



Research Article

Received: March 07, 2022

Accepted: April 19, 2022

Published: April 20, 2022

ISSN 2658-5553

Open elevation WorldDEM in comparison with aerial laser scanning

Grebenyuk, Egor Alexandrovich^{1*} Novik, Anatoly Nikolaevich¹

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russian Federation; inj5@yandex.ru (G.E.A); novik.anatoliy@inbox.ru (N.A.N)

Correspondence:* email inj5@yandex.ru contact phone [+79819856494](tel:+79819856494)

Keywords:

Surfaces; SRTM; DEM; WorldDEM; Open Elevation; Digital Models; CIM; BIM

Abstract:

The object of research is open digital elevation models - Airbus WorldDEM with a spatial accuracy of 24 meters taking into account the anthropogenic environment. There was analyzed their's compliance with the real surface (a result of aerial geodetic surveying) for different coverings in the territory of Nizhny Novgorod agglomeration, Russia. Used **method** of researching – create compare surfaces between two data sources (by survey and open elevation – WorldDEM) with subsequent sorting count of points by their's elevation's differences. In each area, we had been finding places with the biggest elevation collisions and determined real objects, which were the reason for detected collisions. As a **result**, we made a conclusion about the possibility of using WorldDEM for villages and water surfaces where elevation's collision is less than the data's accuracy; there are many deviations in parks and forests with dense natural; in high-rise urban's environments there is permanent vertical's offset in results surfaces, that may be a reason of no-detail (24m) of used open elevation data.

1 Introduction / Введение

Появление открытых источников данных о рельефе относят к началам 2000х, когда проводились первые спутниковые съемки с целью получения рельефных карт всей планеты (миссия SRTM) [1]. По мере совершенствования средств обработки данных и технического оснащения спутников, росла точность и возможности обработки [2]. Через несколько лет после начала миссии SRTM, запустили анализ рельефа на базе технологии теплового излучения и отражения (ASTER DEM) [3]. Параллельно с совершенствованием технологии съемки и обработки, ученые стали дополнять имеющиеся данные другими съемками (например, комбинировали SRTM и ASTER DEM для получения лучших данных) [4]. Следовавшие сравнения двух источников данных приводили к следующим результатам – по разным наблюдениям SRTM показывал себя лучше на равнинных территориях, а ASTER – в районах со сложным рельефом [5-9]. В [10] отмечалось, что при склонах рельефа до 10 градусов рельеф выглядит похожим на реальный, в то время как при больших значениях его выразительность падает. Отдельно выделяли искажение картины местности в местах с ярко выраженным рельефом только при использовании SRTM (за счет самого подхода к съемке со спутника) [11]. Встречались предложения, что в качестве лучшего источника данных о высотах следует обращаться к материалам на базе измерений NASA ICESAT [12].

Отдельное направление исследований о возможности использования открытых моделей рельефа относят к наблюдениям за реками, ледниками и прогнозированию наводнений. В подобных задачах важна точная передача форм рельефа за минусом растительности и существующих сооружений. Первые цифровые модели отличались отсутствием фильтрации

Grebenyuk E.; Novik A.

Open elevation WorldDEM in comparison with aerial laser scanning;
2022; *AlfaBuild*; 22 Article No 2203. doi: 10.57728/ALF.22.3



геометрии, об этом отмечалось в [13-15]. В [16] фиксировалось, что SRTM в общем случае лучше ASTER, но на больших пространствах ввиду неопределенности рельефа результат расчета становятся необъективными. Интересно, что даже современные изыскания [17] отмечают недостаточную точность данных в районах крупных рек мира.

Учет растительности в ранних съемках не велся, но закладывался на как направление для будущих алгоритмов обработки [18-19]. Эволюция учета растительности в цифровых моделях рельефа изложена в [20].

Эволюционно-новые данные под общим названием Airbus WorldDEM, об истории разработки которых написано в [21-22], отличаются повышенной точностью к SRTM v3 и концепцией «чистой земли» - без застройки и растительности. К слову, в некоторых публикациях за последние 4 года за отсутствием на местах информации о реальных инженерно-геодезических изысканиях принимали за идеал рельеф WorldDEM [9]. Оценку точности рельефу по WorldDEM приводили в [23], сравнивая продольные профили взлетно-посадочных полос с построенными по этим данным, в качестве вывода фиксировали независимость вертикальной точности от сложности форм рельефа (влияние искажений было минимально).

Особый интерес представляет оценка точности рельефа для городских пространств – с большим числом сторонних объектов, потенциально идентифицируемых спутником за формы рельефа (общественные парки, здания, транспортную инфраструктуру и пр.). Оценка данных в городских средах освещалась в [24,25]; при этом [24] отмечали прямую зависимость средней погрешности высоты от конкретных типов поверхностей земли.

Проблематика использования цифровых моделей рельефа связана с уменьшившимися сроками на разработку проектной документации и временем на реализацию проекта, из-за чего на начальной стадии работ часто нужно начинать закладывать проектные решения без готовности полевых геодезических изысканий; и вопрос стоит в том, какую точность ожидать от открытых источников. В частности, в [26] делался вывод о непригодности ни одного из источников для прямого использования для проектирования аэродромов в Беларуси, в [27] наоборот – для района Дагестана приводилось, что модели ALOS World DEM пригодны (сравнивая их с пунктами ГГС). В настоящей статье делается сравнение последней реализации открытой информации о рельефе Земли, поверхностях WorldDEM по сравнению с воздушной лазерной съемкой на густонаселенную Нижегородскую агломерацию. Достаточность подобных данных подтверждена экспериментально в [28], где производилась оценка точности итоговых цифровых моделей местности, сформированных по результату фотограмметрического подхода и съемки с LIDAR, при чем разница в объемах земляных работ между поверхностями по моделям, по сравнению с полевыми изысканиями, составила около 9 раз в пользу более точного LIDAR.

Отметим, что почти все публикации оценивают высотную точность прямым сравнением отметок для известных точек; в [29] приводится машинный алгоритм оценки, мы же будем придерживаться методу построения поверхности сравнения между отдельными контрольными участками в пределах агломерации с разными формами рельефа и плотностью застройки.

Таким образом, обозначим цель настоящей статьи как производство сравнительного анализа двух источников данных (открытых цифровых моделей рельефа WorldDEM и данных воздушного лазерного сканирования) для оценки точности открытых данных по сравнению с реальными инженерными изысканиями. В качестве сопутствующих задач отметим анализ полученных отклонений и поиск причины их возникновения (от каких естественных или искусственных форм местности).

Для объективности анализа, в настоящем исследовании отобраны различные поверхности для анализа в пределах Нижегородской городской агломерации (Нижегородская область, Россия): 34-км участок реки Оки (Россия) до её впадения в реку Волга (Россия); горный склон нагорной части г. Нижний Новгород до р. Оки (Россия); 2 городские парковые зоны – Сормовский парк и Анкудиновский лесопарк; 2 участка застройки – плотная городская застройка в районе сквера им. Максима Горького и около упомянутого Анкудиновского лесопарка.

2 Materials and Methods / Материалы и методы исследования

Общая логика исследования в рамках статьи представлена на Рис. 1 ниже. Процесс, указанный как «Сравнение фрагментов облаков точек» опирается на программную реализацию алгоритма численного сравнения двух облаков точек «Cloud/Cloud dist» по модулю разности между точками облаков в среде программы с открытым исходным кодом CloudCompare.

Grebenyuk E.; Novik A.

Open elevation WorldDEM in comparison with aerial laser scanning;
2022; *AlfaBuild*; 22 Article No 2203. doi: 10.57728/ALF.22.3

В упомянутом инструменте «Cloud/Cloud dist», использовались следующие настройки:

- Octree level = 5.8;
- Local model: Least squares plane;
- опция “use reference sensor to filter hidden points” (для исключения из анализа участков с недостающим данными).

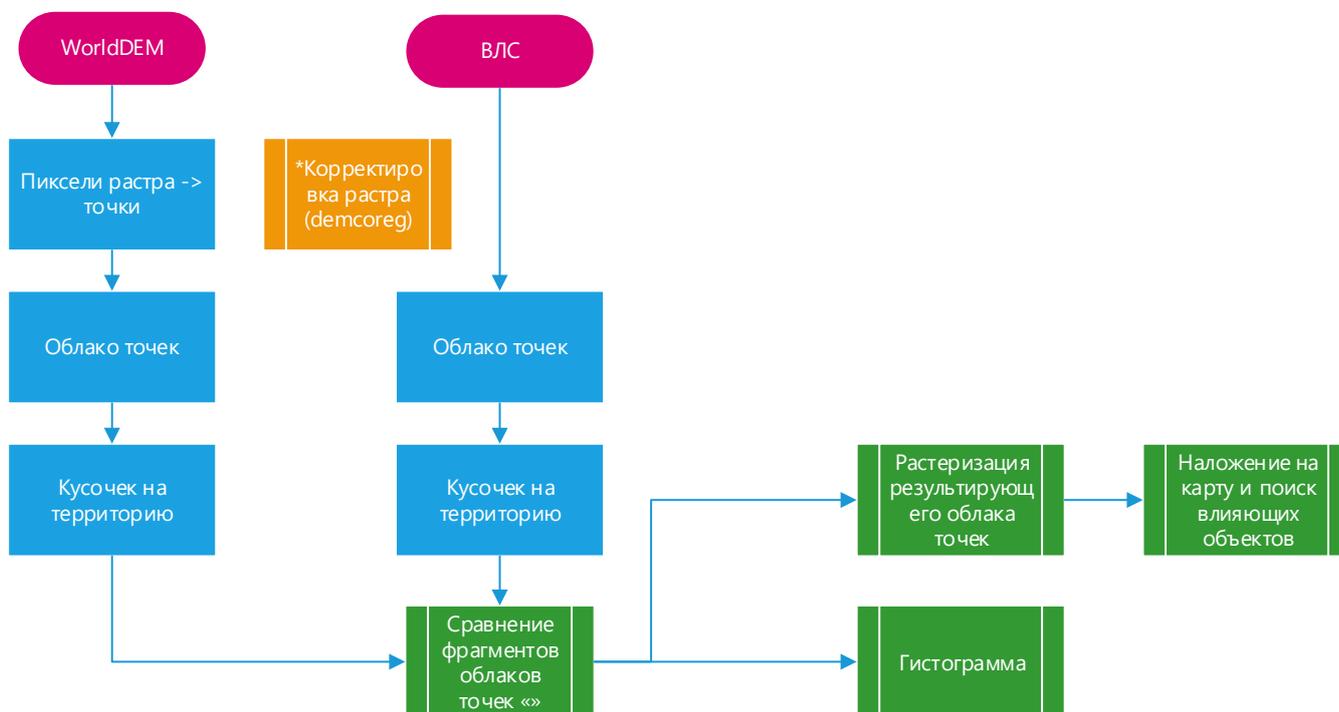


Рис. 1 – Методика анализа данных
Fig. 1 – Methodic of data analyze

Для проведения исследования 2 образца исходных данных (растровые карты рельефа WorldDEM и воздушная лазерная съемка) были преобразованы к одному типу данных – облакам точек и перепроецированы в одну систему координат – для возможности прямого анализа.

Высоты модели WorldDEM не корректировались (переход от эллипсоидальных к нормальным – в Балтийской системе высот), хотя в общем случае для больших территорий это желательно производить, если известен характер DEM-моделей, например – при помощи python-библиотеки demcoreg, применение которой освещено в [30]. В данной статье проанализирована не абсолютная точность – а именно частота встречаемости шумов и выразительность рельефа, что в рамках ограниченной зоны позволяет пренебречь разной природой высоты данных.

Конечный результат - распределение невязок по высоте открытых моделей рельефа WorldDEM от форм естественного рельефа (материалам воздушного лазерного сканирования).

3 Results and Discussion / Результаты и их анализ

Упомянутые во введении к статье площадки для анализа условно разнесены на 3 группы – водные объекты (разделы 3.1-3.2), растительность (раздел 3.3) и застройка (раздел 3.4). Раздел 3.5 содержит ошую оценку полученных данных.

3.1. For water areas / Для водных объектов

В качестве площадки анализа данных был выбран 34-км участок реки Оки (Россия) до её впадения в р. Волга (Россия) с захватом 1600-метровой области вдоль условной оси реки. На участке есть пару островов и берега рек (где зона захвата их включает); там как раз характерно наличие максимальных невязок по высоте. При этом число точек с «экстремальными» высотами – от 10 до 34 метра составляет лишь 2% данных. Ситуационный план и результирующие гистограммы приведены на Рис. 2-3 ниже.



Рис. 2 – Ситуационный план (слева) и результирующая карта высотных отклонений для участка по р. Ока (справа)
Fig. 2 – Situation plan (left) and result map of height deviations for area at Oka river (right)

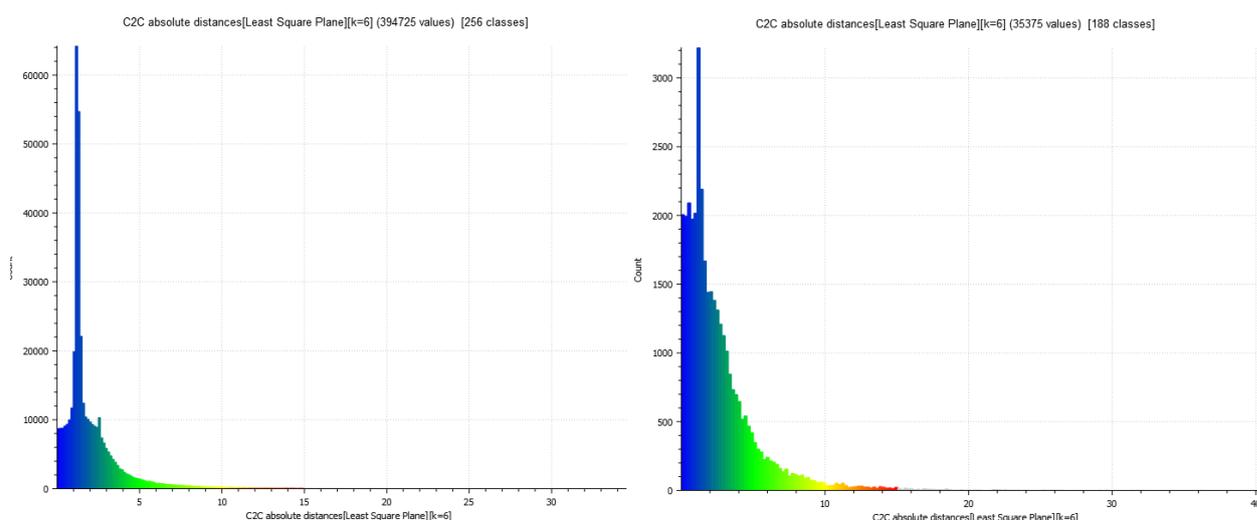


Рис. 3 – Гистограммы распределения невязок числа точек по высоте; слева – для реки Оки, справа – для участка на склоне к ней
Fig. 3 – Histogramms for function of distribution the point's count by height; in left – for Oka river, in right – for area at slope to that (in bottom)

3.2. For coast areas / Для береговой зоны

Дополнительно был проанализирован участок местности на крутом склоне (с естественным перепадом высоты 120 метров). Ситуационный план участка и карта отклонений высоты приведена на Рис. 4 ниже:

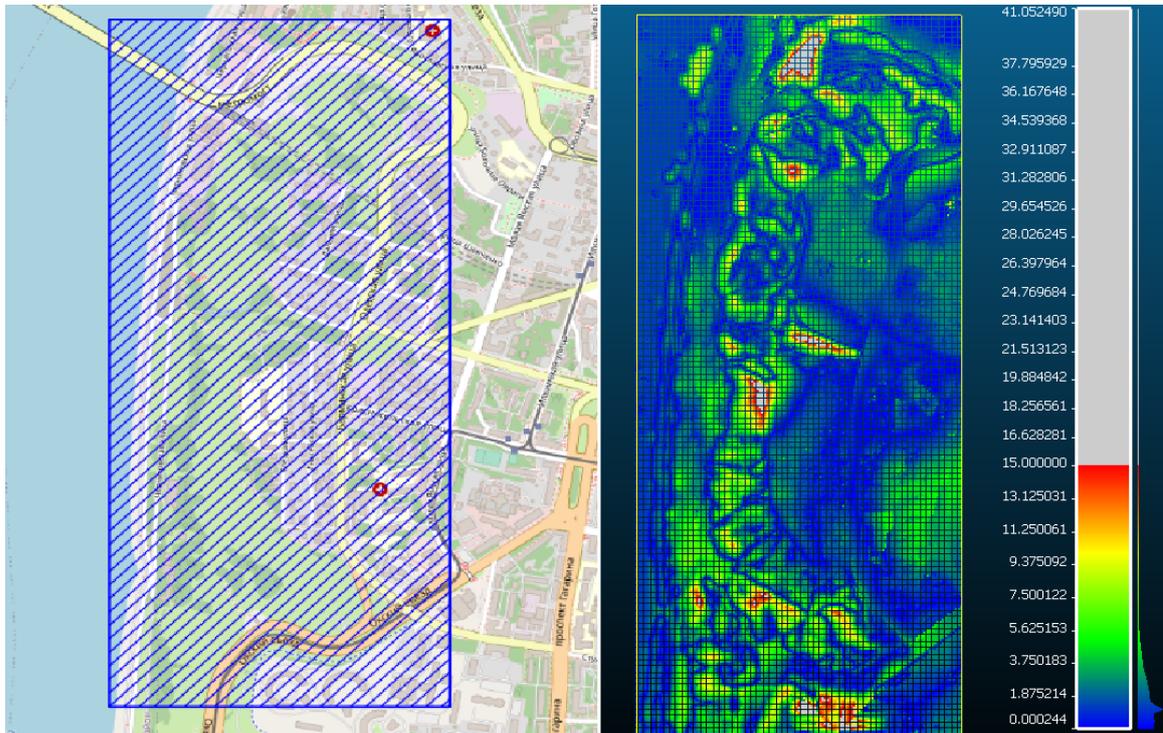


Рис. 4 – Ситуационный план (слева) и результирующая карта высотных отклонений для участка на склоне реки (справа)

Fig. 4 – Situation plan (left) and result map of height deviations for area at slope to Oka river (right)

Стоит обратить внимание на участки наибольших невязок – они проиллюстрированы на Рис. 5 ниже (как наложение результата растеризации облака точек на картографическую подоснову). Как видно из него – в основном, это участки растительности. Грубые ошибки обведены в розовые кружки – в части мест это растительность (густые заросли, принятые за естественный рельеф, низменная дорога в овраге с погрешностями более 15м. Два участка – искусственные сооружения. Северная зона – эстакадный участок автомобильной дороги, вписывающийся в ландшафт, а снизу – застройка. Обратим внимание на низкие погрешности при передаче общего рельефа склона.

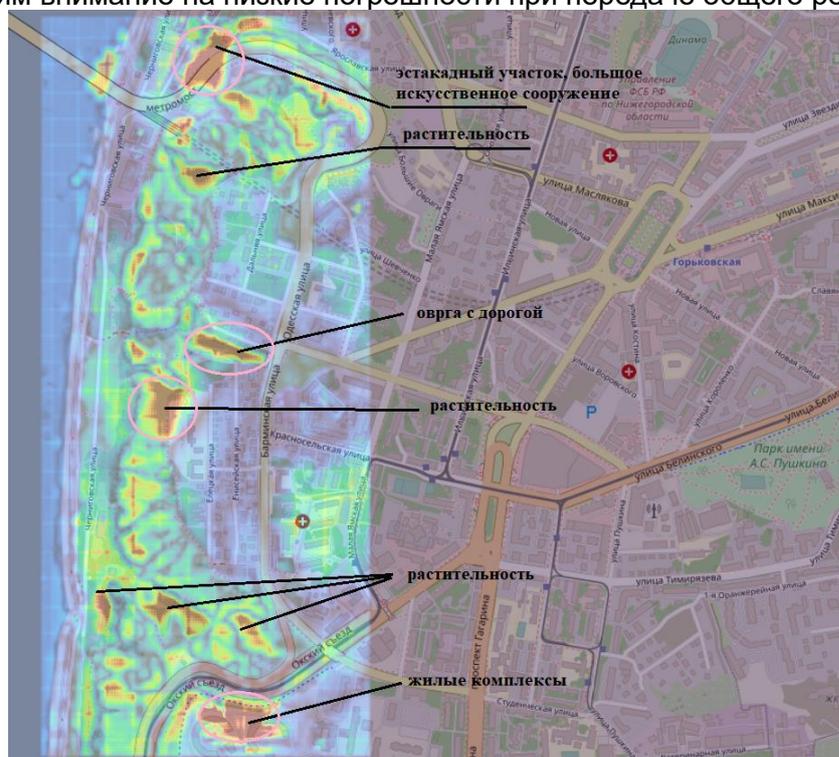


Рис. 5 – Анализ мест с наибольшей погрешностью высот для участка у р. Оки (Россия)

Fig. 5 – Analyze places with highrst of height deviation for area at slope to Oka river (Russia)

3.3 For parks / Для парков

В качестве объекта анализа был выбран Сормовский парк в г. Нижний Новгород. Ситуационный план участка и карта отклонений высоты приведена на Рис. 6 ниже:

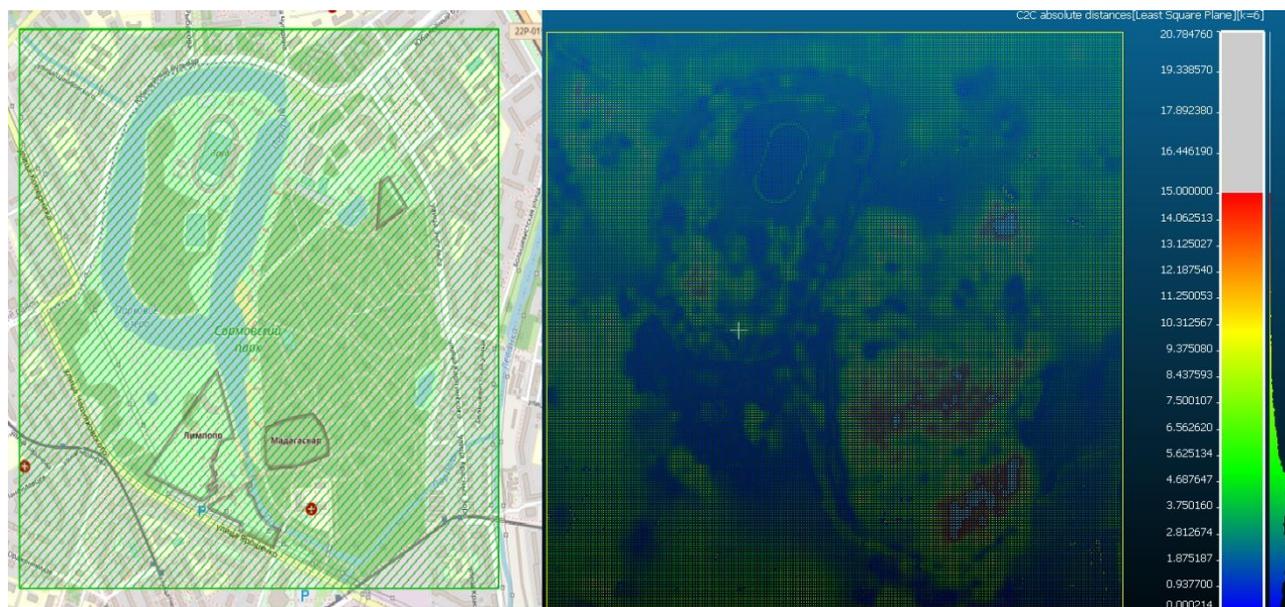


Рис. 6 – Ситуационный план (слева) и результирующая карта высотных отклонений для Сормовского парка (справа)

Fig. 6 – Situation plan (left) and result map of height deviations for area at Sormovsky park (right)

В пределах парковой зоны уже отчетливо видны большие погрешности, связанные с густой растительностью. Согласно открытым панорамам в южной и западной частях парка преобладают исключительно хвойные (сосны, ели), в отличие от северной зоны – где преимущественно широколиственные породы.

Для подтверждения теории, была дополнительная проанализирована лесная зона в пределах Анкудиновского лесопарка – результаты представлены на Рис. 7 ниже.

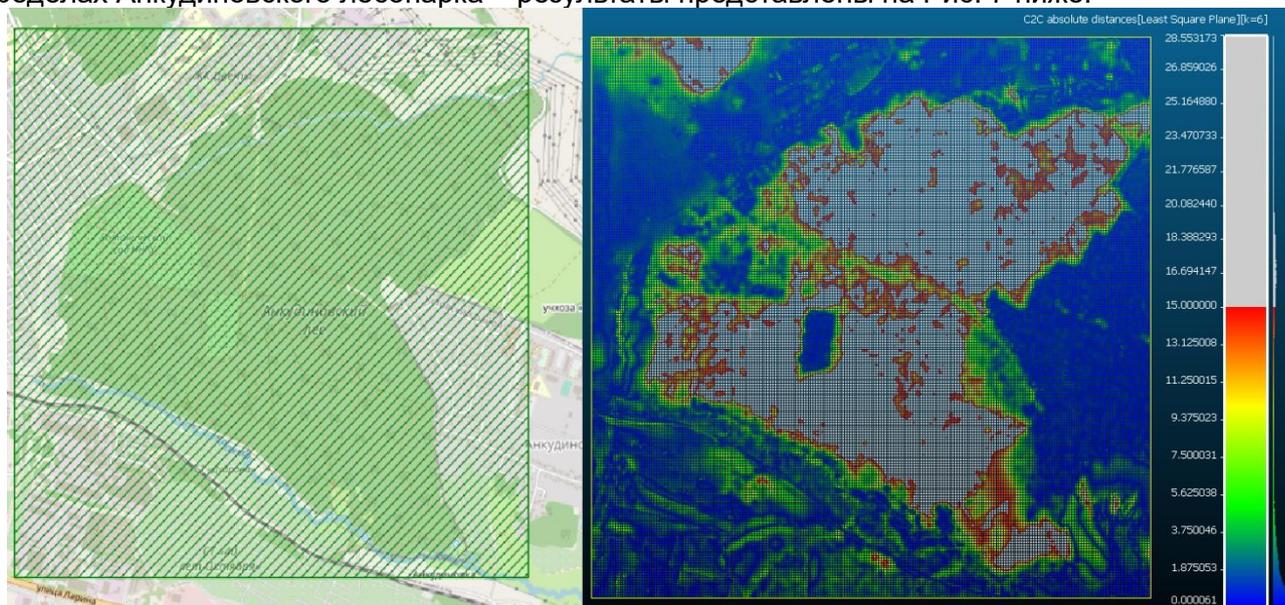


Рис. 7 – Ситуационный план (слева) и результирующая карта высотных отклонений для Анкудиновского лесопарка (справа)

Fig. 7 – Situation plan (left) and result map of height deviations for Ankudinovsky park (right)

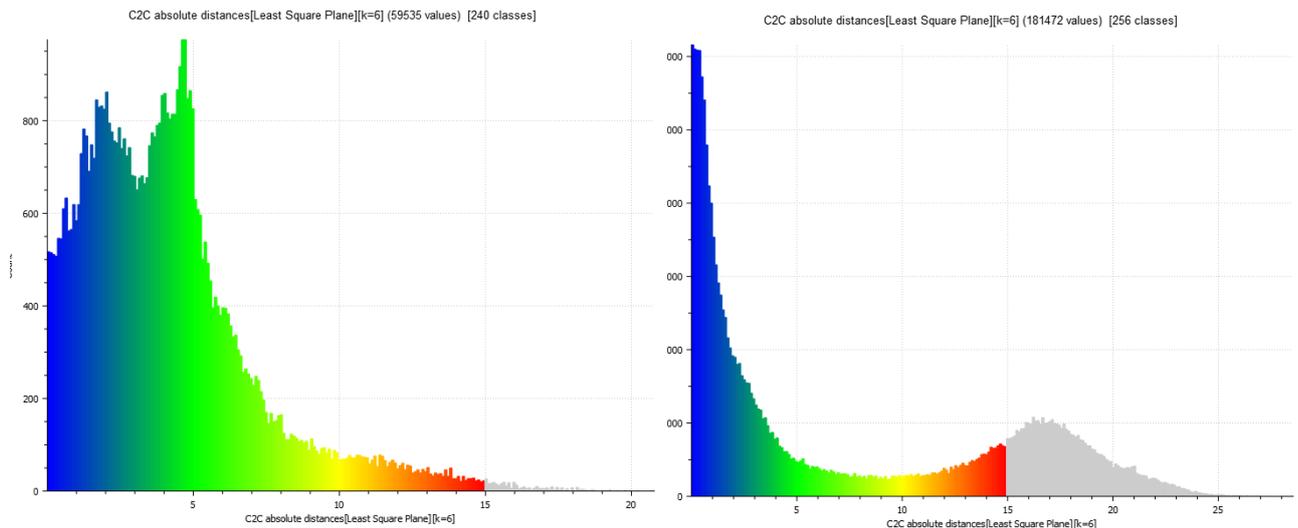


Рис. 8 – Гистограммы распределения невязок числа точек по высоте; слева – для Сормовского парка, справа – для Анкудиновского лесопарка

Fig. 8 – Histogramms for function of distribution the point's count by height; in left – for Sormovskiy park, in right – for Ankudinovskiy park

Картина невязок по высоте дает интересный результат (см. Рис. 8 выше), в лесопарке на всей зоне преобладает исключительно-густая растительность, что заметно по низкой точности WorldDEM, где поправки по высоте за деревьями были минимальные – с видимой максимальной зоной погрешности. Для городского Сормовского парка характерна «смешанная антропогенная невязка» -- совокупность искусственных сооружений и густой растительности, что в общем привело к распределенной невязке.

3.4. For building zones / Для зон застройки

В качестве анализируемых пространств с застройкой были выбраны 2 площадки – многоэтажная застройка без зеленых зон в районе сквера им. Максима Горького (результаты на Рис. 9) и малоэтажная левее Анкудиновского лесопарка (результаты на Рис.10).

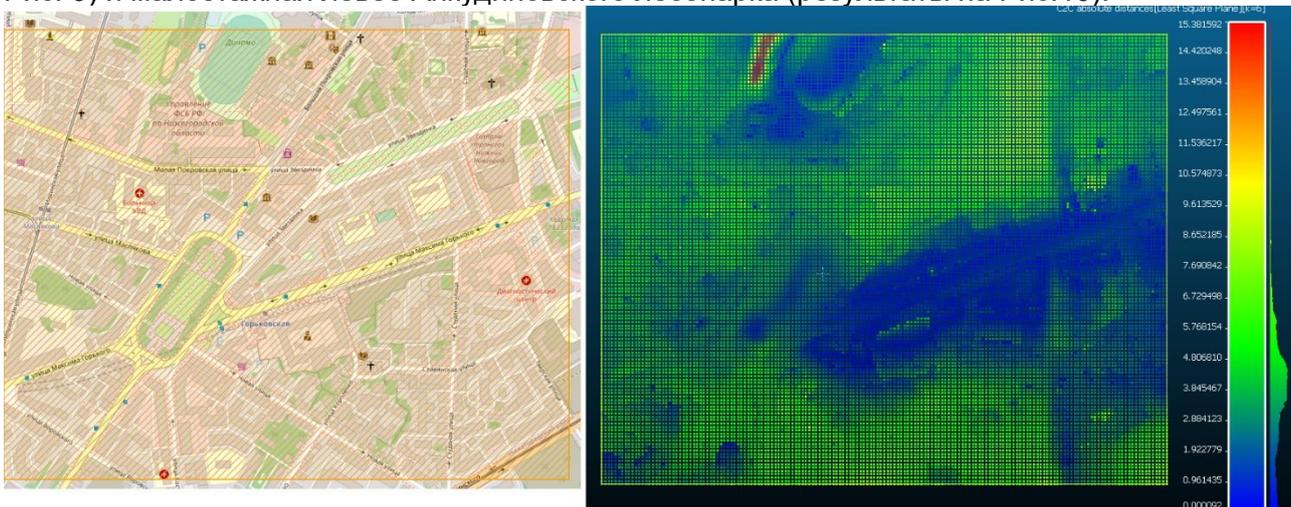


Рис. 9 – Ситуационный план (слева) и результирующая карта высотных отклонений для застройки в районе сквера им. Маскима Горького (справа)

Fig. 9 – Situation plan (left) and result map of height deviations for building zone in the area of the square named Maxim Gorky (right)

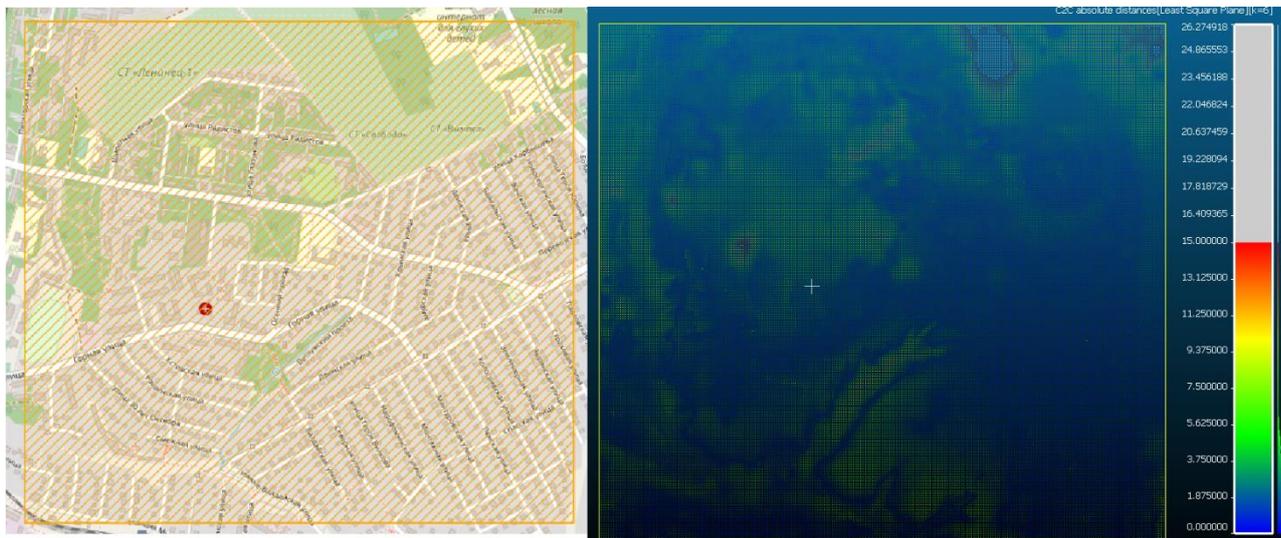


Рис. 10 – Ситуационный план (слева) и результирующая карта высотных отклонений для малоэтажной застройки левее Анкудиновского лесопарка (справа)
Fig. 10 – Situation plan (left) and result map of height deviations for building zone in the left-area of Ankudinovsky park (right)

Из анализа результатов (Рис. 9-10) видно, что в высотной и малоэтажной застройке погрешности почти отсутствуют, они прослеживаются для среднеэтажной застройки (3-7 этажей) и домов с зелеными насаждениями.

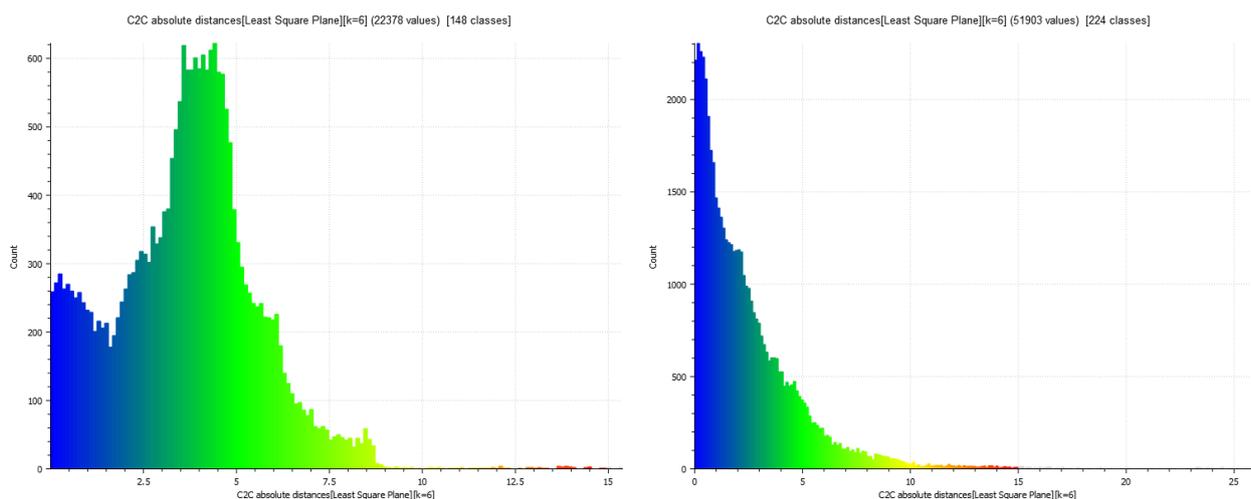


Рис. 11 – Гистограммы распределения невязок числа точек по высоте; слева – для сквера им. М.Горького парка, справа – для зоны левее Анкудиновского лесопарка
Fig. 11 – Histogramms for function of distribution the point's count by height; in left – for building zone in the area of the square named Maxim Gorky, in right – for building zone in the left-area of Ankudinovsky park

3.5. General analyze / Общая оценка

Из опубликованных результатов (Рис. 3, 8, 11) для четырех типов поверхностей видна разная динамика распределения невязок. Наиболее равномерная картина наблюдается для водных объектов (зона анализа №1 – река Ока) и малоэтажной застройки без зеленых пространств (участок №6), что позволяет говорить о том, что модели WorldDEM допустимо использовать для подобных зон. Среднеэтажная застройка (участок №5) дает равномерно-распределенную невязку в районе 2-6 метров. Лесные зоны (участки №3-4) показали, что учет растительности в картах WorldDEM не очень хороший; в частности, в зоне редкой растительности результаты довольно вменяемые, в то время как при густой растительности – «рельеф» явно строится по верхушкам деревьев.

Данные по отдельным гистограммам занесены в общий график (см. Рис. 12 ниже), из которого можно сделать вывод, что для большинства данных справедлива абсолютная точность по высоте до 4м, заявленная в спецификации WorldDEM.

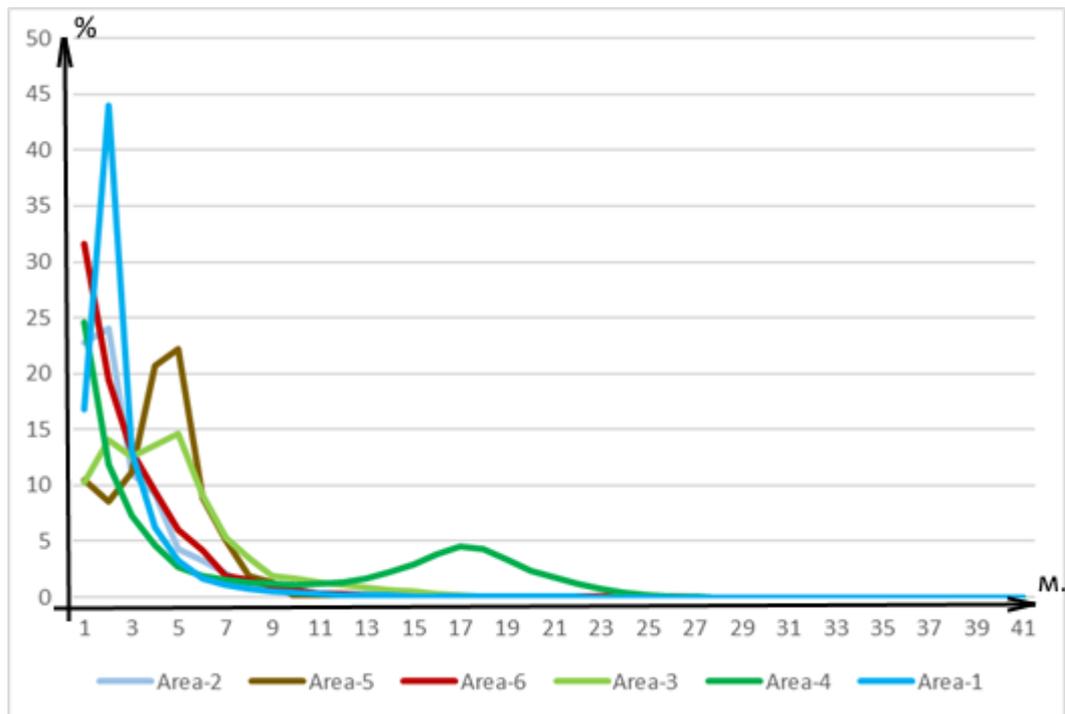


Рис. 12 – График распределения числа точек (в% от общего числа к невязкам по высоте в м.)
Fig. 12 – Graphic for function of distribution the point's count (in percent to general count of points) by absolute height's deviation in meters

По сравнению с ранними публикациями, как для WorldDEM, так и для остальных моделей рельефа (ALOS, ASTER, SRTM) наш метод заключается в построении поверхности сравнения на большую площадь включая все соседние точки, тогда как распространенная практика – сравнивать сетку точек/отдельные значения.

Особо следует отметить возможность работы с городским рельефом с плотной застройкой с моделями WorldDEM – отсутствуют резкие перепады высот, характерные для ранних версий открытых цифровых моделей рельефа вследствие идентификации зданий как форм рельефа. Лесные массивы по-прежнему – проблема для распознавания, как и естественные формы рельефа (овраги, долины), дающие погрешность высоты до 10 метров, что в целом согласуется с пространственной точностью исходной WorldDEM в 24 метра.

Логическим продолжением работы будет сравнение версий WorldDEM большей пространственной точности – сильно ли будет влиять разрешение на итоговую корректность данных.

Делая вывод о возможном использовании ресурсов WorldDEM на ряде поверхностей, в статье говорится о возможности применения подобных данных как замены материалов инженерно-геодезических изысканий на местности для реализации проекта линейного или площадного объекта или в рамках иного проекта работы с геопространственными данными. Опубликованные в настоящей статье результаты сравнения помогут пользователям открытых ресурсов сориентироваться, подойдут ли данные для их деятельности.

4 Conclusions / Заключение

Проанализированы 6 типов поверхностей (река, горный склон, городской парк, лесопарк, плотная среднеэтажная застройка и дачные участки) для двух объемов данных – воздушной лазерной съемке и рельефным моделям WorldDEM. Для каждой из ситуации построена гистограмма (см. Рис 3, 8, 11) и карта распределения числа точек от невязок по высоте (см. Рис. 2, 4, 6, 8, 9, 10); результаты гистограмм объединены на Рис. 12. Результаты проанализированы,

Grebenyuk E.; Novik A.

Open elevation WorldDEM in comparison with aerial laser scanning;
 2022; *AlfaBuild*; 22 Article No 2203. doi: 10.57728/ALF.22.3



для выявленных невязок по высоте найдены источники коллизий и можно сделать следующие выводы:

1. Цифровые модели рельефа WorldDEM пригодны для использования для отдельных категорий поверхностей – малоэтажной застройки и открытых пространств.
2. Объективным подходом к сравнению открытых моделей рельефа по сравнению с натурной съемкой следует признать методику с построением функций распределения числа точек от общего объема сравниваемых данных (в % от объема) по величине абсолютной невязки (метры) между сравниваемым и целевым источником данных
3. Передачу рельефа по спецификации WorldDEM можно назвать приемлемой (большинство измерений укладываются в абсолютную точность до 4 метров): характерные формы передаются, но точность в отдельных местах из-за низкого пространственного разрешения страдает. Возможно, более точная версия WorldDEM (с пространственным разрешением 10 метров или так называемая «Finest») показала бы более точный результат, но к ним доступа на момент написания статьи не было.
4. Результаты анализа, проведенного в статье разрешают использовать растровые подосновы WorldDEM в качестве приближенных к реальности исходным данным в проектировании объектов капитального строительства до этапа готовности инженерно-геодезических изысканий при условии контроля по отдельным известным пунктам геодезической сети.

References

1. Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., & Bamler, R. (2003). The shuttle radar topography mission - A new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(4), 241–262. DOI:10.1016/S0924-2716(02)00124-7
2. Carroll, M. L., Townshend, J. R., DiMiceli, C. M., Noojipady, P., & Sohlberg, R. A. (2009). A new global raster water mask at 250 m resolution. *International Journal of Digital Earth*, 2(4), 291–308. DOI:10.1080/17538940902951401
3. Nikolakopoulos, K. G., Kamaratakis, E. K., & Chrysoulakis, N. (2006). SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21), 4819–4838. DOI:10.1080/01431160600835853
4. Käab, A. (2005). Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 463–474. DOI:10.1016/J.RSE.2004.11.003
5. Hirt, C., Filmer, M. S., & Featherstone, W. E. (2010). Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9s ver3 digital elevation models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(3), 337–347. DOI:10.1080/08120091003677553
6. Mirmakhmudov E.R., Gallyamova L.H. O tochnosti iskhodnykh dannykh dlya postroyeniya tsifrovoy modeli rel'yefa. IOP Conference Series: Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty razvitiya sovremennoy nauki: teoriya, metodologiya, praktika. 2020. 74(4)
7. Rexer, M., & Hirt, C. (2014). Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2.1/v4.1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(2), 213–226. DOI:10.1080/08120099.2014.884983
8. Ryzhakov A.N. (2016). Sravnitel'nyy analiz tsifrovyykh modeley rel'yefa, sozdannykh na osnove dannykh radarnoy i geodezicheskoy s"yemok. Puti povysheniya effektivnosti oroshayemogo zemledeliya. 2016. 3(63)
9. Shen, J., Han, W. L., Zhang, L. B., & Ge, J. (2020). ANALYSIS and COMPARISON of SRTM3 DEM and ASTER GDEM V2. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3/W10), 529–533. DOI:10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-3-W10-529-2020
10. Gorokhovich, Y., & Voustianiouk, A. (2006). Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain



- characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104(4), 409–415. DOI:10.1016/J.RSE.2006.05.012
11. Mukherjee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. D., & Mukhopadhyay, A. (2012). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(1), 205–217. DOI:10.1016/J.JAG.2012.09.004
 12. Nuth, C., & Kääb. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *Cryosphere*, 5(1), 271–290. DOI:10.5194/TC-5-271-2011
 13. Berthier, E., Arnaud, Y., Vincent, C., & Rémy, F. (2006). Biases of SRTM in high-mountain areas: Implications for the monitoring of glacier volume changes. *Geophysical Research Letters*, 33(8). DOI:10.1029/2006GL025862
 14. Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3469–3481. DOI:10.1016/J.RSE.2008.03.018
 15. Sanders, B. F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources*, 30(8), 1831–1843. DOI:10.1016/J.ADVWATRES.2007.02.005
 16. Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M. E. J., Black, A., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2008). Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(3), 283–296. DOI:10.1016/J.ISPRSJPRS.2007.09.004
 17. Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., Sampson, C. C., Kanae, S., & Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5844–5853. DOI:10.1002/2017GL072874
 18. Smith, B., & Sandwell, D. (2003). Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. *Geophysical Research Letters*, 30(9). DOI:10.1029/2002GL016643
 19. Sun, G., Ranson, K. J., Kharuk, V. I., & Kovacs, K. (2003). Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 401–411. DOI:10.1016/J.RSE.2003.09.001
 20. Jacobsen, K. (2014). Development of large area covering height model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(4), 105–110. DOI:10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-4-105-2014
 21. Riegler, G., Hennig, S. D., & Weber, M. (2015). WorldDEM - A novel global foundation layer. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(3W2), 183–187. DOI:10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-3-W2-183-2015
 22. Riegler, G., Tinz, M., & Kaptein, A. (2014). WorldDEMTM - The new standard of global digital elevation models. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*, 4, 2661–2663.
 23. Becek, K., Koppe, W., & Kutoğlu, Ş. H. (2016). Evaluation of vertical accuracy of the WorldDEMTM using the runway method. *Remote Sensing*, 8(11). DOI:10.3390/RS8110934
 24. Breytenbach, A., & Van Niekerk, A. (2020). Analysing DEM errors over an urban region across various scales with different elevation sources. *South African Geographical Journal*, 102(2), 133–169. DOI:10.1080/03736245.2019.1648312
 25. Yanchuk O.E., Trohimets S.M., Shulgan R.B., B.B.O. Analysis of application data from global digital elevation models in solving problems of national economy. *Molodyy Vchenyy*. 2016. 35(8). Pp. 174–179.
 26. Litvinka N.G., M.M.M. The digital terrain model as a data source for the mapping application on example of Belarus flat territories. *IOP Conference Series: Antropogennaya transformatsiya geoprostranstva: priroda, khozyaystvo, obshchestvo*. 2019. Pp. 176–181.
 27. Kozub, Y. I. (2018). The Digital Elevation Model Improving for the Landscape Mapping of the Republic of Dagestan. *Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences*, 12(3), 96–102. DOI:10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102
 28. Park, J. K., & Jung, K. Y. (2021). Accuracy evaluation of earthwork volume calculation according to terrain model generation method. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 39(1), 47–54. DOI:10.7848/KSGPC.2021.39.1.47
 29. Luo, J., Ma, J., Liu, X., Zhang, P., Huang, S., & Chen, J. (2016). High-precision and fast evaluation of spatial straightness error of 3D coordinate point set. *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*, 50(5), 730–735. DOI:10.16183/J.CNKI.JSJTU.2016.05.013

Grebenyuk E.; Novik A.

Open elevation WorldDEM in comparison with aerial laser scanning;
2022; *AlfaBuild*; 22 Article No 2203. doi: 10.57728/ALF.22.3



30. Shean, D. E., Alexandrov, O., Moratto, Z. M., Smith, B. E., Joughin, I. R., Porter, C., & Morin, P. (2016). An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. *IS-PRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 101–117. DOI:10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.03.012