

УДК: 911.2

СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЕМЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА И ИХ ПРИМЕНИМОСТИ ДЛЯ ЭРОЗИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2025 г. К. А. Мальцев^{a, *}, С. Н. Талипова^{b, **}, И. И. Магзянов^{c, ***}, А. А. Сомов^{d, ****},

Т. С. Мальцева^{e, *****}

a, b, c, d, e Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

**E-mail: mlcvkirill@mail.ru*

***E-mail: ssaffiaaa@gmail.com*

****E-mail: ildanmag@bk.ru*

*****E-mail: rooneyandre901@gmail.com*

******E-mail: elka-tata_77@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.06.2024 г.

После доработки 22.01.2025 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

С 2019 г. в сети интернет в открытом доступе появилось несколько новых ЦМР глобального охвата: global 30 m digital elevation model from Copernicus (Copernicus GLO-30), National aeronautics and space administration digital elevation model (NASADEM), forest and buildings removed Copernicus DEM (FABDEM). Эти ЦМР можно было бы использовать для получения морфометрических показателей и оценки модельных эрозионных потерь почвы, в том числе в пределах Европейской территории России (ЕТР), где сосредоточены основные пахотные земли РФ. К настоящему времени выполнен ряд работ по оценке высотной точности этих моделей. Однако, помимо абсолютных ошибок высоты, необходимо оценивать точность и достоверность воспроизведения морфометрических показателей, рассчитываемых на основе этих моделей. В статье представлены результаты анализа ошибок таких морфометрических показателей, как крутизна склонов, длина склонов, а также эрозионный потенциал рельефа трех новых глобальных цифровых моделей рельефа на примере трех участков, расположенных в Воронежской, Саратовской и Оренбургской областях. Анализ ошибок был выполнен путем сравнения с данными, рассчитанными на основе ЦМР, построенных по топографическим картам крупного масштаба. Установлено, что наименьшие ошибки расчетной крутизны склона демонстрирует модель FABDEM. В расчете длин склонов ни одна из новых моделей не показывает результат, превосходящий по качеству то, что можно получить с использованием более старых ЦМР (SRTM и др.). Для эрозионного потенциала рельефа наименьшие ошибки получаются при использовании модели FABDEM. Полученные результаты справедливы как для всей территории каждого участка вообще, так и для пахотных угодий в частности. Минимальные значения ошибок эрозионного потенциала рельефа при использовании модели FABDEM приводят к минимизации ошибок при расчете эрозионных потерь почвы.

Ключевые слова: NASADEM, Copernicus GLO-30, FABDEM, Европейская территория России, эрозионный потенциал рельефа

DOI: 10.31857/S0869607125010067, EDN: LICYUM

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые модели рельефа (ЦМР) часто используются во многих научных и прикладных задачах в сфере наук о Земле. В частности, ЦМР разной детальности используются в землеустройстве, геоморфологии, гидрологии, инженерной геологии, природопользовании, при проектировании зданий и сооружений. Среди многообразия сфер применения особенно важна возможность пространственной оценки и картографирования водной эрозии почвы в разных масштабах с использованием ЦМР, поскольку почва является трудновозобновимым ресурсом человечества и является основой продовольственной независимости РФ. Большинство пахотных угодий РФ располагаются на Европейской территории России (ЕТР), а основным фактором их деградации является водная эрозия почв [5]. Почвенную эрозию можно количественно оценивать с помощью полевых методов или методов моделирования. Моделирование позволяет картографировать эрозию на больших территориях и прогнозировать потери почвы при изменении вида использования земель. Существует множество моделей для прогнозирования потерь почвы, хороший обзор которых дан в работах [15, 11].

Среди всех этих моделей наиболее часто используемыми являются: USLE [42], WaTEM/SEDEM [41] и RUSLE [37]. Во всех этих моделях одним из важных параметров является фактор длины и крутизны склона (LS-фактор), определяющий эрозионный потенциал рельефа [32].

Получить ЦМР для расчета потенциальных потерь почвы можно несколькими способами, например с помощью данных дистанционного зондирования, полевых геодезических съемок, топографических карт и т.д. [1]. На основе перечисленных методов, в частности фотограмметрии и радиолокации, к настоящему времени было создано несколько глобальных ЦМР, данные которых также можно использовать. Особенно актуальными становятся данные глобальных ЦМР при исследовании больших территорий (сотни квадратных километров и более), поскольку это очень доступный источник информации.

В то же время, поскольку глобальные ЦМР были созданы с использованием данных дистанционного зондирования Земли, они содержат ошибки, величину которых необходимо оценивать.

В настоящее время наиболее детальные глобальные ЦМР, распространяемые свободно, имеют разрешение 1 угловая секунда, что в зависимости от территории составляет 25–30 м. До 2019 г. в открытом доступе существовали лишь 3 глобальные ЦМР с таким разрешением: группа моделей SRTM (C-SIR, X-SAR) [21]; ASTERDEM v.2 [13]; AW3D30 [12]. Анализ ошибок высот этих моделей, а также получаемых по ним моделей крутизны склонов и длин линий тока был представлен в ряде работ как в пределах России [8, 1, 10, 7], так и по всему миру [35, 28].

Однако в последнее время появилось еще несколько свободно распространяемых моделей рельефа глобального охвата, имеющие пространственную детальность 1 угловая секунда (25–30 м): Copernicus GLO-30; FABDEM [23]; NASADEM [16]. Краткую характеристику этих моделей можно видеть в табл. 1.

По данным самих разработчиков модели Copernicus GLO-30 (рис. 26), 90% абсолютных вертикальных ошибок высот по всей Земли не превышают 2.17 м. В пределах территории РФ этот показатель выше и находится в диапазоне 2–5 м. Использование ЦМР Copernicus GLO-30 для создания FABDEM (рис. 2в), по мнению авторов модели, ставит этот набор данных выше других глобальных ЦМР. Согласно данным создателей модели, ошибки высот в пределах всех видов земного покрова

Таблица 1. Краткая характеристика глобальных ЦМР (Copernicus GLO-30, FABDEM, NASADEM), используемых в работе**Table 1.** Brief description of global DEMs (Copernicus GLO-30, FABDEM, NASADEM) used in the work

Название	Источник данных	Покрытие	Координаты/ высоты
Copernicus GLO-30	Данные WorldDEM, TanDEM-X	От 84° с.ш. до 90° ю.ш	WGS 84 / EGM 2008
FABDEM	Copernicus GLO-30	От 80° с.ш. до 60° ю.ш.	WGS 84 / EGM 2008
NASADEM	Данные SRTM(C-SIR), ICESat/GLAS	От 60° с.ш. до 56° ю.ш.	WGS 84 / EGM 96

(леса, антропогенные территории, пашни и т.д.) меньше, чем в модели Copernicus GLO-30 [23]. Так, по данным авторов модели, в FABDEM произошло сокращение ошибок высот по сравнению с моделью Copernicus GLO-30. При этом 90% абсолютных вертикальных ошибок высот в пределах застроенных территорий лежат в диапазоне до 2.39 м (FABDEM), а в модели Copernicus GLO-30 данный показатель был 3.54 м. Аналогично данный показатель сократился в пределах территорий, покрытых лесом [23]. Модель NASADEM (рис. 2а) по сравнению с SRTM представляет собой улучшенную модель [16]. Например, она сокращает средние абсолютные ошибки высот в пределах Северной Америки с 3.46 до 2.8 м.

Анализ ошибок глобальных ЦМР, рассмотренных нами, был проведен не только авторами глобальных моделей, но и независимыми исследователями [22]. Однако в мировой литературе пока мало оценок ошибок морфометрических показателей и эрозионного потенциала рельефа “новых” глобальных ЦМР, а рассматриваются в основном ошибки высот.

Так, исследования ошибок высот, проведенные в Боснии и Герцеговине [26], показывают, что модель FABDEM содержит меньше ошибок высот по сравнению с другими анализируемыми глобальными ЦМР. Также исследования по моделированию затопления городских пойм, выполненные в пределах Индии, показывают, что из всех свободно распространяемых глобальных ЦМР именно FABDEM позволяет получить наименьшие ошибки [33]. В исследовании, которое было выполнено в пределах одного из прибрежных районов Бразилии [20], оценивались глобальные ЦМР AW3D30, ASTER, SRTM, и TanDEM-X, однако модель FABDEM не рассматривалась.

Также есть несколько статей, посвященных анализу точности модели NASADEM. Например, был выполнен сравнительный анализ точности положения структурных линий рельефа при использовании моделей MERIT, ASTER GDEM2, SRTM, NASADEM в пределах Вьетнама [40]. Установлено, что модель NASADEM позволяет позиционировать их точнее.

Аналогичные исследования, выполненные в Мексике [17] и направленные на оценку ошибок шести глобальных ЦМР (ALOS AW3D30 v2-v3, ASTER GDEM v2, v3, SRTM, NASADEM), показали, что наименьшие ошибки высот были свойственны либо модели AW3D30, либо модели NASADEM. Модель FABDEM также в данном исследовании не рассматривалась.

Анализ точности морфометрических показателей, выполненный в пределах горных территорий Южной Америки [18] на основе глобальных ЦМР (SRTM v.3.0, AW3D30, ASTER GDEM v3, Copernicus, TanDEM-X(12 м) показывает, что наиболее

точными моделями являются Copernicus GLO-30 и TanDEM-X. Здесь необходимо уточнить, что модель TanDEM-X имеет шаг сетки 12 м и распространяется на платной основе.

Кроме этого, есть исследование вертикальной точности глобальных свободно распространяемых ЦМР, выполненное в пределах 65 тестовых участков по всему миру [31]. Результаты данного исследования показывают, что модель FABDEM содержит наименьшее количество ошибок, а наименьшие ошибки расположены в пределах пахотных территорий.

В пределах России также есть опыт применения современных моделей глобальных ЦМР. Например, группой авторов из Красноярского края была использована глобальная ЦМР FABDEM [4] для аграрного мониторинга. В пределах Северного Кавказа [9] была выполнена оценка возможности использования моделей FABDEM и Copernicus GLO-30 для построения гидрографической сети. Однако в них не было выполнено сравнительной количественной оценки ошибок крутизны склонов, длин склонов, эрозионного потенциала рельефа.

Целью нашей работы является оценка ошибок крутизны склонов, длин склонов, а также эрозионного потенциала рельефа (LS-фактора), получаемых с использованием глобальных ЦМР, появившихся в открытом доступе с 2019 г. (Copernicus GLO-30 DEM, NASADEM, FABDEM) в пределах трех тестовых участков на Европейской территории России, расположенных в пределах пахотных территорий отдельно и всей территории каждого участка, а также сравнение полученных ошибок с аналогичными ошибками в ЦМР, существовавшими ранее (SRTM, ASTERDEM v.2, AW3D30).

ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ И МЕТОДИКА

Исследование было выполнено в пределах трех тестовых участков, расположенных в Воронежской (участок № 1), Саратовской (участок № 2) и Оренбургской областях (участок № 3), представленных на рис. 1.

Участок № 1 имеет площадь 324 км². Рельеф местности является равнинным, с высотами от 122 до 222 м, 2,6% участка покрыты лесом, а оставшаяся территория в основном покрыта пахотными землями и луговой растительностью. Территория характеризуется густой сетью сложноразветвленных речных долин, оврагов и балок, которые расчленяют водораздельные поверхности. Быстрое таяние снега весной и летние ливни способствуют интенсивному размыву почв. Высокий уровень обработки сельскохозяйственных угодий активизирует процессы плоскостного и линейного смыва, приводя к деградации почвенного покрова и формированию оврагов. Площадь пахотных угодий участка составляет 200 км². На данном участке протекают реки Ведуга, Серебрянка, Ольшанка и Гнилуша.

Участок № 2 имеет площадь 322 км² и располагается в Саратовской области. Участок находится в пределах гетерогенной возвышенности и покрыт лесом на 14%, а оставшаяся территория в основном покрыта пахотными землями и луговой растительностью. Перепад высот составляет от 170 до 305 м. Площадь пашни составляет 166 км². На территории протекают реки Большой Колышлей и Малый Колышлей.

Участок № 3 располагается в Тоцком районе Оренбургской области и имеет площадь 329 км². Участок находится в пределах гетерогенной возвышенности, которая почти лишена лесного покрова. Перепад высот составляет от 110 до 245 м. Площадь пашни составляет 230 км². По территории протекают такие реки, как Большая и Малая Погромка.

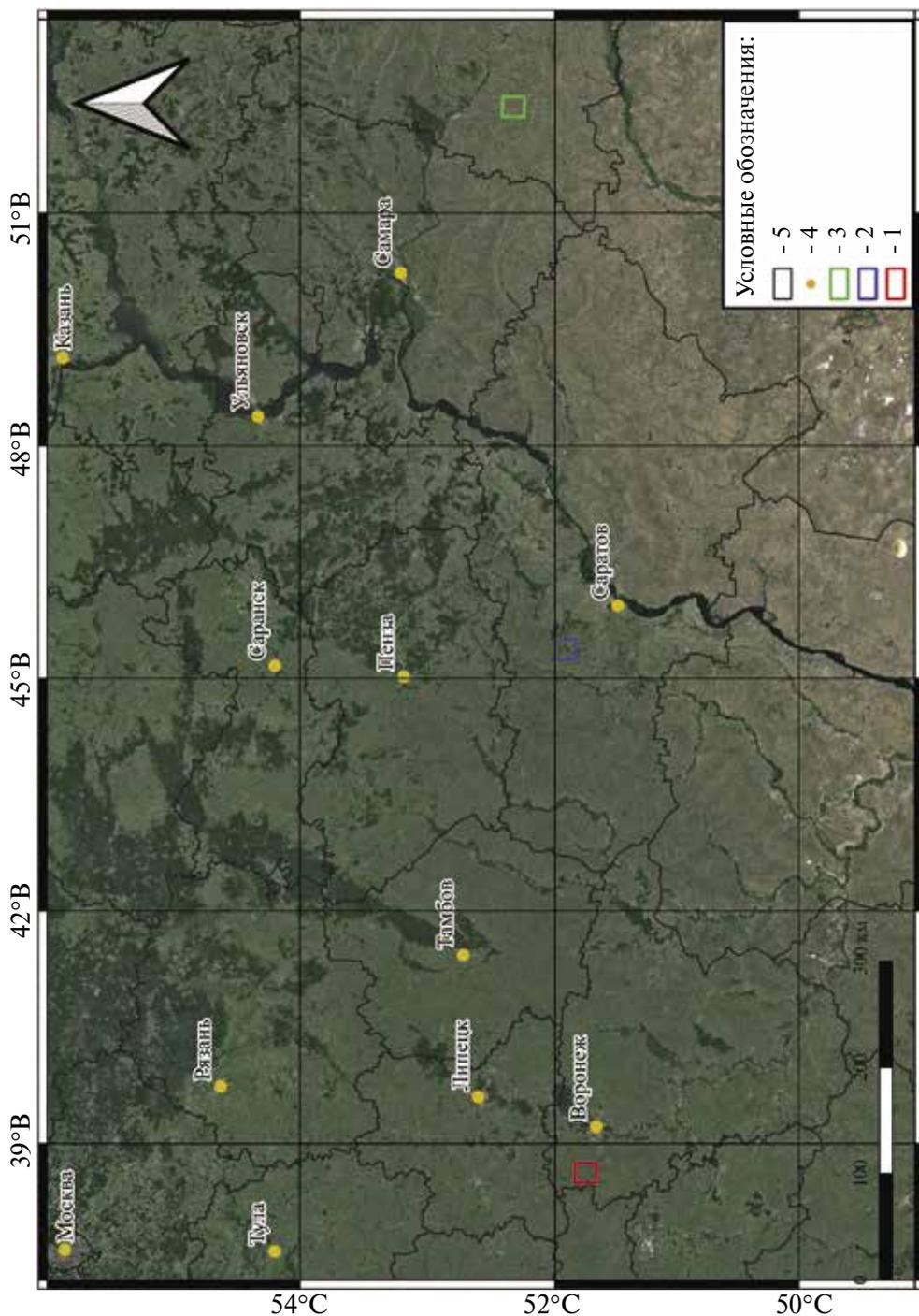


Рис. 1. Территория исследования (1 — участок в Воронежской области; 2 — участок в Саратовской области; 3 — участок в Оренбургской области; 4 — города; 5 — границы субъектов РФ).

Fig. 1. Study area (1 — site in the Voronezh Region; 2 — site in the Saratov Region; 3 — site in the Orenburg Region; 4 — cities; 5 — borders of the constituent entities of the Russian Federation).

В качестве исходных данных использовались глобальные ЦМР: Copernicus GLO-30 DEM, NASADEM, FABDEM, ASTER GDEM v.2, SRTM C-SIR, AW3D30, которые были сравнены с эталонной ЦМР. Кроме этого, для оцифровки границ пахотных угодий использовались снимки Landsat 8 OLI (Collection 2 Level 2 Science Products Tier1), которые были скачаны с сайта геологической службы США [34]. Дешифрирование было проведено вручную с использованием стандартных дешифровочных признаков, описанных, например, в статье [2].

Основываясь на данных топографических карт, при помощи алгоритма М. Хатчинсона [24, 25], реализованного в программном комплексе ArcGIS, были построены эталонные модели для трех тестовых участков (рис. 2г). Для моделирования нами были использованы: горизонтали, отметки высот. Размер ячейки для эталонных моделей был выбран 5×5 м, исходя из погрешности планового положения объектов (0.5 мм) на топографических картах масштаба 1 : 10 000 [2]. Тематическая информация о рельефе с топографических карт данного масштаба может выступать в качестве проверочной или эталонной информации по отношению к заявленным глобальным ЦМР, поскольку имеет намного меньшую вертикальную погрешность. В соответствии с исследованием [30], проверочные данные, представляющие рельеф земной поверхности, должны иметь точность как минимум в три раза больше, чем у оцениваемого источника данных. Топографические карты, используемые нами в качестве эталонов, имеют сечение горизонталей 1 м и погрешность высотного положения $1/3$ сечения [2], поэтому можно утверждать, что погрешность эталонных данных составляет около 0.33 м, что почти на порядок меньше погрешностей глобальных ЦМР. В качестве системы координат для всех эталонных моделей была выбрана проекция Гаусса — Крюгера с использованием датума Пулково-1942 г. (Воронежская область — зона 7, EPSG — 28407; Саратовская область — зона 8, EPSG — 28408; Оренбургская область — зона 9, EPSG — 28409). Глобальные ЦМР были также представлены с использованием соответствующих систем координат. Приведение к целевой проекции было выполнено в QGIS.

Для оценки ошибок длин линий тока и эрозионного потенциала рельефа мы провели гидрологическую коррекцию всех рассматриваемых ЦМР.

В используемых нами глобальных общедоступных ЦМР присутствует много артефактных локальных западин в силу того, что построены они с использованием данных дистанционного зондирования. Артефактные западины сокращают длину склонов и суммарную водосборную площадь в каждой точке, рассчитанную с их использованием. Это в свою очередь снижает значение эрозионного потенциала рельефа. В настоящее время нет автоматических методик, позволяющих надежно отличить реальные и артефактные локальные западины только на основе данных ЦМР. Поэтому принято удалять все западины, а потом восстанавливать там, где они реально существуют, при наличии такой информации [6]. На сегодняшний день существует несколько алгоритмов удаления локальных западин моделей рельефа, которые можно разделить на три большие группы. Во-первых, это алгоритмы заполнения локальных понижений [36, 14]; во-вторых, это алгоритмы, разрушения границ замкнутых понижений [29, 38]; в-третьих, алгоритмы комбинирующие два первых подхода [27]. Использование этих алгоритмов в итоге приводит к разным результатам при построении длин линий тока. В статье для всех исходных данных был применен один из алгоритмов первой группы, реализованный в программном комплексе ArcGIS. Коррекция была выполнена с использованием инструмента Fill модуля Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS [39].

В пределах тестового участка, расположенного в пределах Воронежской области, подготовка всех ЦМР для последующего расчета длин линий тока была дополнительно выполнена с использованием инструмента Breach Depressions в программном пакете WhiteBox.

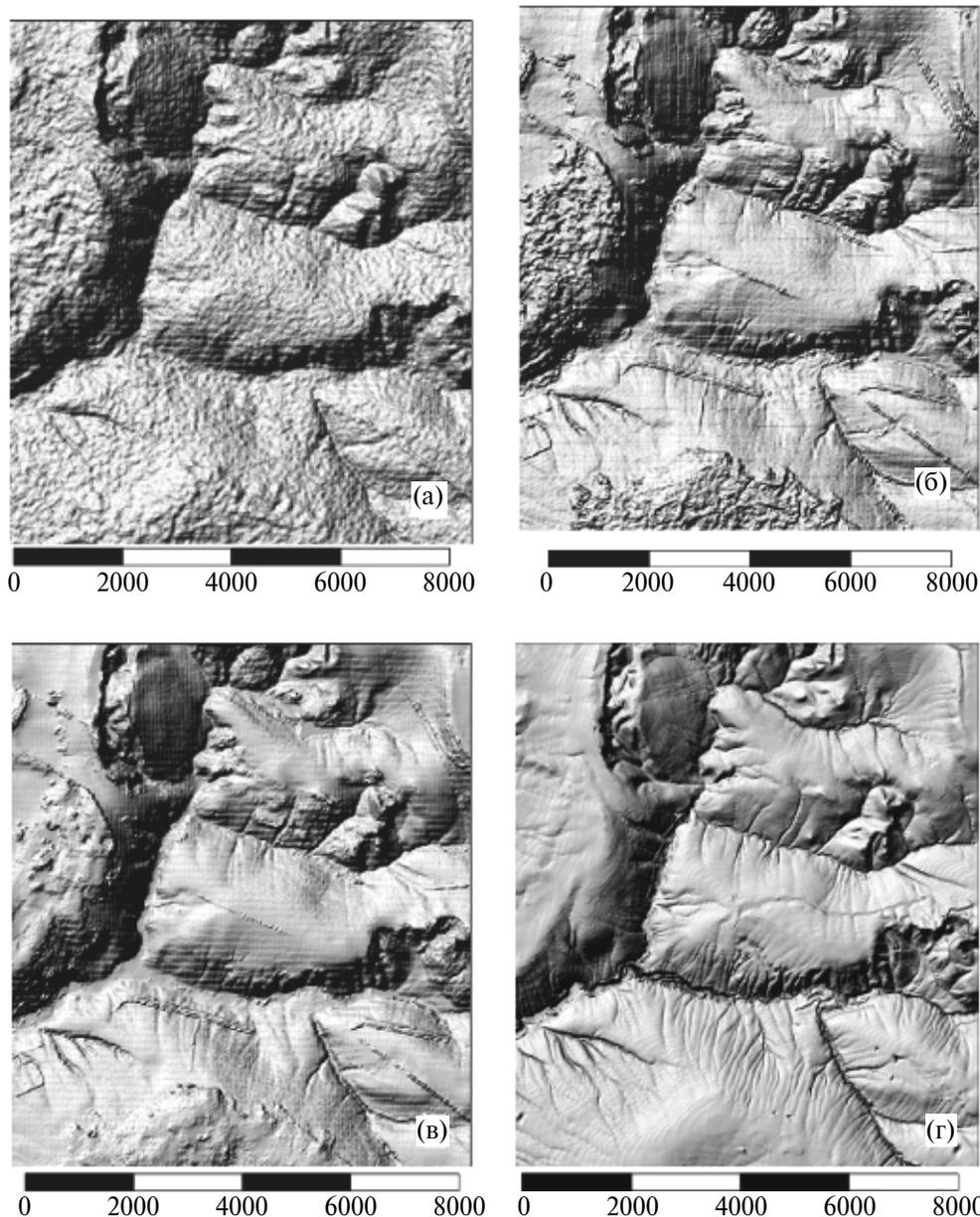


Рис. 2. Рельеф части участка в Саратовской области, представленный с использованием разных глобальных ЦМР (а — NASADEM; б — Copernicus GLO-30; в — FABDEM; г — эталонная ЦМР).

Fig. 2. The relief of site 2 in the Saratov Region is presented using different DEMs (a — NASADEM; b — Copernicus GLO-30; c — FABDEM; d — detailed DEM).

Расчет крутизны склона был произведен в программе Surfer. Для расчета крутизны склона была использована формула (1):

$$S = \frac{180}{\pi} \arctan \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}, \quad (1)$$

где $\partial z/\partial x$ и $\partial z/\partial y$ — частные производные вдоль координатных осей, а S — крутизна склона в градусах.

Расчет длин склонов был произведен в программе ArcGIS с использованием инструмента Flow Length. Сначала была создана модель направлений потока, а затем на ее основе вычислили длины линий тока, которые можно использовать как оценку длин склонов. Дополнительно в пределах участка в Воронежской области длина линий тока была оценена с использованием программного пакета WhiteBox, в котором использовался метод Maximum upslope flowpath length.

Величина эрозионного потенциала рельефа была оценена с использованием формулы, предложенной [19] и реализованной в программном обеспечении SAGA, с использованием инструмента Hydrology — LS-factor. Эрозионные потери почвы в пределах участка, расположенного в Оренбургской области, были рассчитаны на основе методики RUSLE [37].

Оценка погрешности крутизны склона, эрозионного потенциала рельефа, а также эрозионных потерь почвы осуществлялась на основе вычисления разности показателей между проверочными моделями и глобальными по формуле (2):

$$\Delta A = A_{\text{пров}} - A_{\text{цмр}}, \quad (2)$$

где ΔA — разность крутизны склона, эрозионного потенциала рельефа или эрозионных потерь почвы, $A_{\text{пров}}$ — крутизна склона, эрозионный потенциал рельефа или эрозионные потери почвы на проверочной модели рельефа, $A_{\text{цмр}}$ — крутизна склона, эрозионный потенциал рельефа или эрозионные потери почвы, полученные с использованием глобальных ЦМР.

Далее был произведен статистический анализ полученных значений ошибок. Были рассчитаны два статистических показателя: стандартное отклонение (Std-Dev) — формула 3; средняя абсолютная ошибка (MAE) — формула 4.

$$\text{StdDev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta A_i - ME)^2}{n}}, \quad (3)$$

$$\text{MAE} = \frac{|\Delta A|}{n}, \quad (4)$$

где n — объем выборки.

Для анализа погрешностей длин линий тока разности не рассчитывались. Вместо этого были рассчитаны средние значения длины склонов по каждой модели рельефа. Эти показатели эталонной модели и глобальных моделей сравнивались между собой. Для формирования выборок всех морфометрических показателей был использован шаг сетки 25 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические показатели ошибок крутизны склона разных глобальных ЦМР в пределах всех трех тестовых участков представлены в табл. 2, 3.

Статистические показатели длин склонов разных ЦМР в пределах всех трех тестовых участков представлены в табл. 4 и 5.

Для того чтобы в итоге нашего исследования понять, какая из существующих глобальных ЦМР дает наименьшие ошибки при расчете эрозионного потенциала рельефа (LS-фактора), был выполнен расчет этих ошибок и их статистический анализ. Результаты расчета приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 2. Статистические показатели выборки ошибок крутизны склонов (град.) для различных участков

Table 2. Statistical indicators of the sampling errors of slopes (degrees) for various sections

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FABDEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область						
StdDev	3.54	5.71	2.86	2.09	2.59	2.81
MAE	2.35	5.71	1.82	1.20	1.44	1.78
Участок 2 — Саратовская область						
StdDev	3.75	4.36	3.87	3.05	3.40	3.17
MAE	2.34	4.73	1.74	1.19	1.55	1.53
Участок 3 — Оренбургская область						
StdDev	2.44	6.66	1.93	1.35	1.57	1.60
MAE	1.63	7.58	1.31	0.826	1.16	1.17

Таблица 3. Статистические показатели выборки ошибок крутизны склонов (град.) для различных участков на территории пашен

Table 3. Statistical indicators of sampling errors in slopes (degrees) for various areas on the territory of arable lands

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FABDEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область						
StdDev	2.88	5.22	1.69	0.712	0.743	1.55
MAE	1.95	6.15	1.33	0.628	0.681	1.28
Участок 2 — Саратовская область						
StdDev	2.11	3.92	1.47	0.771	0.83	1.23
MAE	1.36	4.64	1.09	0.533	0.578	1.00
Участок 3 — Оренбургская область						
StdDev	2.11	6.56	1.41	0.821	0.898	1.24
MAE	1.45	7.91	1.06	0.529	0.603	0.984

Таблица 4. Среднее значение выборки длин склонов (м) для различных участков на всех типах землепользования**Table 4.** Average slope lengths (m) for various sites across all land use types

Средняя длина	Эталон- ная ЦМР	AW3D30	ASTER	SRTM	FAB DEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область							
Средняя длина*	90	231	219	228	269	262	223
Средняя длина	130	210	197	216	258	241	210
Участок 2 — Саратовская область							
Средняя длина	130	224	212	233	283	261	227
Участок 3 — Оренбургская область							
Средняя длина	136	213	195	220	271	246	215

* С использованием инструментов BreachDepressions и Maximum upslope flowpath length в программном пакете WhiteBox.

Таблица 5. Статистические показатели выборки длин склонов (м) для различных участков на территории пашен**Table 5.** Statistical indicators of the sample of slope lengths (m) for various areas in the arable land

Статистический показатель	Эталон- ная ЦМР	AW3D30	ASTER	SRTM	FAB DEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область							
Средняя длина	105	118	113	120	134	106	114
Участок 2 — Саратовская область							
Средняя длина	126	140	135	149	194	165	144
Участок 3 — Оренбургская область							
Средняя длина	110	139	129	145	192	166	143

Таблица 6. Статистические показатели ошибок эрозионного потенциала рельефа для различных участков на всех типах землепользования**Table 6.** Statistical indicators for errors LS-factor for various areas on all types of land use

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FAB DEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область						
StdDev	0.737	1.36	0.621	0.637	0.610	0.603
MAE	0.471	1.11	0.374	0.311	0.326	0.369
Участок 2 — Саратовская область						
StdDev	0.829	1.12	0.671	0.648	1.15	0.672
MAE	0.453	0.87	0.333	0.282	0.359	0.336
Участок 3 — Оренбургская область						
StdDev	0.546	1.61	0.404	0.361	0.366	0.412
MAE	0.328	1.40	0.259	0.193	0.203	0.264

Таблица 7. Статистические показатели ошибок эрозионного потенциала рельефа для различных участков на территории пашен**Table 7.** Statistical indicators of errors LS-factor for various areas on the territory of arable lands

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FABDEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область						
StdDev	0.496	1.19	0.297	0.210	0.210	0.359
MAE	0.232	0.794	0.167	0.091	0.096	0.248
Участок 2 — Саратовская область						
StdDev	0.563	0.402	0.535	0.384	0.392	0.280
MAE	0.294	0.352	0.259	0.147	0.148	0.203
Участок 3 — Оренбургская область						
StdDev	0.393	1.503	0.267	0.200	0.212	0.241
MAE	0.198	1.084	0.153	0.094	0.104	0.144

Для того чтобы оценить ошибки, возникающие при расчете эрозионных потерь почвы, был выполнен расчет ошибок эрозионных потерь почвы в пределах всего участка, расположенного в пределах Оренбургской области, с использованием разных глобальных ЦМР, а также эталонной модели. Результаты представлены в табл. 8.

Таблица 8. Статистические показатели ошибок расчета почвенной эрозия в пределах всего участка расположенного в Оренбургской области (т/га в год)**Table 8.** Statistical indicators of errors in calculating soil erosion within the entire area in the Orenburg region (t/ha per year)

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FABDEM	COP. GLO-30	NASA DEM
MAE	0.57	2.75	0.42	0.28	0.29	0.42

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа табл. 2 и 3 было установлено, что наименьшие ошибки крутизны склонов присущи ЦМР FABDEM. Данное заключение можно сделать, опираясь как на среднюю абсолютную ошибку, так и на стандартное отклонение. Проведенный анализ показывает, что данное утверждение справедливо как для всех видов земного покрова данных участков, так и в пределах пахотных угодий отдельно. Кроме этого необходимо отметить тот факт, что ошибка крутизны склонов заметно сокращается во всех глобальных ЦМР, если рассматривать ошибки только в пределах пахотных угодий. Так, например, средняя абсолютная ошибка крутизны склонов, рассчитанная по модели FABDEM, в пределах пахотных угодий сокращается с 1.2 до 0.63 градуса. Также можно утверждать, что все “новые” ЦМР (FABDEM, Copernicus GLO-30, NASADEM) на рассмотренных участках дают меньшие ошибки крутизны склонов, чем “старые” глобальные ЦМР (AW3D30, ASTER GDEM v.2, SRTM C-SIR). Данное утверждение справедливо как в пределах всех типов земного покрова, так и в пределах пахотных угодий.

Анализируя табл. 4 и 5, можно сказать, что длины склонов, полученные с использованием всех глобальных ЦМР, завышены по сравнению со значениями, полученными с использованием эталонной ЦМР. Это справедливо как для участков в целом, так и для пахотных угодий в частности.

Различия длин значительно сокращаются при рассмотрении только пахотных угодий. Например, в пределах Воронежской области различия средних значений длин между эталонной моделью и глобальными ЦМР колеблются в диапазоне 67–128 м в пределах всего участка, сокращаясь до 1–29 м в пределах пашен. Анализируя длины склонов, получаемые с использованием разных ЦМР, можно сказать, что “новые” (FABDEM, COPERNICUS GLO-30, NASADEM) глобальные ЦМР не позволяют получить значения, более близкие к эталонным, чем значения, рассчитанные по “старым” (ASTER GDEM v.2, AW3D30, SRTM) ЦМР. Так, длины склонов, рассчитанные по модели ASTER GDEM, оказываются наиболее близкими к эталонным, в то время как при расчете по модели FABDEM получаемые значения больше всех других результатов расчетов отличаются от эталонной модели. Это справедливо для всех трех участков в пределах пашен в частности и всей территории участка вообще. Проведенный анализ использования различных методик гидрологической подготовки ЦМР для последующего расчета длин линий тока в пределах Воронежской области показывает, что средние значения длин, полученные с использованием разных методик, различаются. Однако соотношение цифр рассчитываемых длин остается тем же (табл. 4). По-прежнему наиболее близкие к эталонным значениям длины дает модель ASTER, а длины, полученные с использованием FABDEM, сильнее всего отличаются от эталона.

В результате анализа табл. 6 и 7 было установлено, что наименьшая ошибка эрозионного потенциала рельефа в пределах всех тестовых территорий свойственна глобальной модели FABDEM. Это справедливо как для всех типов земного покрова вообще, так и для пахотных угодий в частности. Модель FABDEM позволяет получить значения LS-фактора со средними абсолютными ошибками на 15–25% меньше в сравнении с моделью SRTM при анализе всех типов земного покрова и на 38–45% меньше в сравнении с моделью SRTM при анализе в пределах пахотных угодий. Анализ прочих свободно распространяемых глобальных ЦМР показывает, что, в отличие от крутизны склонов, не всегда новые глобальные ЦМР позволяют получить эрозионный потенциал рельефа с меньшими ошибками. Например, модели NASADEM и COPERNICUS GLO-30 в пределах всего тестового участка в Саратовской области дают чуть бóльшие ошибки, чем модель SRTM (табл. 6). Кроме этого, в пределах пахотных угодий на участке в Воронежской области ошибки ЭПР моделей AW3D30 и SRTM меньше, чем у NASADEM.

Таким образом, можно сказать, что современная свободно распространяемая глобальная ЦМР FABDEM содержит меньше ошибок при оценке угла наклона и эрозионного потенциала рельефа, что подтверждается при проведении исследований ошибок глобальных ЦМР, проведенных по всему миру [31]. В то же время не всегда новые глобальные ЦМР дают меньшие ошибки при оценке ЭПР. Так, например, модель NASADEM на некоторых рассмотренных участках несколько уступает модели SRTM при оценке ошибок эрозионного потенциала рельефа, тогда как в исследованиях, проведенных в Мексике [40] и Вьетнаме [17], было установлено, что модель NASADEM содержит меньше ошибок по сравнению с SRTM при анализе ошибок высот и положения структурных линий рельефа.

Поскольку эрозионный потенциал рельефа (LS-фактор) входит в универсальное уравнение потерь почвы (RUSLE) в качестве одного из факторов мультипликативной модели, то и погрешности при оценке эрозионных потерь почвы, выполненные на основе глобальных ЦМР, меньше при использовании ЦМР FABDEM (табл. 8). Ошибки модели COPERNICUS GLO-30 очень близки к ошибкам модели FABDEM. Нужно отметить также тот факт, что ошибки смыва почв, полученные с использованием моделей SRTM и NASADEM, не отличаются, а наибольшие ошибки получают при использовании модели ASTERGDEM.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен анализ точности морфометрических показателей (крутизны склонов, длин склонов, эрозионного потенциала рельефа), получаемых на основе как “новых” глобальных ЦМР (NASADEM, FABDEM, Copernicus GLO-30), так и “старых” (SRTM C-SIR, ASTERGDEM v.2, AW3D30) в пределах трех тестовых участков, расположенных в Воронежской, Саратовской и Оренбургской областях.

В результате сравнительного анализа было установлено, что наименьшие ошибки крутизны склонов позволяет получить модель FABDEM. Кроме этого, все рассмотренные “новые” ЦМР (NASADEM, FABDEM, Copernicus GLO-30) позволяют получить крутизну склона с меньшими ошибками, чем “старые” ЦМР. Полученные данные справедливы как в пределах всех участков в целом, так и в пределах пахотных угодий в частности. В результате анализа было установлено, что все глобальные ЦМР позволяют получить в пределах территории исследования значения длин склонов, превышающие эталонные значения. Более того, сравнительный анализ данных текущего исследования показывает, что длины склонов, полученные с использованием FABDEM, Copernicus GLO-30, еще сильнее завышают значения длин склонов, чем модели SRTM, AW3D30, ASTER GDEM v.2. Полученные выводы справедливы вне зависимости от метода гидрологической подготовки моделей рельефа. Анализ различий длин склонов показывает, что они в пределах пахотных угодий резко сокращаются.

Анализ ошибок эрозионного потенциала рельефа показывает, что модель FABDEM позволяет получить наименьшие ошибки эрозионного потенциала рельефа (LS-фактор), что приводит к получению наименьших ошибок при расчете эрозионных потерь почвы по сравнению со всеми другими анализируемыми глобальными ЦМР. При использовании FABDEM ошибки сокращаются на 15–25% в пределах всех типов землепользования и на 38–45% в пределах пашен. Не на всех рассмотренных участках использование моделей новых ЦМР NASADEM и Copernicus GLO-30 позволяет получить меньшие ошибки эрозионного потенциала рельефа по сравнению с моделью SRTM.

Глобальная ЦМР Copernicus GLO-30 дает несколько большие, но сопоставимые с FABDEM ошибки при расчете эрозионного потенциала рельефа, а модель NASADEM отличается большими ошибками по сравнению с Copernicus GLO-30 и FABDEM.

Наименьшие ошибки эрозионного потенциала рельефа, получаемые с помощью FABDEM, приводят к минимизации ошибок при расчете эрозионных потерь почвы на основе модели RUSLE.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты

докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан “Научно-технологическое развитие Республики Татарстан”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашаткин И. А., Мальцев К. А., Гайнутдинова Г. Ф., Усманов Б. М., Гафуров А. М., Ганиева А. Ф., Мальцева Т. С., Гиззатуллина Э. Р. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части Европейской территории России. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки, 2020. Т. 162. вып. 4. С. 612–628. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628>
2. Иванов М. А., Прищепов А. В., Голосов В. Н., Залалиев Р. Р., Ефимов К. В., Кондратьева А. А., Киняшова А. Д., Ионова Ю. К. Методика картографирования динамики пахотных угодий в бассейнах рек Европейской территории России за период 1985–2015 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 161–171.
3. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. — М.: ЦНИИГАиК, 2002. — 48 с.
4. Кузнецова, А. С., Пушкарев, А. А., Краснощеков, К. В. 2023. Применение FАВDEM и других современных цифровых моделей рельефа в системе аграрного мониторинга // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. Вып. 4. С. 139–147. <https://doi.org/10.25729/ESI.2023.32.4.012>
5. Литвин Л. Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. — М.: Академкн., 2002. — 255 с.
6. Мальцев К. А., Ермолаев О. П. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов // Геоморфология. — 2014. — № 1. — С. 45–52.
7. Мальцев К. А., Голосов В. Н., Гафуров А. М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях // Ученые записки казанского университета. Серия естественные науки. 2018, Т. 160, вып. 3 С. 514–530.
8. Оньков И. В., Онянова Т. Я., Шиляева О. Ю. Исследование точности радарных ЦМР, построенных по снимкам ALOS PALSAR и модели SRTM, в зависимости от вида отражающей поверхности // Геоматика. 2012. Вып 4. С. 33–36.
9. Толкачева В. Ф., Гарцман Б. И. Моделирование речной сети на основе цифровой модели рельефа (на примере Черноморского побережья Кавказа) // Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен : сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербург: Издательство ВВМ, 2023 С. 604–609.
10. Флоринский И. В. Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто, ИнтерГИС. 2021. Т. 27, вып. 2. С. 394–447.
11. Эрозионно-руслые системы: монография / под науч. ред. Р. С. Чалова, А. Ю. Сидорчука, В. Н. Голосова. М. : ИНФРА-М, 2017. 698 с
12. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D — 30m (AW3D30)” Japan. [2018]. URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30e.htm> (дата обращения 01.06 2020)
13. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 — summary of validation results, [2011]. URL: <https://pubs.usgs.gov/publication/70005960> (дата обращения 01.06 2020)
14. Barnes R. Parallel PriorityFlood depression filling for trillion cell digital elevation models on desktops or clusters // Computers & Geosciences. — 2016. — Vol. 96. — P. 56–68.
15. Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Sci. Total Environ. 2021. N 780. 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>

16. Buckley S. M., Agram P. S., Belz J. E., Crippen R. E., Gurrola E. M., Hensley S., Kobrick M. NASADEM: User Guide. Pasadena, California, 2020. 52 p.
17. Carrera-Hernández J. J. Not all DEMs are equal: An evaluation of six globally available 30 m resolution DEMs with geodetic benchmarks and LiDAR in Mexico // *Remote Sens. Environ.* 2021. N 261. 112474.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112474>
18. del Rosario González-Moradas M., Viveen W., Andrés Vidal-Villalobos R., Carlos Villegas-Lanza J. A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes // *CATENA*. 2023. № 228. 107160.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107160>
19. Desmet P. J. J., Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. № 51. P. 427–433.
20. Emmendorfer I. B., de Almeida L. P. M., Alves D. C. L., Emmendorfer L. R., Arigony-Neto J. Accuracy assessment of global DEMs for the mapping of coastal flooding on a low-lying sandy environment: Cassino Beach, Brazil // *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2024. N 74. 103535.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103535>
21. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E. et al. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission // *Rev. Geophys.* 2007. N 45. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
22. Ghannadi A., Alebooye S., Izadi M. Vertical accuracy assessment of copernicus DEM (case study: Tehran and Jam cities) // *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2023. N X-4/W1-202. P. 209–214.
<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-209-2023>
23. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environ. Res. Lett.* 2022. № 2, vol. 17. 024016.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
24. Hutchinson M. A new procedure for gridding elevation and stream of data with automatic removal of spurious pits // *J. Hydrol.* 1989. N 106. P. 211–232.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)
25. Hutchinson M. F. et al. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure // *Geomorphometry*. — 2011. — T. 2011. — C. 19–22.
26. Krđžalić D., Čatić J., Vrce E., Omićević D. Evaluating the accuracy of the digital elevation models (DEMs) within the territory of Bosnia and Herzegovina // *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 2024. N 34. 101187.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101187>
27. Lindsay J. B. Efficient hybrid breachingfilling sink removal methods for flow path enforcement in digitalelevation models // *Hydrological Processes*. — 2016a. — Vol. 30, no. 6. — P. 846–857.
28. Lopez-Vazquez C., Ariza-López F. Global Digital Elevation Model Comparison Criteria: An Evident Need to Consider Their Application // *ISPRS Int. J. Geo-Information*. 2023. N 12, 337.
<https://doi.org/10.3390/ijgi12080337>
29. Martz L. W., Garbrecht J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM // *Computers & Geosciences*. — 1999. — Vol. 25, no. 7. — P. 835–844.
30. Maune David F. ed. 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. 2nd ed. Bethesda, Md: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
31. Meadows M., Jones S., Reinke K. Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments // *Int. J. Digit. Earth* 2024. N 17. 2308734.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>

32. *Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L. R.* Modeling topographic potential for erosion and depositing using GIS // *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 1996. N 10. P. 629–641.
<https://doi.org/10.1080/0269379960890210>
33. *Nandam V., Patel P. L.* A framework to assess suitability of global digital elevation models for hydrodynamic modelling in data scarce regions // *J. Hydrol.* 2024. № 630. 130654.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130654>
34. USGS EROS Archive — Products Overview URL: <https://lta.cr.usgs.gov> (дата обращения 01.06.2020)
35. *Pipaud I., Loibl D., Lehmkuhl F.* Evaluation of TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments — A case study from SE Tibet, China // *Geomorphology.* 2015. N 246. P. 232–254.
36. *Planchon O., Darboux F.* A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // *Catena.* — 2001. — Vol. 46. — P. 159–176.
37. *Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C.* Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
<https://doi.org/DC0-16-048938-5-65-100>
38. *Soille P.* Morphological carving // *Pattern Recognition Letters.* — 2004. — Vol. 25, no. 5. — P. 543–550.
39. *Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I.* On the extraction of channel networks from digital elevation data // *Hydrol. Process.* 1991. N 5. P. 81–100.
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
40. *Tran T. N. D., Nguyen B. Q., Vo N. D., Le M. H., Nguyen, Q. D., Lakshmi V., Bolten J. D.* Quantification of global Digital Elevation Model (DEM) — A case study of the newly released NASADEM for a river basin in Central Vietnam // *J. Hydrol. Reg. Stud.* 2023. N 45. 101282.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101282>
41. *Van Rompaey A. J. J., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J.* Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // *Earth Surf. Process. Landforms.* 2001. N 26. P. 1221–1236.
<https://doi.org/10.1002/esp.275>
42. *Wischmeier W. H., Smith D. D.* Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.

Accuracy Analysis of New Freely Available Digital Terrain Models in the European Territory of Russia

K. A. Maltsev^{1,*}, S. N. Talipova^{2,}, I. I. Magzyanov^{3,***}, A. A. Somov^{4,****},
T. S. Maltseva^{5,*****}**

^{1, 2, 3, 4, 5} *Kazan Federal University, Kazan, Russia*

^{*} *E-mail: mlcvkirill@mail.ru*

^{**} *E-mail: ssaffiaaa@gmail.com*

^{***} *E-mail: ildanmag@bk.ru*

^{****} *E-mail: rooneyandre901@gmail.com*

^{*****} *E-mail: elka-tata_77@mail.ru*

Abstract — Since 2019, several new global-coverage DEMs (Copernicus GLO-30, NASADEM, FABDEM) have become publicly available on the Internet. They could be used to obtain morphometric indicators and assess model soil erosion losses, including within the European Territory of Russia (ETR), where the main arable lands of the Russian Federation are located. To date, a number of studies have been carried

out to assess the altitude accuracy of these models. However, in addition to absolute altitude errors, it is necessary to assess the accuracy of the of morphometric indicators calculated on the basis of these models.

The article presents the results of the analysis of errors of such morphometric indicators as slope steepness, slope length, and relief erosion potential of three new global digital elevation models using the example of three sites located in the Voronezh, Saratov and Orenburg regions. The analysis of errors was performed by comparing with data calculated on the basis of DEMs constructed from large-scale topographic maps.

It was found that the smallest errors in the estimated slope are demonstrated by the FABDEM model. In calculating slope lengths, none of the new models show a result that is superior in quality to what can be obtained using older DTMs (SRTM, etc.). However, for the LS-factor, the smallest errors are obtained when using the FABDEM model. The results obtained are valid both for the entire territory of each site in general and for arable lands in particular. The minimum values of errors in the LS-factor when using the FABDEM model lead to minimization of errors in calculating erosion losses of soil.

Keywords: NASADEM, Copernicus GLO-30, FABDEM, European territory of Russia, LS-factor

REFERENCES

1. *Ashatkin I. A., Maltsev K. A., Gainutdinova G. F., Usmanov B. M., Gafurov A. M., Ganieva A. F., Maltseva T. S., Gizzatullina E. R.* Analysis of relief morphometry by global DEM in the southern part of the European territory of Russia // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki.* 2020. T. 162. Vyp. 4. S. 612–628.
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-6282>
2. *Ivanov M. A., Prishchepov A. V., Golosov V. N., Zalyaliev R. R., Efimov K. V., Kondrat'eva A. A., Kinyashova A. D., Ionova Yu. K.* Method of croplands dynamics mapping in river basins of the European part of Russia for the period of 1985–2015 // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 161–171
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-161-171>
3. *Instruktsiya po fotogrammetricheskim rabotam pri sozdanii tsifrovyykh topograficheskikh kart i planov* [Instruction on Photogrammetry while Creating Digital Topographic Maps and Plans]. Moscow, TsNIIGAIK, 2002. 48 p.
4. *Kuznetsova, A. S., Pushkarev, A. A., Krasnoshchekov, K. V.* 2023. *Primeneniye FABDEM i drugikh sovremennykh tsifrovyykh modeley rel'yefa v sisteme agrarnogo monitoringa // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii.* 2023. Vyp. 4. S. 139–147.
<https://doi.org/10.25729/ESI.2023.32.4.012>
5. *Litvin L. F.* *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii.* — M.: Akademkn., 2002. — 255 c.
6. *Mal'tsev K. A., Yermolaev O. P.* Using DTM for automatic plotting of catchments. *Geomorfologiya.* 2014;(1):45-52.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-1-45-52>
7. *Maltsev K. A., Golosov V. N., Gafurov A. M.* Tsifrovyye modeli rel'yefa i ikh ispol'zovaniye v raschotakh tempov smyva pochv na pakhotnykh zemlyakh // *Uchenyye zapiski kazanskogo universiteta. Seriya yestestvennyye nauki.* 2018, T. 160, vyp. 3 S. 514–530
8. *On'kov I. V., Onyanova T. Ya., Shilyayeva O. Yu.* Issledovaniye tochnosti radarnykh TSMR, postroyennykh po snimkam ALOS PALSAR i modeli SRTM, v zavisimosti ot vida otrazhayushchey poverkhnosti // *Geomatika.* 2012. Vyp 4. S. 33–36.

9. *Tolkacheva V. F., Gartsman B. I.* Modelirovaniye rechnoy seti na osnove tsifrovoy modeli rel'yefa (na primere Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza) // Pyatyte Vinogradovskiy Chteniye. Hidrologiya v Epokhu Peremen : Sbornik Dokladov Mezhdunarodnoy Nauchnoykonferentsii Pamyati Vydavushchegosya Russkogo Uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo VVM, 2023 S. 604–609.

10. *Florinskiy I. V.* Geomorfometriya segodnya. InterKarto, InterGIS. 2021. T. 27. Vyp. 2. S. 394–447.

<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448>

11. Erozionno-ruslovnyye sistemy : monografiya / pod nauch. red. R. S. Chalova, A. Yu. Sidorchuka, V. N. Golosova. M. : INFRA-M, 2017. 698 s.

12. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D — 30m (AW3D30)” Japan. [2018]. URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30e.htm> (application date 01.06.2020)

13. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 — summary of validation results, [2011]. URL: <https://pubs.usgs.gov/publication/70005960> (application date 01.06.2020)

14. *Barnes R.* Parallel PriorityFlood depression filling for trillion cell digital elevation models on desktops or clusters // Computers & Geosciences. — 2016. — Vol. 96. — P. 56–68.

15. *Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. et al.* Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Sci. Total Environ. 2021. N 780. 146494.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>

16. *Buckley S. M., Agram P. S., Belz J. E., Crippen R. E., Gurrola E. M., Hensley S., Kobrick M.* NASADEM: User Guide. Pasadena, California, 2020. 52 p.

17. *Carrera-Hernández J. J.* Not all DEMs are equal: An evaluation of six globally available 30 m resolution DEMs with geodetic benchmarks and LiDAR in Mexico // Remote Sens. Environ. 2021. N 261. 112474.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112474>

18. *del Rosario González-Moradas M., Viveen W., Andrés Vidal-Villalobos R., Carlos Villegas-Lanza J.* A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes // CATENA. 2023. № 228. 107160.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107160>

19. *Desmet P. J. J., Govers G.* A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // Journal of Soil and Water Conservation. 1996. № 51. P. 427–433.

20. *Emmendorfer I. B., de Almeida L. P. M., Alves D. C. L., Emmendorfer L. R., Arigony-Neto J.* Accuracy assessment of global DEMs for the mapping of coastal flooding on a low-lying sandy environment: Cassino Beach, Brazil // Reg. Stud. Mar. Sci. 2024. N 74. 103535.

<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103535>

21. *Farr T. G., Rosen P. A., Caro E. et al.* 2007. The Shuttle Radar Topography Mission // Rev. Geophys. 2007. № 45.

<https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

22. *Ghannadi A., Alebooye S., Izadi M.* Vertical accuracy assessment of copernicus DEM (case study: Tehran and Jam cities) // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2023. NX-4/W1-202. P. 209–214.

<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-209-2023>

23. *Hawley L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J.* A 30m global map of elevation with forests and buildings removed // Environ. Res. Lett. 2022. № 2, vol. 17. 024016.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>

24. *Hutchinson M.* A new procedure for gridding elevation and stream of data with automatic removal of spurious pits // *J. Hydrol.* 1989. №106. P. 211–232.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)
25. *Hutchinson M. F. et al.* Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure // *Geomorphometry*. — 2011. — Т. 2011. — P. 19–22.
26. *Krdžalić D., Ćatić J., Vrce E., Omićević D.* Evaluating the accuracy of the digital elevation models (DEMs) within the territory of Bosnia and Herzegovina // *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 2024. N 34. 101187.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101187>
27. *Lindsay J. B.* Efficient hybrid breachingfilling sink removal methods for flow path enforcement in digitalelevation models // *Hydrological Processes*. — 2016a. — Vol. 30, no. 6. — P. 846–857.
28. *Lopez-Vazquez C., Ariza-López F.* Global Digital Elevation Model Comparison Criteria: An Evident Need to Consider Their Application // *ISPRS Int. J. Geo-Information*. 2023. № 12, 337.
<https://doi.org/10.3390/ijgi12080337>
29. *Martz L. W., Garbrecht J.* An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM // *Computers & Geosciences*. — 1999. — Vol. 25, no. 7. — P. 835–844.
30. *Maune David F.* ed. 2007. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. 2nd ed. Bethesda, Md: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
31. *Meadows M., Jones S., Reinke K.* Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments // *Int. J. Digit. Earth* 2024. N 17. 2308734.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>
32. *Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson, L. R.* Modeling topographic potential for erosion and depositing using GIS // *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 1996. № 10. P. 629–641.
<https://doi.org/10.1080/0269379960890210>
33. *Nandam V., Patel P. L.* A framework to assess suitability of global digital elevation models for hydrodynamic modelling in data scarce regions // *J. Hydrol.* 2024. № 630. 130654.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130654>
34. USGS EROS Archive — Products Overview URL: <https://lta.cr.usgs.gov> (application date 01.06.2020)
35. *Pipaud I., Loibl D., Lehmkuhl F.* Evaluation of TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments — A case study from SE Tibet, China // *Geomorphology*. 2015. № 246. P. 232–254.
36. *Planchon O., Darboux F.* A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevationmodels // *Catena*. — 2001. — Vol. 46. — P. 159–176.
37. *Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C.* *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Resived Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
<https://doi.org/DC0-16-048938-5-65-100>
38. *Soille P.* Morphological carving // *Pattern Recognition Letters*. — 2004. — Vol. 25, no. 5. — P. 543–550.
39. *Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I.* On the extraction of channel networks from digital elevation data // *Hydrol. Process*. 1991. N 5. P. 81–100.
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
40. *Tran T. N. D., Nguyen B. Q., Vo N. D., Le M. H., Nguyen Q. D., Lakshmi V., Bolten J. D.* Quantification of global Digital Elevation Model (DEM) — A case study of the newly released NASA-DEM for a river basin in Central Vietnam // *J. Hydrol. Reg. Stud.* 2023. № 45. 101282.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101282>

41. *Van Rompaey A. J. J., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J.* Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // *Earth Surf. Process. Landforms*. 2001. № 26. P. 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>

42. *Wischmeier W. H., Smith D. D.* Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.