 % боль-

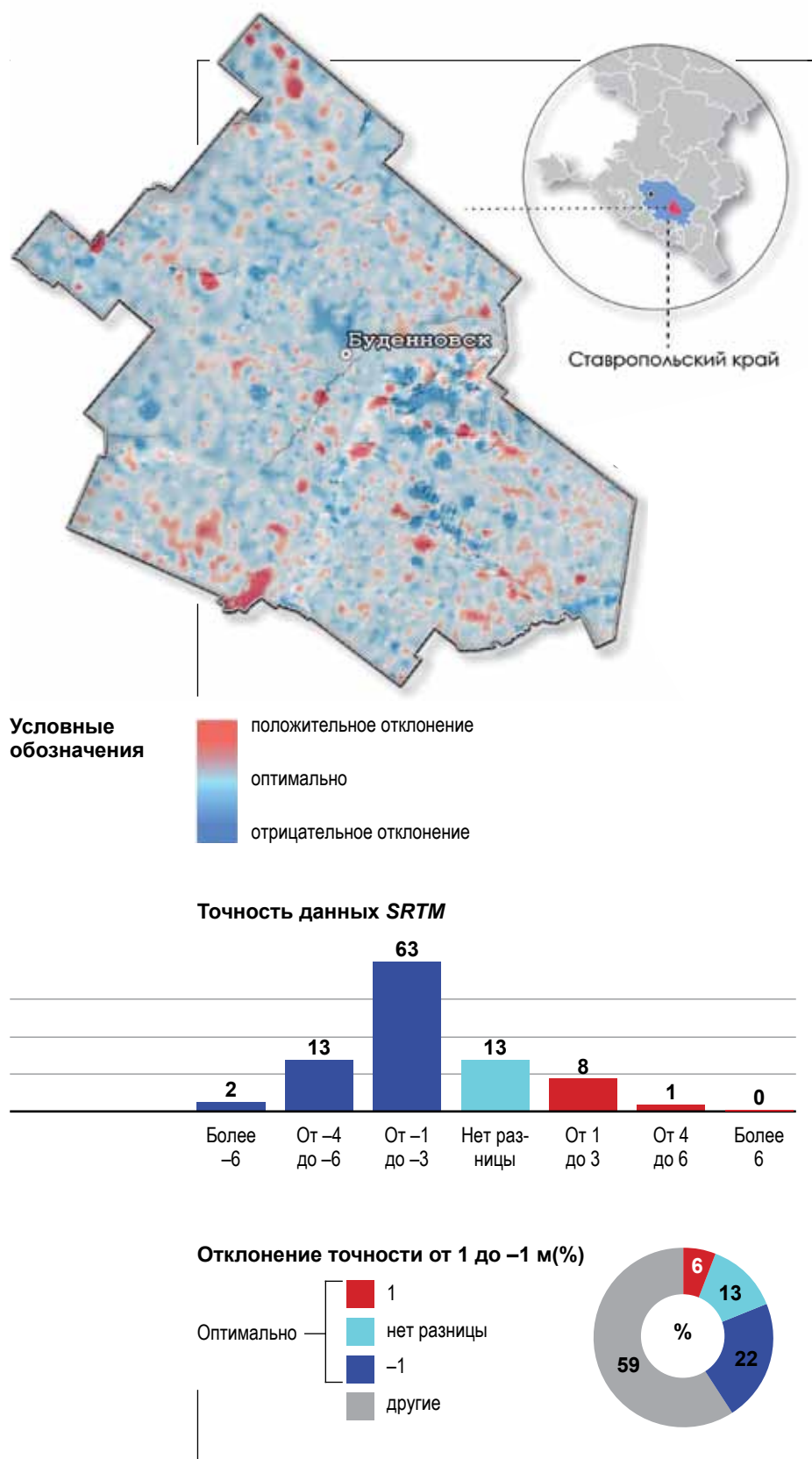


Рис. 4.

Результаты анализа данных SRTM.

Fig. 4. Results of SRTM data analysis.

ше, чем по материалам ASTER (рис. 4). В категорию отметок высот, расположенных выше относительно данных ГГЦ, вошли 9 % данных, что на 32 % меньше, чем по результатам использования ASTER. И только 13 % совпадают с отметками высот топографического плана.

Для этой цифровой модели высот в рамках данной территории отмечается концентрация значений, смещенных в отрицательную сторону в диапазоне от -1 до -3 м. К этой категории относится 63 % точек. В выборке значений с положительным отклонением наибольшая концентрация также отмечается в интервале от 1 до 3 и составляет 8 %.

В рамках оценки точности были выявлены высоты с отклонением от -1 до 1 м. В диапазон данных, удовлетворяющих условиям оптимальности точности, вошли 2194 точки, что составляет 41 %. Наибольшее количество отклонений отмечается на крутых склонах балок и на участках, покрытых деревьями (пойма р. Кума).

В результате использования модели ALOS World 3D в данной местности были определены различные особенности. Как и в модели SRTM, большая часть отметок имеет отрицательное отклонение. В эту категорию вошло 66 % полученных отметок высот, что на 12 % меньше, чем по материалам SRTM (рис. 5).

Вместе с этим отмечаются значения, характеризующиеся положительным отклонением относительно данных топографического плана. К этой категории относится 20 % отметок высот, что на 21 % меньше, чем в данных ASTER и на 11 % больше, чем в результатах по материалам SRTM. Совпадения отметок высот выявлены у 14 % данных.

Наибольшая концентрация отклонений отмечается в отрицательной выборке данных, входящих в диапазон от 1 до -1 м – 51 %. Категория, включающая положительные отклонения, с наибольшей концентрацией отметок высот отмечается в диапазоне от 1 до -1 м и составляет 17 %, что на 9 % больше, чем по данным SRTM.

В оптимальный диапазон при использовании ALOS DEM вошли 2261 отметка высоты, что составляет 42 %. Наибольшее количество значений, имеющих вертикальное отклонение относительно топоплана, отмечается в западной, наиболее приподня-

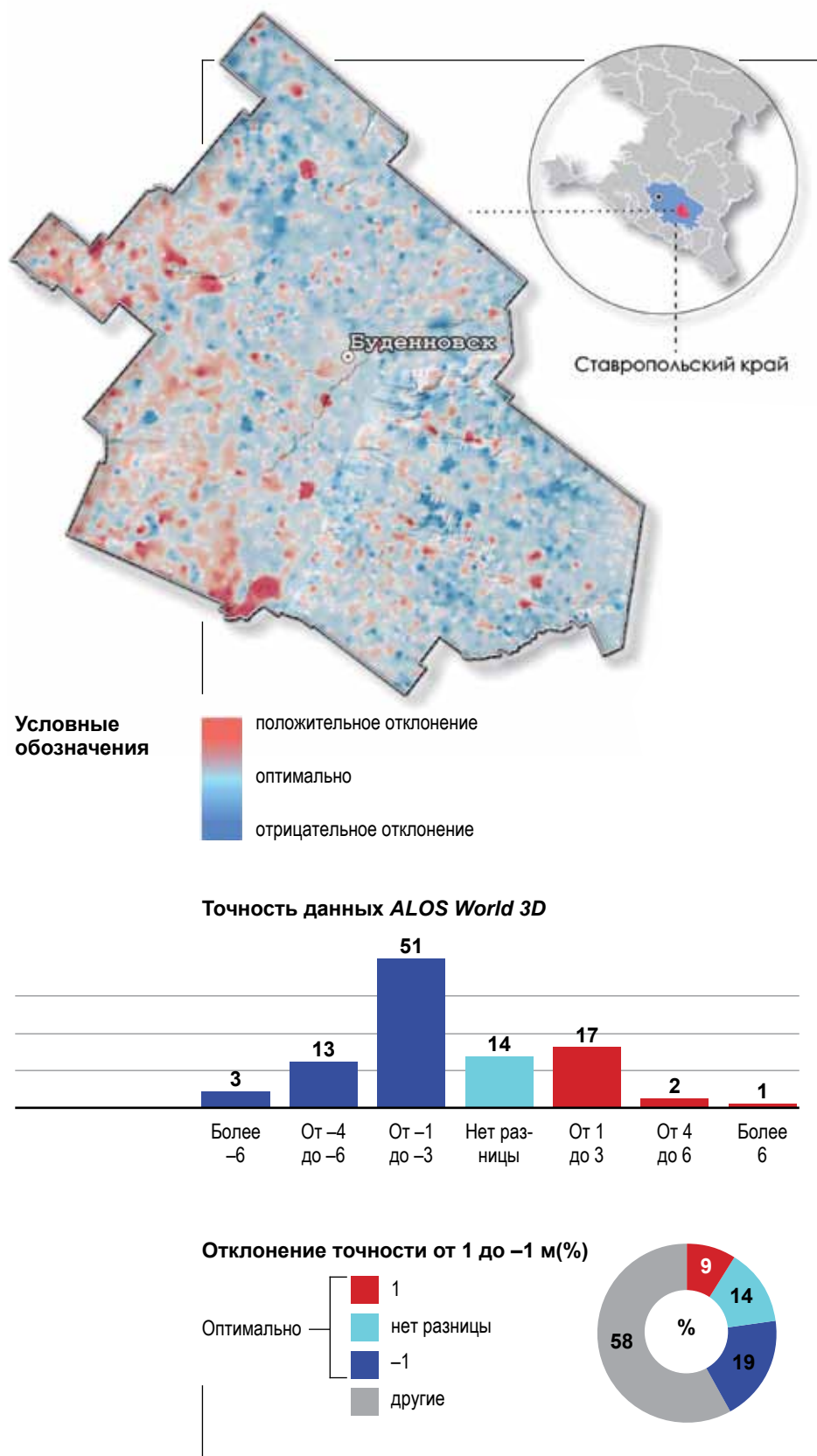


Рис. 5.

Результаты анализа данных ALOS World 3D.

Fig. 5. Results of ALOS World 3D data analysis.

той, части муниципального образования. Также отклонения отмечаются на крутых склонах балок, оврагов и территориях, покрытых деревьями.

Для оценки объективности полученных данных проводился математический анализ выборок цифровых моделей местности по показателям описательной статистики, при использовании которых были получены определенные результаты, отраженные в таблице 1.

По данным, полученным в ходе анализа выборок, был построен полигон распределения частот (рис. 6).

Наиболее значительные отклонения между распределениями частот отмечаются по модели ASTER, а по SRTM и ALOS они минимальны. Однако модель ALOS имеет версии с более высоким пространственным разрешением, на основе которых она и была построена, что позволяет получать более достоверные результаты.

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СРАВНИВАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ
Table 1. Results of mathematical analysis of compared terrain models

	Топоплан	ALOS	SRTM	ASTER
Среднее	157,96	156,62	156,14	157,4
Дисперсия выборки	1397,54	1406,24	1401,24	1445,96
Стандартная ошибка	0,51	0,51	0,51	0,52
Мода	134	130	147	139
Стандартное отклонение	37,38	37,50	37,50	38,03
Эксцесс	-0,61	-0,59	-0,60	-0,57
Асимметрия	0,15	0,15	0,14	0,13

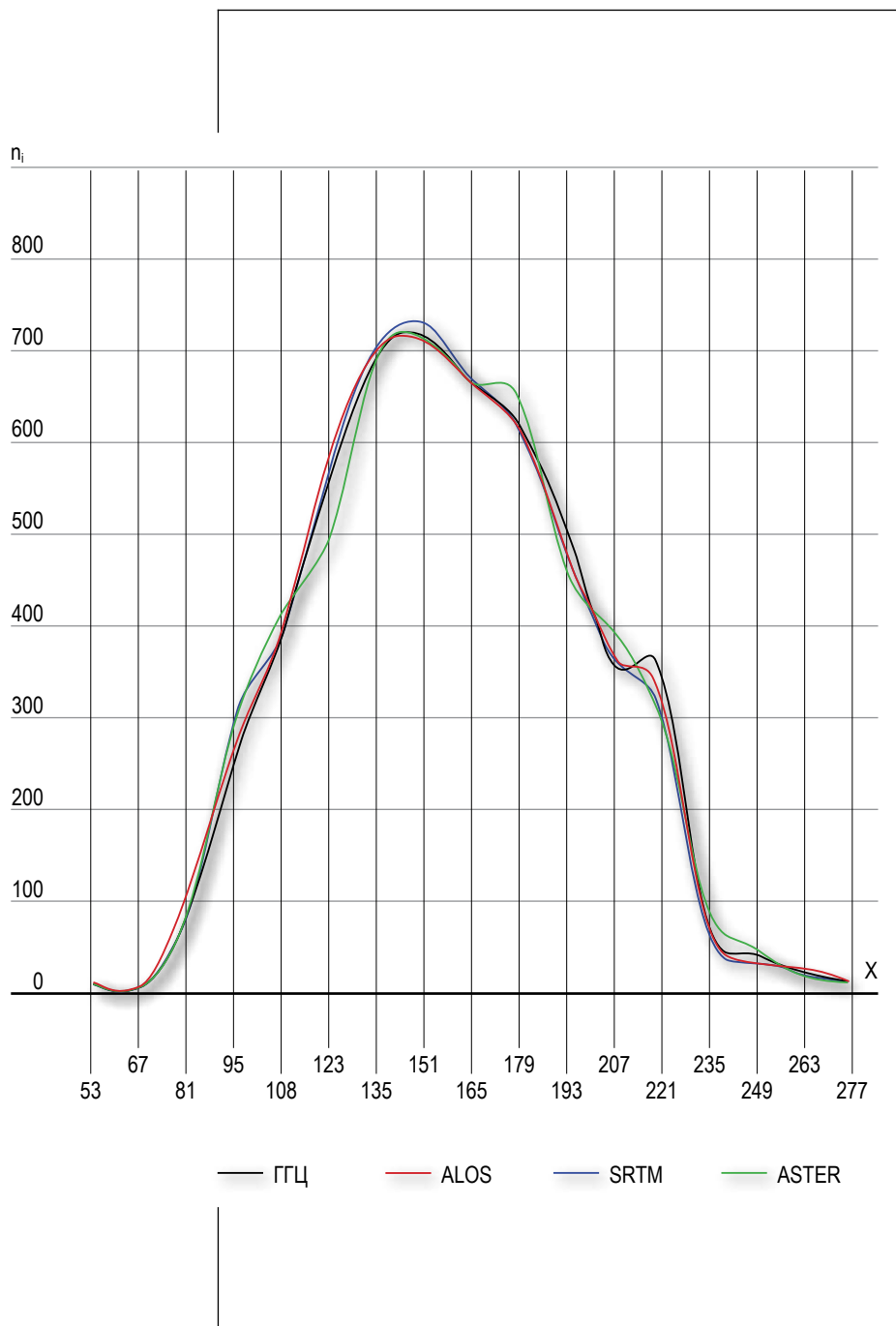


Рис. 6.

Распределение частот выборки по формуле Стерджесса: n_i – частота встречаемости, X – середина интервала высот.

Fig. 6. Sampling frequency distribution according to the Sturges formula.

Выводы

Цифровые модели местности являются важными источниками данных для различных задач. В работе были приведены данные сравнения трех цифровых моделей высот, находящихся в открытом доступе на примере территории Буденновского городского округа Ставропольского края.

В результате получены локальные данные о точности цифровых моделей местности, которые свидетельствуют о том, что наибольшее отклонение данных отмечается в модели ASTER. Модель проекта SRTM показала незначительные отклонения точности. Из всех анализируемых моделей наибольшую точность на данной территории показала ЦММ ALOS W3D, которая является продуктом генерализации коммерческой версии ALOS.

Для задач, требующих использования цифровых моделей местности, на территории Ставропольского края и в частности Буденновского городского округа рекомендуется использовать данные ALOS W3D, они обладают наибольшей точностью.

Результаты исследования помогут выбрать наиболее подходящую цифровую модель местности в зависимости от требований для различных задач и повысить точность получаемых результатов.

Библиографический список

1. Антонов С.А., Перегудов С.В. Геоинформационный мониторинг пашни засушливой зоны Ставропольского края // Инновационные научные разработки – развитию агропромышленного комплекса: материалы юбилейной международной научно-практической конф. ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ». Ставрополь, 2022. № 6. С. 239–245.
2. Ашаткин И.А., Мальцев К.А., Гайнутдинова Г.Ф. и др. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части Европейской территории России // Ученые записки казанского университета. 2020. № 162 (4). С. 612–628.
3. Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2018. № 160 (3). С. 514–530.
4. Маршруты. ру [Электронный ресурс]. URL: <https://maps.>

marshruty.ru/? y=45.360027&x=41.925072&z=9&t=topomap.
(Дата обращения: 06.02.2023).

5. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и время. 2015. № 3. С. 278–291.
6. 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.
7. Santillan J.R., Makinano-Santillan M., Makinano R.M. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philip-pines. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing. 2016. P. 5374–5377.
8. 30-Meter SRTM Tile Downloader [Электронный ресурс]. URL:<https://dwtkns.com/srtm30m/> (Дата обращения: 31.02.2023).
9. Abrams M., Crippen R., Fujisada H. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). Remote Sens. 2020. No. 12. N. 1156.
10. Abrams M., Bailey B., Tsu H., Hato M. The aster global DEM. Photogramm. Eng. Remote Sensing. 2010. No. 76. P. 344–348.
11. Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models. IJGI. 2018. No. 3 (7). P. 114–117.
12. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement [Электронный ресурс]. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. (Дата обращения: 30.01.2023).
13. Earth-graphy [Электронный ресурс]. URL: <https://earth.jaxa.jp/ja/data/>. (Дата обращения: 30.01.2023).
14. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L. The shuttle radar topography mission. Reviews Geophysics. 2007. No. 2 (45). P. 1–33.
15. Gómez-Gutiérrez A., Schnabel S., Contador F.L., García Marín R. Testing the quality of open-access DEMs and their derived attributes in Spain: SRTM, GDEM and PNOA DEM. Geomorphometry. 2011. P. 53–56.
16. James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D

- surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2012. No. 13 (117). P. 1–17.
17. Pike R., Evans I., Hengle T. *Geomorphometry: A brief guide. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications.* Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 3–30.
 18. Saleem N., Huq M., Twumasi N.Y.D., Javed A., Sajjad A. Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and land-slide risk assessment: A review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. No. 12 (8). P. 1–25.
 19. Sturges H. A. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association.* 1926. № 153(21). P. 65–66.
 20. Tachikawa T., Kaku, M., Iwasaki, A. Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J. *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2- Summary of Validation Results.* NASA. 2011. [Электронный ресурс]. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (Дата обращения: 16.02.23).
 21. 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. No. 2 (4). P. 71–76.
 22. Tadono T., Takaku J., Tsutsui, K., Oda F., Nagai H. Status of ALOS World 3D (AW3D) global DSM generation. *Proc. 2015 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS).* 2015. P. 3822–3825.
 23. U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/us-releases-enhanced-shuttle-land-elevation-data> (Дата обращения: 16.02.2023).
 24. Zhao Sh., Cheng W., Zhou Ch., Chen X., Zhang Sh., Zhou Z., Liu H., Chai H. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: An example in the Loess Plateau and North China Plain of China. *Int. J Remote Sens.* 2011. No. 23 (32). P. 8081–8093.

References

1. Antonov S.A., Peregudov S.V. Geoinformation monitoring of arable land in the arid zone of the Stavropol Territory. *Innovative scientific developments for the development of the agro-industrial complex: Proceedings of the anniversary in-*

- ternational scientific and practical conference. FGBNU "North Caucasian FNAC". Stavropol, 2022. No. 6. P. 239–245. (in Russ).
2. Ashatkin I.A., Maltsev K.A., Gainutdinova G.F. etc. Analysis of relief morphometry based on global DEMs within the southern part of the European territory of Russia. *Uchenye zapiski kazanskogo universiteta*. 2020. № 162 (4). P. 612–628. (in Russ).
 3. Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M. Digital elevation models and their use in calculating the rate of soil erosion on arable land. *Uchen. app. Kazan. university ser. Natural. Sciences*. 2018. No. 160 (3). P. 514–530. (in Russ).
 4. Routes. Ru [Electronic resource]. URL: <https://maps.marshruty.ru/?y=45.360027&x=41.925072&z=9&t=topomap>. (Accessed 06.02.2023). (in Russ).
 5. Mineev A.L., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V. Preparation of a digital relief model for the study of exogenous processes in the northern territories of the Russian Federation. *Space and Time*. 2015. No. 3. P. 278–291. (in Russ).
 6. Ryazanov S.S., Kulagina V.I. Comparative evaluation of the vertical accuracy of digital elevation models – SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM and MERIT DEM on the example of the forest and floodplain zone of the Nizhnyaya Kama National Park. *Geosfernye issledovaniya*. 2022. No. 1. P. 107–117. (in Russ).
 7. Santillan J.R., Makinano-Santillan M., Makinano R.M. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philip-pines. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Beijing. 2016. P. 5374–5377.
 8. 30-Meter SRTM Tile Downloader [Electronic resource]. URL: <https://dwtkns.com/srtm30m/>. (Accessed 31.02.2023).
 9. Abrams V., Baily B., Tsu H., Hato M. The ASTER global DEM. *Photogramm. Remote Sensing*. 2010. No 76. P. 344–348.
 10. Abrams M., Crippen R., Fujisada H. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). *Remote Sens*. 2020. No. 12. N. 1156.
 11. Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models. *IJGI*. 2018. No 3 (7). P. 114–117.
 12. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement [Electronic resource]. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. (Accessed 30.01.2023).

13. Earth-graphy [Electronic resource]. URL: <https://earth.jaxa.jp/ja/data/>. (Accessed 30.01.2023).
14. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L. The shuttle radar topography mission. *Reviews Geophysics*. 2007. No. 2 (45). P. 1–33.
15. Gómez-Gutiérrez A., Schnabel S., Contador F.L., García Marín R. Testing the quality of open-access DEMs and their derived attributes in Spain: SRTM, GDEM and PNOA DEM // *Geomorphometry*. 2011. P. 53–56.
16. James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2012. No. 13 (117). P. 1–17.
17. Pike R., Evans I., Hengle T. *Geomorphometry: A brief guide. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 3–30.
18. Saleem N., Huq M., Twumasi N.Y.D., Javed A., Sajjad A. Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and land-slide risk assessment: A review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. No. 12 (8). P. 1–25.
19. Sturges A. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*. 1926. No. 153(21) P. 65–66.
20. Tachikawa T., Kaku, M., Iwasaki, A. Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J. *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2- Summary of Validation Results*. NASA. 2011 [Electronic resource]. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>. (Accessed 16.02.23).
21. 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. No. 2 (4). P. 71–76.
22. Tadono T., Takaku J., Tsutsui, K., Oda F., Nagai H. Status of ALOS World 3D (AW3D) global DSM generation. *Proc. 2015 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS)*. 2015. P. 3822–3825.
23. U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data [Electronic resource]. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/us-releases-enhanced-shuttle-land-elevation-data> (Accessed 16.02.2023).

24. Zhao Sh., Cheng W., Zhou Ch., Chen X., Zhang Sh., Zhou Z., Liu H., Chai H. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: An example in the Loess Plateau and North China Plain of China. *Int. J Remote Sens.* 2011. No 23 (32). P. 8081–8093.

**Статья поступила в редакцию 06.04.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.08.2023,
статья принята к публикации 10.09.2023.**

**The article was submitted to the editorial office 06.04.2023,
the article was approved after reviewing 25.08.2023,
the article was accepted for publication 10.09.2023.**

Информация об авторах

Антонов Сергей Анатольевич, кандидат географических наук, зав. лабораторией ГИС-технологий, Северо-Кавказский ФНАЦ.

E-mail: santosb@mail.ru

Перегудов Сергей Владимирович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории ГИС-технологий, Северо-Кавказский ФНАЦ.

E-mail: serjoSW@yandex.ru

Information about the authors

Sergey A. Antonov, Candidate of Geographical Sciences, Head of the GIS Technology Laboratory, Federal State Budgetary Scientific Institution "North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center".

E-mail: santosb@mail.ru

Sergey V. Peregudov, Graduate Student, Junior Researcher at the GIS Technology Laboratory, Federal State Budgetary Scientific Institution "North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center".

E-mail: serjoSW@yandex.ru