

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА FABDEM ДЛЯ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ (на примере Макажойской котловины, Чеченская Республика)

Е.А. Смирнов, Д.А. Кочнева

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), г. Москва
smirnov.e.a@list.ru; kochneva.d.a@yandex.ru

Аннотация. Выполнена оценка вертикальной точности глобальной цифровой модели рельефа FABDEM на двух участках на территории Макажойской котловины, Чеченская Республика. Данные для сравнения получены путем фотограмметрической обработки материалов беспилотной аэрофотосъемки. Средние расхождения между матрицами высот составили 0,31 м для первого участка и –0,71 м для второго, средние абсолютные расхождения – 2,52 м и 1,31 м соответственно.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, цифровые модели рельефа, FABDEM.

Введение. Глобальные цифровые модели рельефа являются мощным инструментом для моделирования окружающей среды и пространственного анализа любой точки планеты. Наиболее обширное применение они нашли в исследованиях в области геоморфологии, гидрологии и геологии [1; 2]. За последние 25 лет было создано множество глобальных цифровых моделей рельефа с использованием различных технологий дистанционного зондирования – ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, NASADEM и др. Самыми сложными участками для описания рельефа при использовании любых технологий являются горные районы. Проведено множество исследований по оценке вертикальной точности данных моделей. Так, например, средняя точность SRTM в горных районах составляет 7–9 м [4], ASTER – 10 м [5], TanDEM-X – 10 м [6].

Одной из современных глобальных моделей рельефа на данный момент является FABDEM (Forest And Building remove Copernicus DEM). Как видно из названия, получена она путем удаления деревьев и зданий из модели Copernicus GLO-30. Пространственное разрешение – 1 угловая секунда (около 30 м на экваторе). Создатели заявляют среднюю абсолютную ошибку 1,61 м в городских районах, 2,88 м в лесах и предупреждают о возможных ошибках на участках с крутыми склонами [7]. Исследования показывают, что в масштабе всего Земного шара FABDEM показывает наименьшие ошибки вертикальной точности среди самых популярных моделей, при этом на участках

с уклоном до 35 градусов средние ошибки близки к 0 м, а при увеличении крутизны склонов до 45 градусов достигают 2–3 м [8].

Работа выполнена с использованием материалов, полученных в ходе мультидисциплинарной научно-практической экспедиции студентов МИИГАиК в Чеченскую Республику, состоявшейся в партнерстве с Чеченским государственным университетом им. А.А. Кадырова в сентябре 2023 г. Целью данной работы стала оценка модели FABDEM по нескольким критериям: 1) общая вертикальная точность; 2) пригодность модели для выявления артефактов рельефа и исторической реконструкции природных условий и хозяйственного освоения территории, а конкретно – террас антропогенного происхождения; 3) оценка пригодности модели для использования в качестве информации о рельефе при выполнении полетов беспилотников. Анализ проводился для двух тестовых участков Макажойской котловины. Дополнительно выполнено сравнение исследуемой модели с SRTM.

Область работ. Макажойская котловина – среднегорный регион в юго-восточной части Чечни (рис. 1). Котловина представляет собой высокое известняковое плато, расчлененное долинами эрозионных форм и ограниченное по бокам плоскосводчатыми хребтами. В верхних частях склонов повсеместно наблюдаются оползни. Кроме того, в этой области широко распространены антропогенные формы рельефа, такие как земельные террасы [9].

Первый участок находится на южном склоне Чеберлойского каньона, имеет площадь 1,05 км² и уклон рельефа около 27°, покрыт травянистой растительностью. Ширина террас вдоль склона варьируется от 10 до 100 м, а перепад высот между соседними достигает 20 м. Второй участок находится на северном склоне Чеберлойского каньона, имеет площадь 1,11 км² и средний уклон около 21°. На втором участке расположен карбоновый полигон Чеченского государственного университета WayCarbon, территория покрыта преимущественно травянистой растительностью, поперек склона участок прорезают несколько оврагов с глубиной 7–10 м, на склонах которых произрастают кустарники и деревья. Этот участок представлял наибольший интерес для исследования в контексте корректности удаления деревьев из глобальной цифровой модели рельефа (ЦМР) FABDEM. Средняя ширина террас вдоль склона равна 30–35 м, а перепад высот между соседними – около 10 м.

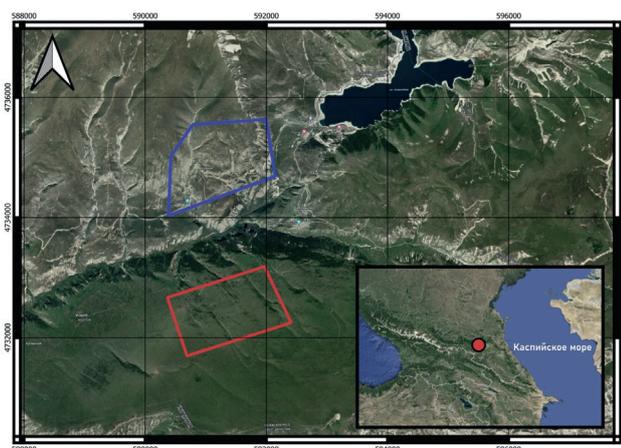


Рис. 1. Географическое положение объектов исследования: красная метка – область Макажойской котловины; синий полигон – участок 1 (террасированный южный склон), красный полигон – участок 2 (полигон ЧГУ)

Материалы и методы. Работы по аэрофото съемке (АФС) и воздушному лазерному сканированию (ВЛС) выполнялись с использованием беспилотного воздушного судна (БВС) ГЕОСКАН 401 Lidar. Полезная нагрузка, установленная на БВС, представляет комплексную систему совместного выполнения АФС и ВЛС, состоящую из камеры Sony Alpha 6000 20 мм и лазерного сканера AGM-MS1. Всего было выполнено 10 полетов, вся фотограмметрическая обработка выполнялась в программном обеспечении (ПО) Agisoft

Metashape. После выполнения фототриангуляции с самокалибровкой среднеквадратические отклонения (СКО) на контрольных точках в плане и по высоте на участке 1 не превышали 0,08 м и 0,07 м, а на участке 2 – 0,05 м и 0,05 м соответственно. В качестве выходных продуктов получены ортофотопланы с разрешением 10 см и ЦМР с размером ячейки 0,5 м (рис. 2). Данный размер был выбран для минимизации шумов и сохранения форм рельефа в виде террас. Обработка данных лазерного сканирования выполнялась в ПО Terrascan и «Кредо 3D СКАН». После фильтрации и классификации облаков точек была создана ЦМР на фрагмент участка 2 также с шагом 0,5 м. Ошибки матриц высот по высоте на контрольных точках не превышали 9 см для фотограмметрической технологии и 5 см для лазерного сканирования. Также было выполнено сравнение матриц высот, полученных по двум технологиям, на небольшом фрагменте участка 2. СКО составило 0,16 м, средний модуль = 0,12 м. В ходе обработки материалов лазерного сканирования на участке 1 и половине участка 2 возникли проблемы с расчетом траектории движения беспилотника, что привело к появлению случайных сдвигов данных из соседних маршрутов и полетов. Работа над решением данной проблемы продолжается. Для дальнейшего анализа были выбраны ЦМР, созданные фотограмметрическим способом. Подробнее с технологией и этапами обработки можно ознакомиться в статье [10].

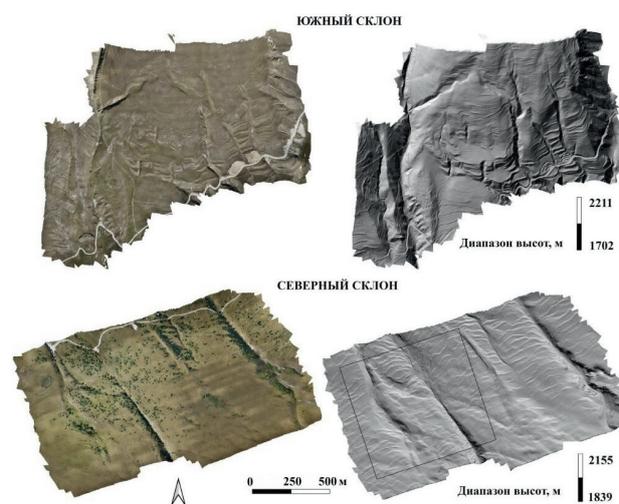


Рис. 2. Результаты, полученные по материалам аэрофото съемки. Слева – ортофотопланы, справа – цифровые модели рельефа на участок 1 (сверху) и участок 2 (снизу) [10]

Фрагмент FABDEM версии 1-0 в формате TIFF был загружен из хранилища исследовательских данных Университета Бристоля [11]. В цифровой фотограмметрической системе PHOTOMOD 7 тайл был трансформирован из исходной системы координат WGS 84 в WGS 84\UTM 38N, новый размер ячейки был установлен равным 30 м. Из

общего фрагмента был вырезан участок, покрывающий только Макажойскую котловину.

Сравнение с референсными матрицами высот выполнялось также в ЦФС PHOTOMOD 7 посредством построения матриц разности ($\text{ЦМР}_{\text{FABDEM}} - \text{ЦМР}_{\text{ФГМ}}$) и анализа статистических показателей (рис. 3).

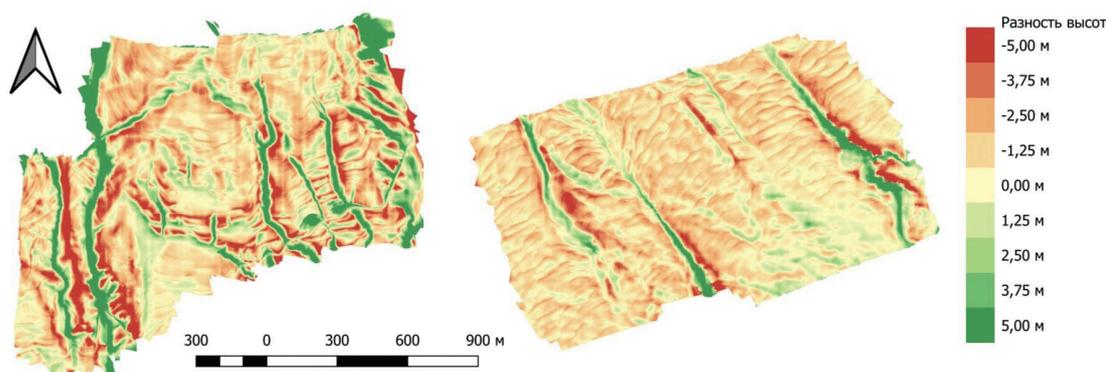


Рис. 3. Матрицы разности $\text{ЦМР}_{\text{FABDEM}} - \text{ЦМР}_{\text{ФГМ}}$ для участка 1 (слева) и участка 2 (справа)

Результаты. В результате были получены четыре матрицы разности (по две для FABDEM и SRTM). В таблице 1 приведены статистические показатели для двух участков.

Таблица 1. Статистические характеристики матриц разности

Матрицы разности	Область	Среднее, м	Ср. модуль	СКО, м	Мода, м
FABDEM	Участок 1	0,31	2,52	4,41	-1,47
	Участок 2	-0,71	1,33	1,81	-1,28
SRTM	Участок 1	-7,84	8,57	9,74	-8,06
	Участок 2	-10,63	10,68	11,28	-8,48

Ожидаемо на матрицах разности FABDEM четко выделяются глубокие, но узкие промоины и овраги. Отличия в высотах в этих частях были по большей части положительные, то есть матрица FABDEM сглаживала неровности до уровня бровок. При этом на относительно пологих склонах с террасами чаще встречаются отрицательные значения разности – глобальная матрица ниже референсной. На матрицах разности SRTM было обнаружено большое число выбросов, в целом она менее сглажена.

Заключение. Общая вертикальная точность глобальной цифровой модели рельефа FABDEM

на исследуемом участке соответствует значениям, полученным в других исследованиях, – среднее отклонение не превышает 1 м [8]. Глобальные цифровые модели рельефа нельзя использовать для моделирования небольших форм рельефа, в данном случае искусственных террас. Целесообразность проведения съёмочных работ для получения точных цифровых моделей рельефа с использованием беспилотных систем подтвердилась. При этом матрица может использоваться как рельефная подложка при выполнении беспилотной аэросъёмки, в ней отсутствуют дыры и выбросы с выбивающимися значениями высот (в отличие от SRTM).

Список литературы

1. Hancock G.R. et al. A comparison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology: Australian examples // Earth

Surface Processes and Landforms: the Journal of the British Geomorphological Research Group. 2006. Vol. 31. No. 11. P. 1394–1412.

2. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications // *Hydrological processes*. 1991. Vol. 5. No. 1. P. 3–30.
3. Uuemaa E. et al. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 21. P. 3482.
4. Kolečka 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 and Applied Geophysics*. 2014. Vol. 171. P. 897–912.
5. Eckert S., Kellenberger T., Itten K. Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from ASTER data in mountainous terrain // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26. No. 9. P. 1943–1957.
6. Gdulová K., Marešová J., Moudrý V. Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 241. P. 111724.
7. Hawker L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. No. 2. P. 024016.
8. 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 // *International Journal of Digital Earth*. 2024. Vol. 17. No. 1. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>.
9. Атаев З.В., Идрисов И.А. Природно-ресурсный потенциал горных ландшафтов Макажойской котловины (Северо-Восточный Кавказ) // *Известия ДГПУ. Естественные и точные науки*. 2023. № 2.
10. Скрытцына Т.Н., Воротилов А.Г., Кочнева Д.А., Смирнов Е.А. Некоторые итоги комплексной экспедиции МИИГАиК в Чеченскую Республику // *ГЕОПРОФИ*. 2024. № 2. С. 10–17.
11. Laurence Hawker, Jeffrey Neal. FABDEM V1-0. 2021. <https://doi.org/10.5523/bris.25wfy0f9ukoge2gs7a5mqrq2j7>.

**ACCURACY ASSESSMENT OF THE GLOBAL FABDEM DIGITAL ELEVATION MODEL
FOR MOUNTAINOUS AREAS
(using the example of the Makazhoy Basin, Chechen Republic)**

E.A. Smirnov, D.A. Kochneva

Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow
smirnov.e.a@list.ru; kochneva.d.a@yandex.ru

Abstract. The vertical accuracy of the FABDEM global digital elevation model (DEM) was assessed at two sites in the territory of the Makazhoy basin, Chechen Republic. The data for comparison were obtained by photogrammetric processing of unmanned aerial photography materials. Mean differences between DEM were 0.31 m for the first section and -0.71 m for the second section, mean absolute differences were 2.52 m and 1.31 m, respectively.

Keywords: remote sensing, digital elevation models, FABDEM.

References

1. Hancock G.R. et al. 2006. A comparison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology: Australian examples. *Earth Surface Processes and Landforms: the Journal of the British Geomorphological Research Group*. 31(11): 1394–1412.
2. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*. 5(1): 3–30.
3. Uuemaa E. et al. 2020. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sensing*. 12(21): 3482.
4. Kolecka N., Kozak J. 2014. Assessment of the accuracy of SRTM C-and X-Band high mountain elevation data: A case study of the Polish Tatra Mountains. *Pure and Applied Geophysics*. 171: 897–912.
5. Eckert S., Kellenberger T., Itten K. 2005. Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from ASTER data in mountainous terrain. *International Journal of Remote Sensing*. 26(9): 1943–1957.
6. Gdulová K., Marešová J., Moudrý V. 2020. Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment. *Remote Sensing of Environment*. 241: 111724.
7. Hawker L. et al. 2022. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*. 17(2): 024016.
8. Meadows M., Jones S., Reinke K. 2024. Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments. *International Journal of Digital Earth*. 17(1). <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>.
9. Ataev Z.V., Idrisov I.A. 2023. [Natural resource potential of the mountain landscapes of the Makazhoy basin (North-Eastern Caucasus)]. *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and exact sciences*. 2. (In Russian).
10. Skrypitsyna T.N., Vorotilov A.G., Kochneva D.A., Smirnov E.A. 2024. [Some results of the integrated MIIGAiK expedition to the Chechen Republic]. *GEOPROFI*. 2: 10–17. (In Russian).
11. Laurence Hawker, Jeffrey Neal. 2021. FABDEM V1-0. <https://doi.org/10.5523/bris.25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7>.