УДК 551.4.013

doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.612-628

АНАЛИЗ МОРФОМЕТРИИ РЕЛЬЕФА ПО ГЛОБАЛЬНЫМ ЦМР В ПРЕДЕЛАХ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*И.А. Ашаткин, К.А. Мальцев, Г.Ф. Гайнутдинова, Б.М. Усманов,
А.М. Гафуров, А.Ф. Ганиева, Т.С. Мальцева, Э.Р. Гиззатуллина*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

В статье представлены результаты оценки точности четырех глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) на примере пяти ключевых участков, расположенных в пределах Европейской территории России. Анализ ошибок морфометрических показателей был выполнен на основе сравнения части глобальных ЦМР, представляющих рельеф выбранного участка, с заведомо более точными данными, в качестве которых выступали оцифрованные карты масштаба 1:10 000 и данные дистанционного зондирования Земли. В качестве морфометрических показателей для оценки точности моделей брались значения углов наклона и длин склонов. Из результатов сопоставления следует, что модели для углов наклона SRTM C-SIR и AW3D30 в большей мере соответствуют эталонной модели, а модели для длин склонов ASTER GDEM v.2 точнее по сравнению с остальными.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, SRTM, ASTER, ГИС

Введение

Глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР) широко используются во многих сферах наук о Земле, в частности геоморфологии, инженерной геологии, геоэкологии и т. д. На основе этих моделей могут быть вычислены различные морфометрические показатели [1], используемые как в научных, так и в прикладных работах, в том числе связанных с прогнозированием потерь почвенного слоя.

Получить ЦМР для расчета потенциальных потерь почвы можно несколькими способами, например, с помощью данных радиолокационных станций, полевых геодезических съемок, топографических карт и т. д. К весомым преимуществам глобальных ЦМР относятся их нахождение в открытом доступе и возможность широкого охвата земной поверхности, что очень важно для исследования больших территорий.

Хотя глобальные ЦМР являются одним из наиболее доступных методов получения информации для последующих расчетов [2] и обеспечивают довольно высокую точность измерений [3], они не лишены различных ошибок, что особенно важно учитывать при пространственном моделировании процессов эрозии [4], которые интенсивно протекают в южной, довольно сильно распаханной части Европейской территории России (ЕТР).

В большинстве эрозионных моделей используются два морфометрических параметра (угол наклона и длина склонов), которые рассчитываются на основе ЦМР. Для южной части ЕТР анализ точности этих морфометрических параметров, полученных на основе глобальных ЦМР с открытым доступом, широко не проводился. Оценка точности морфометрических показателей чаще всего выполняется на основе статистического анализа разностей между глобальной ЦМР и моделью рельефа, считающейся эталонной [5–9].

Целью настоящего исследования является установление глобальной свободно распространяемой ЦМР, приводящей к наименьшим ошибкам при определении таких морфометрических показателей, как угол наклона и длина склонов, для южной, наиболее распаханной части ЕТР. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) подготовить глобальные ЦМР (SRTM C-SIR, SRTM X-SAR, ALOS Word 3D-30m (AW3D30), ASTER GDEM v.2) и эталонные ЦМР в пределах тестовых участков;
- 2) сформировать выборки разностей морфометрических показателей;
- 3) провести статистический анализ выборок разностей.

1. Современное состояние изученности

На сегодняшний день точность высотных данных SRTM оценивают как 16 м (средняя ошибка) на 90%-ном доверительном интервале [10, 11]. На основании результатов многих исследований можно утверждать, что этот показатель соответствует заявленным характеристикам точности и в большинстве случаев превосходит их [12, 13]. При сложном рельефе точность данных топографической съемки падает, что является недостатком не только SRTM, но и остальных глобальных ЦМР. Согласно исследованию 2014 г., где сравнивались данные сенсоров C-SIR и X-SAR на примере Карпатских гор, было выявлено, что данные C-SIR имеют среднеквадратическое отклонение, меньшее в сравнении с X-SAR (14.74 и 38.47 м соответственно), и оба набора данных соответствуют заявленной точности (82% и 74% ошибок менее 16 м) [14]. В одном из исследований 2008 г. упоминается о систематических ошибках, появляющихся в зависимости от различных типов подстилающей поверхности [15]. По данным более ранних исследований анализ результатов интерполирования высот поверхности цифровых моделей рельефа топографической поверхности с известными отметками на территории Евразии позволяет определить с доверительной вероятностью 90% диапазон абсолютных вертикальных ошибок (от 0.9 до 5.4 м) и значение абсолютной горизонтальной ошибки (8.8 м) [16–18]. В 2011 г. было проведено сравнение данных ASTER GDEM v.2 и SRTM на территории Великой Китайской равнины и Лёссового плато и установлено, что в первом случае (для равнинной территории) точность данных была выше, чем во втором (для гористой территории) [19]. Среднеквадратическое отклонение для ASTER GDEM и SRTM составляло соответственно ± 7.95 и ± 2.22 м для равнины и ± 22.89 и ± 24.64 м для плато. Кроме этого, в 2017 г. исследовалась точность модели рельефа ASTER GDEM v.2 для участка, находящегося в Саудовской Аравии: выявленная авторами средняя ошибка в высотных данных варьировала в пределах ± 5.04 м [20]. В исследовании для территории Турции (г. Стамбул) точность ASTER GDEM

v.2 составила 20 м или больше, но в некоторых местах была не выше 40–50 м [21]. При сравнении морфометрии рельефа Филиппин с использованием ALOS, ASTER и SRTM было установлено, что все три модели завышают значения высот, но результаты измерений высоты с применением AW3D30 были признаны наиболее точными, так как эта ЦМР имеет наименьшую среднюю ошибку и стандартное отклонение среди остальных трех моделей. За AW3D30 следуют SRTM-30m и ASTER GDEM v.2. Превосходство AW3D30 над двумя другими ЦМР сохраняется даже при различных типах подстилающей поверхности [22, 23].

Анализу морфометрических показателей для ЕТР с использованием глобальных общедоступных ЦМР посвящен ряд исследований. Так, например, в 2016 г. был проведен анализ морфометрических показателей речных бассейнов ЕТР [24]. В 2018 г. был создан геопортал «Речные бассейны Европейской территории России». Геопортал основан на карте бассейнов малых рек Европейской России и предоставляет информацию о природных и антропогенных явлениях на этой территории, а также о ряде характеристик (геоморфометрии рельефа бассейнов; климатических параметрах, представляющих собой средние значения, сезонные колебания, экстремальные значения температуры и осадков; типах покровов; характеристиках почв; типе и подтипе ландшафта) [25].

Кроме того, анализу ошибок морфометрических показателей были подвергнуты разномасштабные топографические карты (1:25 000 и 1:200 000), представляющие рельеф территории Белгородской области. Было установлено, что разница в значениях морфометрических показателей для них может достигать 13% [26]. Была произведена оценка точности глобальных ЦМР – SRTM C-SIR и ASTER GDEM v.2 – на примере малого водосбора, расположенного на восточном склоне Среднерусской возвышенности в верховьях бассейна р. Ведуги. В качестве морфометрических показателей для оценки точности моделей брались значения углов наклона и длин склонов, поскольку они используются в моделях, рассчитывающих потенциальные потери почвы от водной эрозии. Из результатов сопоставления следует, что модель SRTM C-SIR в большей мере соответствует эталонной модели, чем модель ASTER GDEM v.2. Поэтому тестируемая версия модели SRTM предпочтительнее при проведении расчетов не только для определения среднегодовых темпов смыва почв в пределах речного бассейна, но и для создания карт интенсивности эрозии почв на склонах [27]. В 2015 г. для северных территорий России, а именно для Архангельской обл., было установлено, что из находящихся в свободном доступе ЦМР (GTOPO30, SRTM, SRTM Void Filled, GMTED2010, ACE2, ETOPO2 и ASTER GDEM v.2) наиболее подходящей является модель ASTER GDEM v.2 [28]. При этом количественный анализ ошибок морфометрических показателей таких глобальных ЦМР, как AW3D30, ArcticDEM, в пределах ЕТР не выполнялся вообще.

2. Наборы данных

Нами проведена количественная оценка ошибок четырех общедоступных ЦМР, расположенных в южной части ЕТР. Эти модели имеют одинаковое горизонтальное разрешение, и их можно рассматривать в качестве альтернативы друг другу при отсутствии более детальных данных.

Международный исследовательский проект по созданию цифровой модели рельефа – радиолокационная топографическая миссия шаттла (SRTM) – охватил 80% земной поверхности. В 2000 г. состоялась 11-дневная съемка Земли при помощи двух интерферометрических радиолокаторов с синтезированием апертуры (C-SIR и X-SAR), с разрешением 1", что соответствует в случае наших тестовых участков 30 м на местности. В процессе последующей постобработки данных проекта SRTM были получены различные модификации глобальных общедоступных ЦМР, представляющих рельеф суши с 60° с.ш. по 56° ю.ш. На настоящий момент доступны варианты модели SRTM, имеющие пространственное разрешение 1, 3, 30 угл. сек. При этом исходные данные миссии SRTM были получены при сотрудничестве различных космических агентств США, Германии и Италии.

Национальные агентства США, обрабатывая данные C-SIR, получили свои версии данной модели. Односекундная версия C-SIR была скачана нами с сайта геологической службы США [29]. Данные X-SAR обрабатывались Немецким аэрокосмическим центром DLR и были взяты нами с ресурса Германского центра авиации и космонавтики [30]. В 2009 г. на основе данных Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) – японского радиометра термоотражения – вышла первая версия глобальной ЦМР ASTER GDEM v.1 с охватом от 83° с.ш. до 83° ю.ш. и разрешением 1", а в 2016 г. появилась вторая версия этой модели, используемая в нашем исследовании, – ASTER GDEM v.2. Существует и третья версия ASTER GDEM v.3, выпущенная в августе 2019 г. [31], однако в настоящее время крайне мало независимых откликов о качестве этой модели в мировой литературе, поэтому мы не использовали её в настоящей работе. В наших исследованиях модель рельефа версии 2 взята с сайта Научно-исследовательского центра НАСА [32]. В 2015 г. в свободном доступе появилась глобальная ЦМР AW3D30 v.1.1 – ALOS World 3D-30m. Глобальные данные ЦМР AW3D30 были получены с использованием измерений панхроматического прибора дистанционного зондирования для стереофонического картирования (PRISM), проводимых с 2006 по 2011 г. Оператор спутника – Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA). Бесплатная версия ЦМР имеет разрешение 1 угл. сек., что эквивалентно примерно 30 м. Модель может быть загружена в виде плиток 1°×1°. Вертикальная точность матрицы высот, указанная производителем, составляет 5 м. Тем не менее некоторые исследователи обозначают, что вертикальная точность AW3D30 не превышает 4.1 м [33]. Версия 1.1 модели рельефа – AW3D30 – охватывает территорию поверхности суши с 82° с.ш. по 82° ю.ш. Модель с заполненными пропусками представляет модель рельефа суши с 60° с.ш. по 60° ю.ш. Она взята нами с сайта Японского агентства аэрокосмических исследований [34]. Рельеф ЕТР также представлен с помощью глобальной ЦМР – ArcticDEM [35]. Однако модель Arctic DEM не была нами рассмотрена, так как она представляет рельеф территории севернее 60° с.ш., где пашни в пределах ЕТР очень редки.

Все вышеперечисленные модели представлены в сети с использованием географических координат на референс-эллипсоиде WGS 84.

Рис. 1. Карта части Европейской территории России с отображением ключевых участков

3. Регион исследования

Исследование было проведено на тестовых участках в пределах ЕТР. Данный регион расположен на Восточно-Европейской равнине. Всего выделено пять ключевых участков (см. рис. 1), расположенных в разных субъектах РФ: Республика Татарстан (участки № 1 и 2); Воронежская обл. (участок № 3); Саратовская обл. (участок № 4); Оренбургская обл. (участок № 5).

Участок № 1, расположенный в пределах Республики Татарстан (РТ), площадью 1401 км², охватывает Альметьевский, Бугульминский, Лениногорский, Заинский, Сармановский районы и лежит в пределах гетерогенной возвышенности [36]. Участок частично покрыт лесом, при этом площадь лесов не превышает 30%.

Участок № 2, расположенный в пределах Спасского района РТ, площадью 1.48 км², находится в пределах пластовой субгоризонтальной равнины и целиком располагается в пределах пашни

Участок № 3 в Воронежской обл. также находится в пределах гетерогенной возвышенности, имеет площадь 324.04 км² и покрыт лесом на 2.6%

Участок № 4 располагается в пределах в Аткарского и Татищевского районов Саратовской обл., имеет площадь 322.21 км². Участок находится в пределах гетерогенной возвышенности и покрыт лесом на 14%.

Участок № 5 располагается в пределах Тоцкого района Оренбургской обл., имеет площадь 329 км². Участок находится в пределах гетерогенной возвышенности, лишенной лесного покрова.

4. Методика

Для построения эталонных моделей рельефа были использованы два вида данных. Во-первых, для четырех тестовых участков (№ 1, 3–5) были использованы оцифрованные по крупномасштабным топографическим картам тематические слои, несущие информацию о рельефе: отметки высот, горизонталы, положение объектов гидрографии, бровки оврагов и обрывы. Во-вторых, для тестового участка № 2 были использованы данные аэрофотостереосъемки.

Основываясь на данных топографических карт, при помощи алгоритма М. Хатчинсона [37], реализованного в программном комплексе ArcGIS, были построены эталонные модели для четырех тестовых участков. Указанный алгоритм использует метод итеративной конечно-разностной интерполяции. По сути, это модифицированный метод дискретного сплайна [38], для которого изменена методика оценки резких изменений ландшафта, таких как гребни, обрывы, промоины и т. д. Размер ячейки для этих эталонных моделей был выбран 5×5 м. Выбор данного параметра был обоснован плановой погрешностью топографических карт масштаба 1:10 000 [39]. В качестве системы координат для всех эталонных моделей была выбрана система Пулково 1942, глобальные ЦМР были также представлены с использованием этой системы координат (рис. 2 и 3).

Пятая эталонная модель была основана на данных аэрофотосъемки. Съемка велась с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4, обоснование марок выполнялось прибором ГНСС Leica Zeno 20. В результате было получено облако точек LAS в количестве 103 072 081, среднее расстояние между точками 0.2 м. При помощи ПО ArcGIS был построен растр с размером ячейки 1×1 м, что обеспечивает большую точность по сравнению как с данными топографических карт, так и с данными рассмотренных глобальных ЦМР.

Прежде чем перейти к расчету рассматриваемых морфометрических показателей, мы провели гидрологическую коррекцию всех рассматриваемых ЦМР. Суть гидрологической коррекции заключается в удалении локальных западин на данных ЦМР. Данная коррекция была выполнена с использованием методики программного комплекса ArcGIS [40]. После подготовки были вычислены такие морфометрические показатели, как углы наклона, которые были рассчитаны в ПО Surfer.

Для расчета углов наклона была использована формула

$$S = \frac{180}{\pi} \arctg \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2},$$

где $\partial z / \partial x$ и $\partial z / \partial y$ – частные производные вдоль координатных осей.

Расчет длин склонов может быть произведен различными способами [41]. Мы оценивали длину склонов с использованием длины линий тока и рассчитывали в ПО ArcGIS [42].

В результате расчетов для каждого рассмотренного участка были получены пять вариантов моделей углов наклона и пять вариантов моделей длин линий тока на основе эталонных и тестируемых ЦМР. Для углов наклона сравнение производилось с помощью количественной оценки разности между эталонными моделями

Рис. 2. Эталонные цифровые модели рельефа по ключевым участкам (№ 1, Республика Татарстан и № 5, Оренбургская обл.)

и глобальными ЦМР по формуле

$$\Delta M = M_{\text{пров}} - M_{\text{ЦМР}},$$

где ΔM – разность углов наклона, $M_{\text{пров}}$ – углы наклона эталонной модели рельефа, построенные по данным с топографических карт и данным БПЛА, $M_{\text{ЦМР}}$ – углы наклона глобальных ЦМР. Далее был произведен статистический анализ полученных значений. Длины склонов оценивались на основе нескольких статистических показателей, в этом случае разность между эталонной и глобальной ЦМР не использовалась.

Рис. 3. Эталонные цифровые модели рельефа по ключевым участкам (№ 4, Саратовская обл. и № 3, Воронежская обл.)

5. Результаты

Исходя из полученных значений разности углов наклона пяти ключевых участков, можно сделать вывод, что наиболее точными глобальными ЦМР являются SRTM C-SIR и с чуть менее точными результатами AW3D30. Можно с уверенностью сказать, что для расчета данных углов наклона предпочтительнее использовать именно эти модели. ASTER GDEM v.2 оказалась наименее точной, так как разности значений имеют наибольшие значения. Результаты представлены в табл. 1.

Для участка в Оренбургской обл. наиболее точной моделью является SRTM C-SIR, ее средняя ошибка в 7 раз меньше, чем ошибка AW3D30, в 31 раз

Табл. 1

Статистические показатели выборки разностей углов наклона (град.) для различных участков

Статистический показатель	AW3D30	ASTER GDEM v.2	SRTM C-SIR	SRTM X-SAR
Участок № 1, Республика Татарстан				
Средняя ошибка	-0.516	3.857	-0.516	1.649
Стандартное отклонение	4.989	7.000	4.989	5.671
Участок № 2, Республика Татарстан				
Средняя ошибка	0.177	3.296	-1.27	1.440
Стандартное отклонение	13.209	19.128	11.225	15.428
Участок № 3, Воронежская обл.				
Средняя ошибка	1.070	4.773	0.081	1.490
Стандартное отклонение	3.537	5.712	2.857	3.327
Участок № 4, Саратовская обл.				
Средняя ошибка	2.332	4.709	1.732	1.732
Стандартное отклонение	3.747	4.356	3.428	3.428
Участок № 5, Оренбургская обл.				
Средняя ошибка	0.705	7.218	0.089	2.807
Стандартное отклонение	2.437	6.660	1.928	3.294

Табл. 2

Статистические показатели выборки длин склонов (м) для различных участков

Статистический показатель	AW3D30	ASTER GDEM v.2	SRTM C-SIR	SRTM X-SAR	Эталонная ЦМР
Участок № 1, Республика Татарстан					
Средняя длина	267.452	257.019	259.713	238.942	116.769
Стандартное отклонение	1913.097	2070.711	1883.032	1705.690	1037.473
Участок № 2, Республика Татарстан					
Средняя длина	110.473	77.561	57.514	78.386	19.536
Стандартное отклонение	113.443	79.690	58.954	98.076	85.969
Участок № 3, Воронежская обл.					
Средняя длина	210.395	197.268	216.142	204.161	130.658
Стандартное отклонение	1108.582	1060.761	1047.266	1077.849	602.700
Участок № 4, Саратовская обл.					
Средняя длина	224.063	212.735	233.036	222.237	130.956
Стандартное отклонение	1201.010	1233.812	1138.213	1238.102	670.793
Участок № 5, Оренбургская обл.					
Средняя длина	213.295	195.812	220.226	144.798	136.704
Стандартное отклонение	958.606	1017.189	957.866	468.108	473.155

меньше, чем ошибка при использовании SRTM X-SAR, и в 81 раз меньше, чем ошибка ASTER GDEM v.2, для стандартного отклонения результаты распределяются таким же образом. В Воронежской обл. наиболее точной моделью для получения углов наклона оказалась SRTM C-SIR, средняя ошибка в ней в 18 раз меньше, чем ошибки AW3D30, в 31 раз меньше, чем в модели SRTM X-SAR, и в 59 раз меньше, чем ошибка ASTER GDEM v.2. Та же картина наблюдается и для стандартного отклонения. Для участка в Саратовской обл. наименьшие ошибки и значения стандартных отклонений наблюдаются в моделях SRTM X-SAR и SRTM C-SIR. Для участка № 1 РТ наименьшая средняя ошибка и наименьшее стандартное отклонение наблюдаются при использовании моделей SRTM C-SIR и AW3D30. На участке № 2 РТ наименьшая средняя ошибка достигается при использовании модели AW3D30, наименьшее стандартное отклонение в модели SRTM C-SIR.

На основе полученных значений длин линий тока для пяти участков можно сделать иные выводы в сравнении с углами наклона. Все модели в разных пределах завышают длину склонов, при этом средние значения длины склонов в пределах большинства участков при переходе от одной глобальной ЦМР к другой мало различаются.

Наибольшие завышения длин линий тока на тестовых участках наблюдаются при использовании модели SRTM C-SIR в пределах Воронежской, Оренбургской и Саратовской областях. При этом наиболее близкие значения к эталонной модели на этих участках наблюдаются в отношении модели ASTER GDEM v.2 (см. табл. 2). На участках, расположенных в пределах РТ, наблюдается несколько иная картина, так на участке № 1 наилучшей по-прежнему является модель ASTER GDEM v.2 (за исключением модели SRTM X-SAR, имеющей пропуски данных). На участке № 2 наилучший результат показывает модель SRTM C-SIR (см. табл. 2). Кроме того, необходимо отметить, что на этом участке, где в качестве тестовых данных брались данные, полученные на основе аэрофотостереосъемки, различия между длинами, полученными по глобальным ЦМР и эталонной ЦМР, становятся значительными.

Заключение

Из всех рассмотренных глобальных цифровых моделей рельефа в пределах южной части ЕТР наиболее точной моделью для последующего расчета углов наклона и потенциальных потерь почвы является модель SRTM C-SIR. Ошибки этой модели изменяются в пределах тестовых участков от 0.08° до 1.27° по модулю.

Кроме того, необходимо отметить, что длины склонов, рассчитанные по глобальным ЦМР, значительно превышают значения, полученные с помощью эталонных ЦМР, и эти различия тем больше, чем детальнее эталонные данные. При этом средние значения длин склонов, рассчитанные с помощью глобальных ЦМР на рассмотренных тестовых участках, довольно близки. Модель ASTER GDEM v.2 позволяет рассчитать наиболее реалистичные значения длин склонов для большинства тестовых участков.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00064).

Литература

1. Pike R., Evans I., Hengle T. Geomorphometry: A brief guide // Hengl T., Reuter H.I. (Eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – P. 3–30. – doi: 10.1016/S0166-2481(08)00001-9.
2. 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 landslide risk assessment: A review // *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* – 2019. – V. 8, No 12. – Art. 545, P. 1–25. – doi: 10.3390/ijgi8120545.
3. Pipaud I., Loibl D., Lehmkühl 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. – V. 246. – P. 232–254. – doi: 10.1016/j.geomorph.2015.06.025.
4. 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. – V. 117, No F3. – Art. F03017, P. 1–17. – doi: 10.1029/2011JF002289.
5. Wood J. The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models: Ph.D. Thesis. – Leicester: University of Leicester, 1996. – URL: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.561299>.
6. Rodriguez F., Maire E., Courjault-Radé P., Darrozes J. The Black Top Hat function applied to a DEM: A tool to estimate recent incision in a mountainous watershed (Estibère Watershed, Central Pyrenees) // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – V. 29, No 6. – P. 9-1–9-4. – doi: 10.1029/2001GL014412.
7. Schmidt J., Hewit A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position // *Geoderma*. – 2003. – V. 121, No 3–4. – P. 243–256. – doi: 10.1016/j.geoderma.2003.10.008.
8. Iwahashi J., Pike R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature // *Geomorphology*. – 2007. – V. 86, No 3–4. – P. 409–440. – doi: 10.1016/j.geomorph.2006.09.012.
9. Yakar M. Digital elevation model generation by robotic total station instrument // *Exp. Tech.* – 2008. – V. 33, No 2. – P. 52–59. – doi: 10.1111/j.1747-1567.2008.00375.x.
10. Berry P.A.M., Garlick J.D., Smith R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry // *Remote Sens. Environ.* – 2007. – V. 106, No 1. – P. 17–27. – doi: 10.1016/j.rse.2006.07.011.
11. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werne, M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The shuttle radar topography mission // *Rev. Geophys.* – 2007. – V. 45, No 2. – Art. 2005RG000183, P. 1–33. – doi: 10.1029/2005RG000183.
12. Mouratidis A., Briole P., Katsambalos K. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: A case study from North Greece // *Int. J. Remote Sens.* – 2010. – V. 31, No 23. – P. 6205–6222. – doi: 10.1080/01431160903401403.
13. Hofton M., Dubayah R., Blair J.B., Rabine D. Validation of SRTM elevations over vegetated and non-vegetated terrain using medium footprinting lidar // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* – 2006. – V. 72, No 3. – P. 279–285. – doi: 10.14358/PERS.72.3.279.
14. Kolecka N., Kozak J. Assessment of the accuracy of SRTM C- and X-band high mountain elevation data: A case study of the Polish Tatra Mountains // *Pure Appl. Geophys.* – 2014. – V. 171. – P. 897–912. – doi: 10.1007/s00024-013-0695-5.
15. Miliareis G. The landcover impact on the aspect/slope accuracy dependence of the SRTM-1 elevation data for the Humboldt range // *Sensors (Basel)*. – 2008. – V. 8, No 5. – P. 3134–3149. – doi: 10.3390/s8053134.

16. *Оньков И.В.* Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. – 2011. – № 3. – С. 40–46.
17. *Karwel A.K., Ewiak I.* Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland // *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* – 2008. – V. XXXVII, Pt. B7. – P. 169–172.
18. *Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S.* An assessment of the SRTM topographic products: Tech. Report JPL D-31639. – Pasadena, Calif.: Jet Propul. Lab., 2005. – 143 p.
19. *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. – V. 32, No 23. – P. 8081–8093. – doi: 10.1080/01431161.2010.532176.
20. *Elkhrachy I.* Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER digital elevation models: A case study of Najran city, Saudi Arabia // *Ain Shams Eng. J.* – 2018. – V. 9, No 4. – P. 1807–1817. – doi: 10.1016/j.asej.2017.01.007.
21. *Sertel E.* Accuracy Assessment of Aster Global Dem over Turkey // *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* – 2011. – V. XXXVIII, Pt. 4. – P. 1–5. – URL: <https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part4/files/Sertel.pdf>.
22. *Santillan J.R., Makinano-Santillan M., Makinano R.M.* Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philippines // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. – Beijing, 2016. – P. 5374–5377. – doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730400.
23. *Bayık Ç., Becek K., Mekik Ç., Özendi M.* On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model // *Remote Sens. Lett.* – 2018. – V. 9, No 6. – P. 607–615. – doi: 10.1080/2150704X.2018.1453174.
24. *Ivanov M.A., Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Shynbergenov Y.A.* Geomorphometric analysis of river basins in East European Russia using SRTM and ASTER GDEM data // *J. Eng. Appl. Sci.* – 2016. – V. 11, No 14. – P. 3080–3087.
25. *Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A.* Cartographic model of river basins of European Russia // *Geogr. Nat. Resour.* – 2017. – V. 38, No 2. – P. 131–138. – doi: 10.1134/S1875372817020032.
26. *Нарожная А.Г., Буряк Ж.А.* Морфометрический анализ цифровых моделей рельефа Белгородской области разной степени генерализации // *Науч. ведомости БелГУ. Сер. Естеств. науки.* – 2016. – № 25. – С. 169–178.
27. *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. – Т. 160, кн. 3. – С. 514–530.
28. *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.
29. The Long Term Archive. – URL: <https://lta.cr.usgs.gov>.
30. Earth observation center. – URL: http://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214_read-17716.
31. New Version of the ASTER GDEM. – URL: <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/new-aster-gdem>.
32. ASTER Global Digital Elevation Map. – URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.
33. *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. – doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326657.

34. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D-30m (AW3D30)”. – URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.
35. ArcticDEM – Polar Geospatial Center. – URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem>.
36. Национальный атлас России. Т. 2: Природа и экология / Отв. ред. Г.Ф. Кравченко. – М.: ПКО «Картография», 2007. – 496 с.
37. *Hutchinson M.F.* A new procedure for gridding elevation and stream of data with automatic removal of spurious pits // *J. Hydrol.* – 1989. – V. 106, No 3–4. – P. 211–232. – doi: 10.1016/0022-1694(89)90073-5.
38. *Wahba G.* Spline Models for Observational Data. – Philadelphia: Soc. Ind. Appl. Math., 1990. – xvi + 161 p. – doi: 10.1137/1.9781611970128.
39. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 48 с.
40. *Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I.* On the extraction of channel networks from digital elevation data // *Hydrol. Processes.* – 1991. – V. 5, No 1. – P. 81–100. – doi: 10.1002/hyp.3360050107.
41. *Vigiak O., Malagó A., Bouraoui F., Vanmaercke M., Poesen J.* Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins // *Sci. Total Environ.* – 2015. – V. 538. – P. 855–875. – doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.095.
42. *Jenson S.K., Domingue J.O.* Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information-system analysis // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* – 1988. – V. 54, No 11. – P. 1593–1600.

Поступила в редакцию
03.06.2020

Ашаткин Иван Александрович, студент Института экологии и природопользования

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: vanya7397@yandex.ru

Мальцев Кирилл Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: mlcvkirill@mail.ru

Гайнутдинова Гульшат Флюровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: gulshat-13@yandex.ru

Усманов Булат Мансурович, старший преподаватель кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: busmanof@kpfu.ru

Гафуров Артур Маратович, кандидат географических наук, ассистент кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: gafurov.kfu@gmail.com

Ганиева Аделя Фаритовна, студент Института экологии и природопользования

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *adelya.ganieva.1997@mail.ru*

Мальцева Татьяна Сергеевна, студент Института экологии и природопользования

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *elka-tata_77@mail.ru*

Гиззатуллина Этери Рафаэлевна, студент Института экологии и природопользования

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *etheryramon@gmail.com*

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2020, vol. 162, no. 4, pp. 612–628

doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.612-628

Analysis of Relief Morphometry by Global DEM in the Southern Part of the European Territory of Russia

*I.A. Ashatkin**, *K.A. Maltsev***, *G.F. Gainutdinova****, *B.M. Usmanov*****, *A.M. Gafurov******,
*A.F. Ganieva******, *T.S. Maltseva******, *E.R. Gizzatullina******

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

E-mail: **vanya7397@yandex.ru*, ***mlcvkirill@mail.ru*, ****gulshat-13@yandex.ru*,
*****busmanof@kpfu.ru*, ******gafurov.kfu@gmail.com*, ******adelya.ganieva.1997@mail.ru*,
******elka-tata_77@mail.ru*, ******etheryramon@gmail.com*

Received June 3, 2020

Abstract

The accuracy of four global digital elevation models (GDEMs) was assessed at five key sites in the European part of Russia. Errors observed in the morphometric parameters were analyzed by comparing GDEMs representing the relief of the selected area with more accurate data (1:10 000 maps) and the remote sensing data. The values and lengths of the slopes were used as the statistical indicators to estimate the accuracy of the models. The results of the comparison show that the slope models SRTM C-SIR and AW3D30 are more consistent with the verification model, while the model of slope lengths ASTER GDEM v.2 is the most accurate one.

Keywords: digital elevation model, SRTM, ASTER, GIS

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-17-00064).

Figure Captions

Fig. 1. Map of the part of the European territory of Russia showing the key sites under study.

Fig. 2. Verification digital relief models based on the topographic data on the key sites (Republic of Tatarstan (no. 1), Orenburg region (no. 5)).

Fig. 3. Verification digital relief models based on the topographic data on the key sites (Saratov region (no. 4), Voronezh region (no. 3)).

References

1. Pike R., Evans I., Hengle T. Geomorphometry: A brief guide. In: Hengl T., Reuter H.I. (Eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software Applications*. Elsevier, Amsterdam, 2009, pp. 3–30. doi: 10.1016/S0166-2481(08)00001-9.
2. 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 landslide risk assessment: A review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 2019, vol. 8, no. 12, art. 545, pp. 1–25. doi: 10.3390/ijgi8120545.
3. 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, vol. 246, pp. 232–254. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.06.025.
4. 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, vol. 117, no. F03017, pp. 1–17. doi: 10.1029/2011JF002289.
5. Wood J. The Geomorphological characterisation of Digital Elevation Models. *Ph.D. Thesis*. Leicester, Univ. of Leicester, 1996. Available at: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.561299>.
6. Rodriguez F., Maire E., Courjault-Radé P., Darrozes J. The Black Top Hat function applied to a DEM: A tool to estimate recent incision in a mountainous watershed (Estibère Watershed, Central Pyrenees). *Geophys Res. Lett.*, 2002, vol. 29, no. 6, pp. 9-1–9-4. doi: 10.1029/2001GL014412.
7. Schmidt J., Hewitt A. 4. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*, 2003, vol. 121, nos. 3–4, pp. 243–256. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.10.008.
8. Iwahashi J., Pike R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 2007, vol. 86, nos. 3–4, pp. 409–440. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.09.012.
9. Yakar M. Digital elevation model generation by robotic total station instrument. *Exp. Tech.*, 2008, vol. 33, no. 2, pp. 52–59. doi: 10.1111/j.1747-1567.2008.00375.x.
10. Berry P.A.M., Garlick J.D., Smith R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. *Remote Sens. Environ.*, vol. 106, no. 1, pp. 17–27. doi: 10.1016/j.rse.2006.07.011.
11. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.*, 2007, vol. 45, no. 2, art. 2005RG000183, pp. 1–33. doi: 10.1029/2005RG000183.
12. Mouratidis A., Briole P., Katsambalos K. SRTM 3"DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: A case study from North Greece. *Int. J. Remote Sens.*, 2010, vol. 31, no. 23, pp. 6205–6222. doi: 10.1080/01431160903401403.
13. Hofton M., Dubayah R., Blair J.B., Rabine D. Validation of SRTM elevations over vegetated and non-vegetated terrain using medium footprinting lidar. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2006, vol. 72, no. 3, pp. 279–285. doi: 10.14358/PERS.72.3.279.
14. Kolecka N., Kozak J. Assessment of the accuracy of SRTM C- and X-band high mountain elevation data: A case study of the Polish Tatra Mountains. *Pure Appl. Geophys.*, 2014, vol. 171, pp. 897–912. doi: 10.1007/s00024-013-0695-5.
15. Miliareisis G. The landcover impact on the aspect/slope accuracy dependence of the SRTM-1 elevation data for the Humboldt range. *Sensors* (Basel), 2008, vol. 8, no. 5, pp. 3134–3149. doi: 10.3390/s8053134.
16. On'kov I.V. Assessment of the accuracy of SRTM heights for orthotransformation of high-resolution satellite imagery. *Geomatika*, 2011, no. 3, pp. 40–46. (In Russian)
17. Karwel A.K., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland. *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 2008, vol. XXXVII, pt. B7, pp. 169–172.
18. Rodriguez, E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. In: *Technical Report JPL D-31639*. Pasadena, Calif. Jet Propul. Lab., 2005. 143 p.

19. 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, vol. 32, no. 23, pp. 8081–8093. doi: 10.1080/01431161.2010.532176.
20. Elkhachy, I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER digital elevation models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. *Ain Shams Eng. J.*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1807–1817. doi: 10.1016/j.asej.2017.01.007.
21. Sertel E. Accuracy assessment of ASTER Global DEM over Turkey. *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 2011, vol. XXXVIII, pt. 4, pp. 1–5. Available at: <https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part4/files/Sertel.pdf>.
22. Santillan J.R., Makinano-Santillan M., Makinano R.M. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philippines. *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS)*. Beijing, 2016, pp. 5374–5377. doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730400.
23. Bayık Ç., Becek K., Mekik Ç., Özendi M. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model. *Remote Sens. Lett.*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 607–615. doi: 10.1080/2150704X.2018.1453174.
24. Ivanov M.A., Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Shynbergenov Y.A. Geomorphometric analysis of river basins in East European Russia using SRTM and ASTER GDEM data. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2016, vol. 11, no. 14, pp. 3080–3087.
25. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneva E.A. Cartographic model of river basins of European Russia. *Geogr. Nat. Resour.*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 131–138. doi: 10.1134/S1875372817020032.
26. Narozhnyaya A.G., Buryak Zh.A. Morphometric analysis of digital elevation models of the Belgorod region with varying degrees of generalization. *Nauch. Vedomosti BelGU. Ser. Estestv. Nauki*, 2016, no. 25, pp. 169–178. (In Russian)
27. Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M. Digital elevation models and their use for assessing soil erosion rates on arable lands. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 3, pp. 514–530. (In Russian)
28. Mineev A.L., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V. Building a digital elevation model for studying exogenous processes in the northern territories of the Russian Federation. *Prostranstvo Vremya*, 2015, no. 3, pp. 278–291. (In Russian)
29. The Long Term Archive. Available at: <https://lta.cr.usgs.gov>.
30. Earth observation center. Available at: http://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214_read-17716.
31. New Version of the ASTER GDEM. Available at: <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/new-aster-gdem>.
32. ASTER Global Digital Elevation Map. Available at: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.
33. 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, pp. 3822–3825. doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326657.
34. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D-30m (AW3D30)”. Available at: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.
35. ArcticDEM – Polar Geospatial Center. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>.
36. *Natsional'nyi atlas Rossii* [National Atlas of Russia]. Kravchenko G.F. (Ed.). Vol. 2: Nature and ecology. Moscow, PKO “Kartografiya”, 2007. 496 p. (In Russian)
37. Hutchinson M.F. A new procedure for gridding elevation and stream of data with automatic removal of spurious pits. *J. Hydrol.*, 1989, vol. 106, nos. 3–4, pp. 211–232. doi: 10.1016/0022-1694(89)90073-5.
38. Wahba G. *Spline Models for Observational Data*. Philadelphia, Soc. Ind. Appl. Math., 1990. xvi + 161 p. doi: 10.1137/1.9781611970128.

39. *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. (In Russian)
40. Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrol. Processes*, 1991, vol. 5, no. 1, pp. 81–100. doi: 10.1002/hyp.3360050107.
41. Vigiak O., Malagó A., Bouraoui F., Vanmaercke M., Poesen J. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. *Sci. Total Environ.*, 2015, vol. 538, pp. 855–875. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.095.
42. Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 1988, vol. 54, no. 11, pp. 1593–1600.

Для цитирования: 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, кн. 4. – С. 612–628. – doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.612-628.

For citation: 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 Estestvennye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 4, pp. 612–628. doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.612-628. (In Russian)