



## Оценка точности глобальных цифровых моделей рельефа для гидрологического анализа: пример Сирии и России

Х. Алали<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Цифровые модели рельефа представляют ценную информацию о рельефе земной поверхности. Разрешение и точность данных, используемых для их создания, являются критическими факторами, которые могут повлиять на результаты гидрологического анализа. Доступные глобальные цифровые модели рельефа являются перспективными источниками данных, но их эффективность должна быть тщательно оценена для различных характеристик рельефа и областей применения. Цель исследования заключалась в определении точности и разрешения данных современных и старых глобальных моделей, а именно SRTM 1, SRTM GL1, V3 ASTER, GMTED2010, PALSAR ALOS и GTOPO 30, на примере двух исследуемых территорий. Это Сирия (Сирийское побережье) и Россия (Черноярский и Ахтубинский район в Астраханской области), которые представляют различные модели рельефа. Для выполнения гидрологического анализа земной поверхности проводилась проверка степени совпадения высот моделей с реальными высотами, измеренными и взятыми из GPS. Это было сделано с использованием трех статистических показателей, а именно диапазона, стандартного отклонения и корреляции, а также с использованием программ BaseCamp, ARCGIS PRO & SAGA\_GIS. Разрешение данных показывает степень детализации, отраженной в наборе данных DEM. Оно определяется пространственным интервалом выборки или размером ячейки сетки, используемой для представления земной поверхности. Точность данных относится к степени согласованности между значениями высоты, полученными из DEM, и фактическими данными на земле. Результаты показывают, что по коэффициенту корреляции и стандартному отклонению модель GMTED 2010 и ASTER V3, исследующая сирийский регион, и модель ALOS PALSAR и SRTM GL 1 для региона России, являются лучшими для проведения гидрологического анализа в отсутствие точных локальных моделей.

**Ключевые слова:** цифровая модель рельефа, Сирия, Россия, гидрологический анализ, корреляции, стандартное отклонения, высота, рельеф

**Для цитирования:** Алали Х. Оценка точности глобальных цифровых моделей рельефа для гидрологического анализа: пример Сирии и России // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 3. С. 501–512. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-501-512>. EDN: TNXRYF.

### Original article

## Assessing the accuracy of global digital elevation models for hydrological analysis: the cases of Syria and Russia

Hothefa Alali<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

**Abstract.** Digital elevation models provide valuable information about the surface topography. The resolution and accuracy of the data used to create the models are critical for the results of hydrological analysis. Available global digital elevation models obtain high potential in terms of data sources; however, their performance requires meticulous evaluation for different terrain characteristics and applications.

**Aim.** To determine the accuracy and resolution of data provided by current and old global models, namely SRTM 1, SRTM GL1, V3 ASTER, GMTED2010, PALSAR ALOS, and GTOPO 30, using the example of two terrains. The study considers the areas in Syria (Syrian coast) and Russia (Chernoyarsky and Akhtubinsky districts in the Astrakhan region) represented by different elevation models. A matching degree between model and real elevations measured by GPS was determined to carry out the hydrological analysis of the land surface. For this purpose, three statistical measures, including range, standard deviation and correlation were defined by means of BaseCamp, ARCGIS PRO & SAGA\_GIS software. Data resolution indicates the degree of detail represented in the DEM dataset, which is established by the spatial sampling interval or the size of the grid cell used to represent the land surface. Data accuracy refers to the matching degree between the elevation values derived from the DEM and the actual data obtained on the surface. **Results.** In terms of correlation coefficient and standard deviation, the GMTED 2010 and ASTER V3 model for the Syrian region and the ALOS PALSAR and SRTM GL 1 model for the Russian region prove to be the most effective for hydrological analysis in the absence of accurate local models.

**Keywords:** digital relief model, Syria, Russia, hydrological analysis, correlations, standard deviation, elevation, relief

**For citation:** Alali H. Assessing the accuracy of global digital elevation models for hydrological analysis: the cases of Syria and Russia. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2024;14(3):501-512. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-501-512>. EDN: TNXRYF.

## ВВЕДЕНИЕ

Гидрологический анализ включает в себя изучение движения и распределения воды на поверхности Земли. Цифровые модели рельефа (ЦМР) являются важнейшими инструментами для этого вида анализа. Они могут использоваться для создания точных карт водоразделов, ручьев и рек, а также для оценки скорости и объема водного потока [1–2].

Гидрологический анализ часто фокусируется на речных бассейнах как фундаментальных единицах для изучения водного баланса и циркуляции. ЦМР играют ключевую роль в гидрологических исследованиях речных бассейнов, поскольку они позволяют точно определить границы водосборных областей, выделить речную сеть и рассчитать производные характеристики рельефа, такие как уклоны, кривизна и экспозиция склонов, которые являются критически важными для моделирования поверхностного стока и русловых процессов [19–22]. Одним из основных преимуществ использования глобальных ЦМР в гидрологическом анализе является их широкая доступность. Существует несколько общедоступных наборов данных глобальных ЦМР, таких как SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) и ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), которые покрывают большую часть поверхности Земли. Они имеют высокое пространственное разрешение, от 30 до 90 м, что позволяет проводить детальный анализ мелкомасштабных особенностей, таких как ручьи и овраги [2]. Еще одним преимуществом использования глобальных ЦМР является их способность предоставлять

информацию о характеристиках рельефа, таких как уклон, аспект и кривизна.

Эти характеристики играют решающую роль в гидрологических процессах, поскольку они влияют на движение и распределение воды на поверхности Земли.

Включая эту информацию в гидрологическую модель, исследователи могут улучшить понимание закономерностей водных потоков и предсказать последствия изменений в землепользовании или климате [2–3]. Их главным преимуществом является широкая доступность и относительно низкая стоимость получения данных, что позволяет проводить исследования даже в регионах с ограниченными местными источниками. Они часто имеют меньшую точность и детализацию по сравнению с локальными ЦМР, созданными на основе высокоточных наземных измерений или аэрофотосъемки. Ключевым ограничением глобальных ЦМР может быть неполное отражение мелкомасштабных объектов рельефа, оказывающих существенное влияние на гидрологические процессы. Поэтому важно оценивать пригодность конкретных глобальных ЦМР для гидрологического анализа в каждом регионе исследования с учетом его ландшафтных особенностей [2–3]. ЦМР представляет собой цифровое представление местности с различной высотой и является одним из основных выходов геоинформационной системы, которая дает возможность увидеть трехмерное цифровое представление изучаемой территории и ее высоты с использованием переменных ( $z$ ,  $y$ ,  $x$ ), в которых  $y$ ,  $x$  – горизонтальные координаты, а  $z$  – вертикальная координата (высота) [4–9].

Есть множество доступных бесплатных глобальных ЦМР, но их точность и надежность должны быть количественно оценены до фактического внедрения [10–12].

В этой статье изучена точность и разрешение ЦМР для использования в гидрологическом анализе на основе нескольких статистических показателей. В табл. 1 приведены характеристики выбранных глобальных ЦМР, в том числе:

1. SRTM – четкость местности равна 3 сек = 90 м (объем каждый пиксел 90\*90) (американская модель, 2015 г.)<sup>1</sup>.

2. ALOS PALSAR – четкость местности равна 1 сек = 30 м (объем каждого пикселя 30\*30) (американская и японская модель)<sup>2</sup>.

3. GMTED2010 – глобальные данные о высоте местности с различным разрешением за 2010 г., представляет собой глобальную ЦМР с тремя уровнями пространственного разрешения: 7,5, 15, и 30 угловых сек<sup>3</sup>.

4. GTOPO 30 – четкость местности равна 30 сек = 900 м (объем каждого пикселя 900\*900) (старая модель)<sup>4</sup>.

5. ASTER GDEM V3 – четкость местности равно 1 сек = 30 м<sup>5</sup>.

6. SRTM GL1: Shuttle Radar Topography Mission – данные о высотах в почти глобальном масштабе для создания наиболее полной цифровой топографической базы данных Земли с высоким разрешением. Данные четкости место равны 1 сек = 30 м<sup>6</sup>.

**Таблица 1.** Характеристики используемой глобальной цифровой модели рельефа

**Table 1.** Characteristics of the global DEM used

| Модель ЦМР  | Год выпуска    | Пространственное разрешение |            |
|-------------|----------------|-----------------------------|------------|
|             |                | Градусы                     | Метры      |
| SRTM1       | 2015           | 1"                          | ~30*30     |
| ALOS PALSAR | с 2006 до 2011 | 1"                          | ~12,5*12,5 |
| GMTED2010   | 2010           | 7,5"                        | ~225       |
| GTOPO 30    | 1996           | 30"                         | ~900       |
| ASTER V3    | 2013           | 1"                          | ~30*30     |
| SRTM GL1    | 2013           | 1"                          | ~30*30     |

## МЕСТА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этом исследовании было изучено два объекта:

1. Сирийское побережье: горная прибрежная местность, состоящая из равнин, которые простираются вдоль побережья с севера, где проходит турецкая граница, до Ливана на юге.

Длина составляет примерно 35 морских миль (65 км) только от берега Средиземного моря и до Алавитских гор. Они параллельны прибрежной равнине, высотой чуть более 1212 м, а самая высокая вершина – Ан-Наби Юнус, высота которой составляет 1575 м (рис. 1а) [19–22].

2. Черноморский и Ахтубинский район в Астраханской области в России: пустынная равнинная местность, рельеф сложный, состоящий из огромных масс холмов, песка, сухих кратеров, озер и карстовой местности. Астраханская область находится на юге России, возле Каспийского моря.

Место исследования находится на севере области (рис. 1б) [23].

## МЕТОДОЛОГИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

ЦМР является растровыми данными, представленными в виде сетки пикселей. Эта сетка состоит из блоков, содержащих зашифрованную информацию о поверхности Земли как о высоте над уровнем моря ( $H_{\text{ЦМР}}$ ).

У нас есть точки высоты, измеренные GPS ( $H_{\text{GPS}}$ ), они обработаны с помощью программы BaseCamp, чтобы данные можно было импортировать в программу SAGA\_GIS.

Следует отметить, что точки высоты и ЦМР должны иметь одинаковые координаты систем (Geographic Coordinate System [EPSG 4326]:WGS84) (рис. 2).

Поскольку исходные глобальные ЦМР имели разное пространственное разрешение, для обеспечения корректного сравнения все они были приведены к единому разрешению, соответствующему разрешению данных GPS.

<sup>1</sup>SRTM. Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 20.07.2024).

<sup>2</sup>ALOS PALSAR. Режим доступа: <https://search.asf.alaska.edu/#/> (дата обращения: 20.07.2024).

<sup>3</sup>GMTED2010. Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 20.07.2024).

<sup>4</sup>GTOPO 30. Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 20.07.2024).

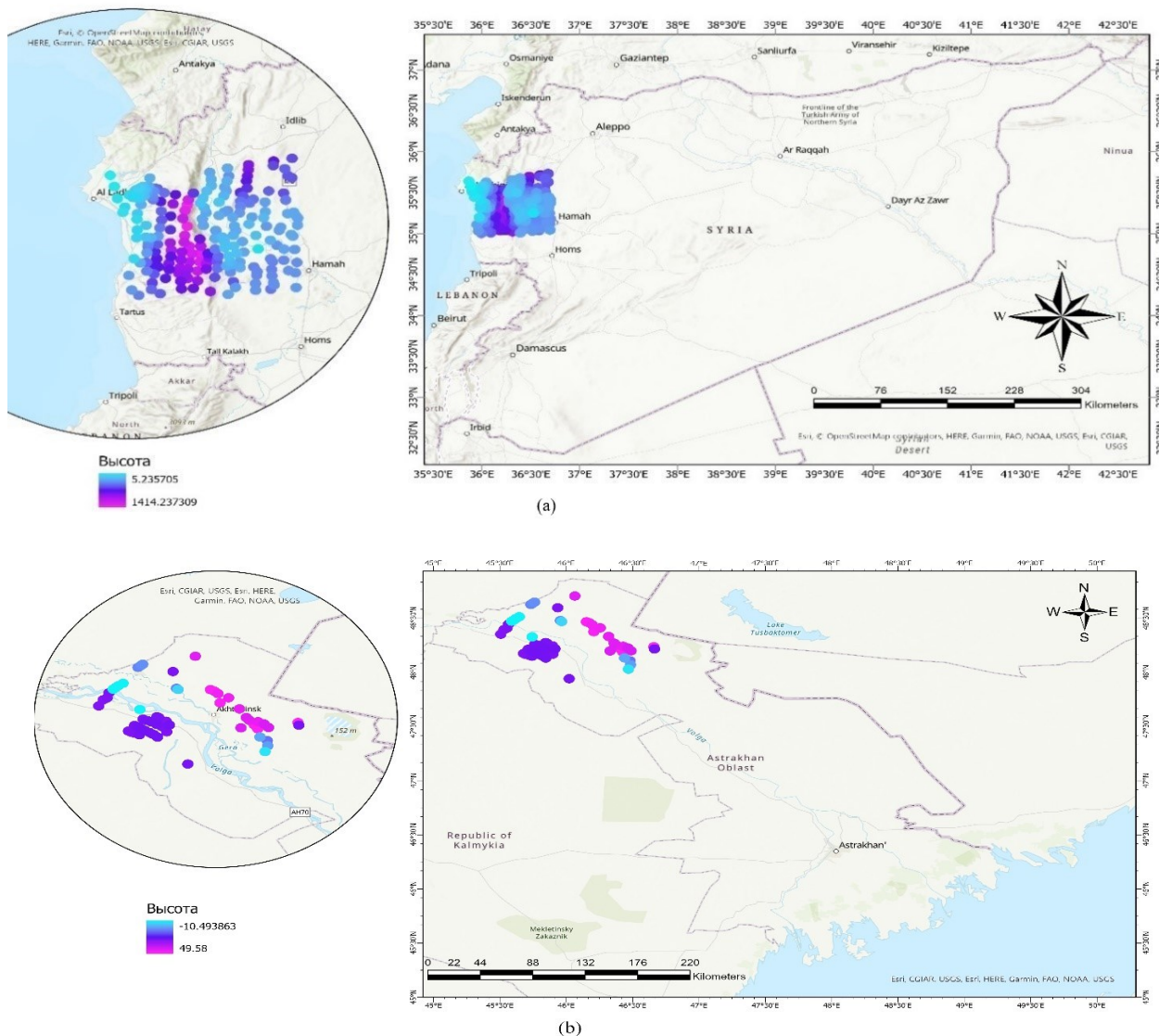
<sup>5</sup>ASTER GDEM V3. Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 20.07.2024).

<sup>6</sup>SRTM GL1: Shuttle Radar Topography Mission. Режим доступа: <https://opentopography.org/> (дата обращения: 20.07.2024).

Это было сделано с помощью геостатистической интерполяции кригинга для ресамплинга каждой ЦМР до размера ячейки, совпадающей с интервалом между точками GPS.

Контрольные точки GPS были отобраны с использованием стратифицированной случай-

ной выборки для обеспечения репрезентативного покрытия различных типов рельефа и высотных диапазонов. Вся выборка была случайным образом разделена на обучающую (80 %) и тестовую (20 %) части для независимой проверки результатов.



**Рис. 1. Область исследования: (а) Сирийское побережье в Сирии, (б) Чернойарский и Ахтубинский район в Астраханской области в России (Построена авторами по программе ArcGis Pro)**

**Fig. 1. Study area: (a) Syrian coast in Syria, (b) Chernoyarsk and Akhtubinsk district in Astrakhan region in Russia (Plotted by the authors using ArcGis Pro program)**

Извлечения данных из файла ЦМР выполнено с помощью SAGA\_GIS, через команду Shapes → Shapes Grid tools → Grid values → Add grid values to points, затем был выбран способ извлечь данные из файла ЦМР (Nearest neighbor) [13, 14]. Это позволяет узнать данные о высоте, и то, куда именно попадает точка GPS.

На основе ЦМР для сирийского объекта были выполнены следующие задачи:

- определение водосборных бассейнов реки;
- выделение речной сети;
- расчет уклонов, кривизны и экспозиции склонов по стандартным алгоритмам ГИС-анализа рельефа.



Эти производные данные использовались для последующего моделирования гидрологических характеристик речных бассейнов, а именно реки Ал Кабир Ал Шамали [19–22].

В результате получена таблица, где были записаны данные GPS о высоте и высота из файла ЦМР. Исходя из этого можно выполнить следующие статистические анализы.

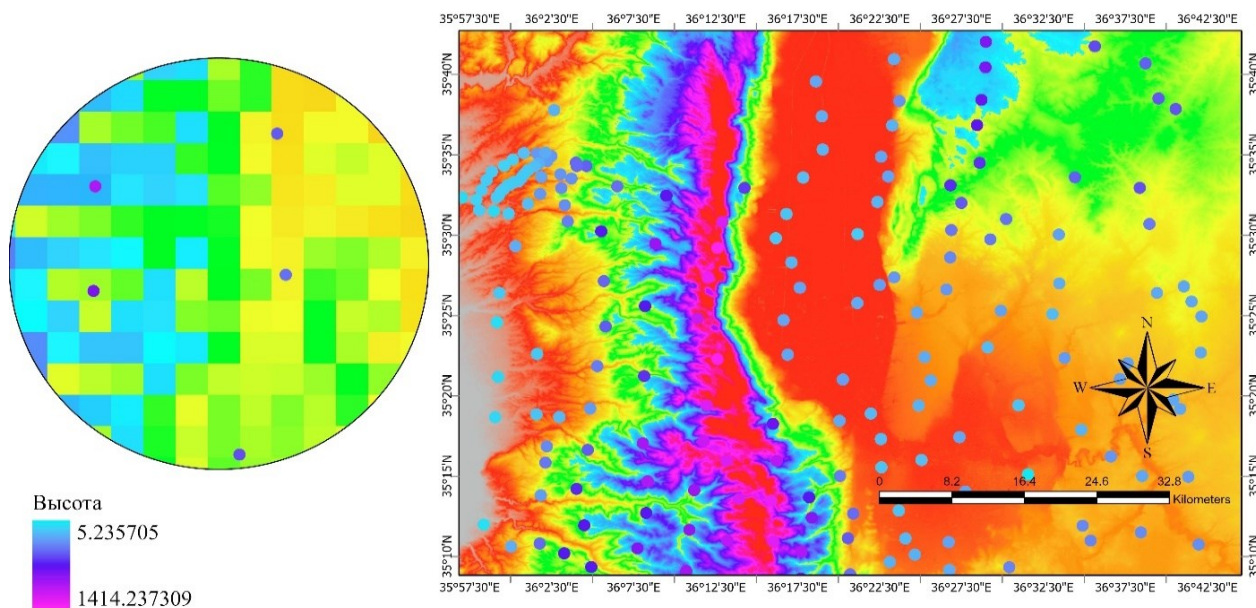


Рис. 2. Точки GPS на ЦМР (Построена авторами по программе ArcGis Pro)  
Fig. 2. GPS points on DEM (Built by authors using ArcGis Pro program)

Корреляция между наблюдаемыми высотами контрольных точек ( $X$  или  $H_{GPS}$ ) и их соответствующей высотой из конкретной ЦМР ( $Y$  или  $H_{ЦМР}$ ) рассчитывается как:

$$COR = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX} \times S_{YY}}}, \quad (1)$$

где

$$S_{XX} = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}, \quad (2)$$

$$S_{YY} = \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}, \quad (3)$$

$$S_{XY} = \sum XY - \frac{(\sum X) \times (\sum Y)}{n}, \quad (4)$$

где COR представляет собой корреляцию между  $X$  и  $Y$ ,  $\sum X$ ,  $\sum Y$ ,  $\sum XY$  представляют собой сумму  $X$ ,  $Y$  и  $XY$  соответственно, а  $n$  – общее количество доступных точек выборки (237 для Сирии и 62 для России). Затем диапазон разницы высот оценивался как разница между максимальной и минимальной вычисленной разницей для каждой ЦМР. Стандартное отклонение (SD) разности высот рассчитывается как:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H^2}{n}}, \quad (5)$$

где  $n$  – количество используемых контрольных точек [15].

Ожидается, что чем больше стандартное отклонение, тем более плоской будет кривая нормального распределения. Чем меньше стандартное отклонение, тем выше пик кривой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разрешение данных относится к уровню детализации, отраженному в наборе данных ЦМР. Оно определяется интервалом пространственной выборки или размером ячеек сетки, используемой для представления земной поверхности. ЦМР с более высоким разрешением предоставляют более подробную информацию о рельефе и могут лучше отображать мелкомасштабные особенности.

В гидрологическом анализе разрешение данных играет решающую роль, так как от этого зависит точность отражения характеристик рельефа и процессов, влияющих на структуру водных потоков. Точность данных относится к уровню согласия между значениями высоты, полученными с помощью ЦМР, и фактическими данными на местности. Точные данные о рельефе имеют решающее значение для надежного гидрологического анализа, поскольку ошибки в измерениях рельефа могут распространяться по всему процессу, приводя

к неточным результатам. Для обеих изучаемых областей были загружены шесть выбранных ЦМР с соответствующих вебсайтов, высоты были получены из ЦМР, соответствующих точ-

кам GPS с использованием пакета программного обеспечения SAGA\_GIS 9.0.1. Статистика полученных результатов представлена в табл. 2, на рис. 3 и 4.

**Таблица 2.** Статистические показатели высот ЦМР в районе побережье (А); статистические показатели высот ЦМР в районе Черноярский и Ахтубинский (В)

**Table 2.** Statistical indices of DEM heights in the coastal area (A); Statistical indices of DEM heights in Chernoyarsky and Akhtubinsky districts (B)

(А)

| Название               | Минимум  | Максимум | Среднее значение | Среднеквадратическое отклонение | Корреляция |
|------------------------|----------|----------|------------------|---------------------------------|------------|
| Высота (ele) точки GPS | 5,235705 | 1414,238 | 437,105          | 306,907                         | NA         |
| ASTER V3               | 17       | 1323     | 409,726          | 295,962                         | 94,41 %    |
| SRTM 1                 | 21       | 1327     | 417,241          | 294,999                         | 94,40 %    |
| GTOPO 30               | 6        | 1338     | 409,060          | 298,275                         | 89,75 %    |
| GMTED2010              | 21       | 1335     | 417,300          | 296,020                         | 94,42 %    |
| SRTM GL 1              | 44,974   | 1352,956 | 443,057          | 295,136                         | 94,40 %    |
| ALOS PALSAR            | 46       | 1348     | 442,988          | 294,992                         | 94,32 %    |

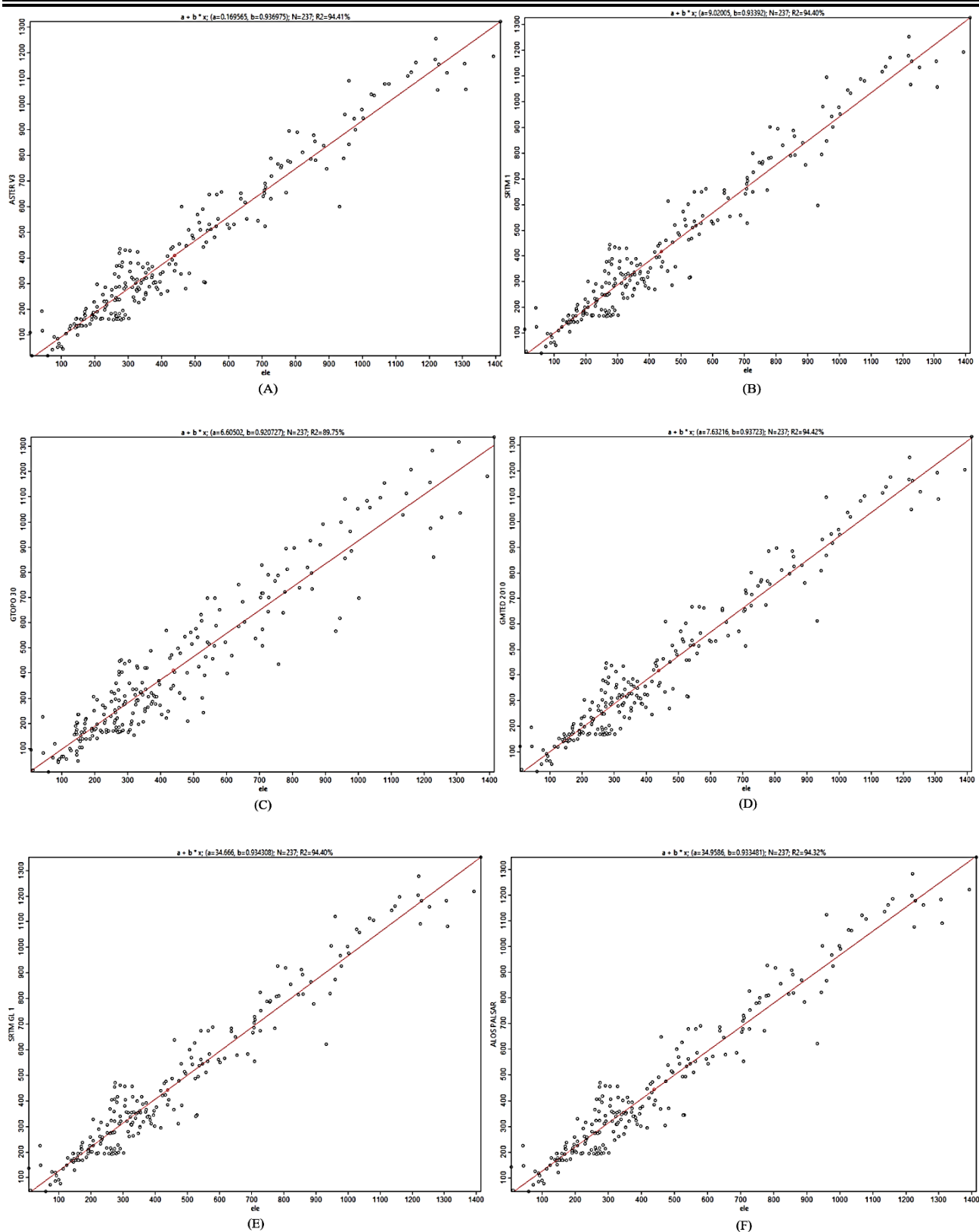
(В)

| Название               | Минимум  | Максимум | Среднее значение | Среднеквадратическое отклонение | Корреляция |
|------------------------|----------|----------|------------------|---------------------------------|------------|
| Высота (ele) точки GPS | -10,4939 | 49,58    | 23,644259        | 16,932                          | NA         |
| ASTER V3               | -17      | 44       | 13,574           | 10,933                          | 55,92 %    |
| GTOPO 30               | -15      | 38       | 11,710           | 12,014                          | 43,32 %    |
| GMTED2010              | -14      | 31       | 11,565           | 9,203                           | 72,30 %    |
| SRTM GL 1              | -21,532  | 23,956   | 6,154            | 9,161                           | 72,82 %    |
| SRTM 1                 | -17      | 31       | 11,355           | 9,565                           | 71,30 %    |
| ALOS PALSAR            | -22      | 24       | 6,284            | 9,369                           | 73,01 %    |

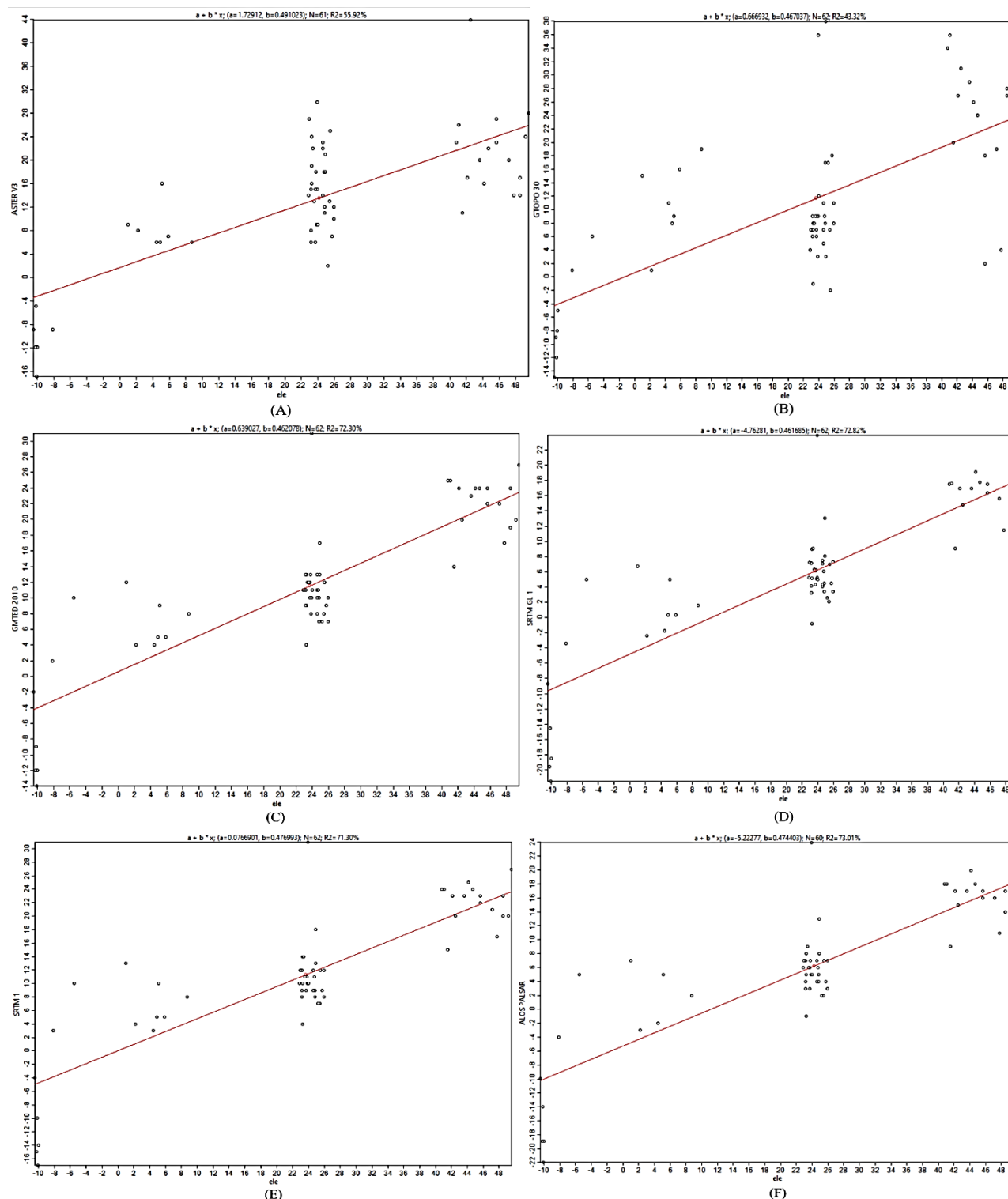
Из таблицы видно, что ASTER V3 и GMTED 2010 имеют наибольшую корреляцию в первом объекте, а ALOS PALSAR и SRTM GL 1 во втором, аналогичные результаты были получены другими исследователями [14, 15]. Точность исходных данных рельефа оказывает существенное влияние на надежность гидрологического анализа в речных бассейнах.

Даже небольшие ошибки в определении водоразделов и речной сети могут приводить к серьезным погрешностям в оценках водного

баланса и характеристиках стока. Результаты настоящего исследования показывают, что глобальные ЦМР GMTED2010, ASTER V3 (для Сирии) и ALOS PALSAR, SRTM GL1 (для России) обеспечивают наиболее высокую точность рельефных данных. Их применение позволит выполнять гидрологическое моделирование и управление водными ресурсами речных бассейнов с приемлемой степенью достоверности в условиях отсутствия локальных высокоточных ЦМР.



**Рис. 3. Диаграмма рассеяния между  $H_{DEM}$  и  $H_{GPS}$  для первой области исследования, где (A) ASTER V3, (B) SRTM 1, (C) GTOPO 30, (D) GMTED 2010, (E) SRTM GL 1, (F) ALOS PALSAR**  
**Fig. 3. Scatter plot between  $H_{DEM}$  and  $H_{GPS}$  for the first study areas where (A) ASTER V3, (B) SRTM 1, (C) GTOPO 30, (D) GMTED 2010, (E) SRTM GL 1, (F) ALOS PALSAR**



**Рис. 4. Диаграмма рассеяния между  $H_{DEM}$  и  $H_{GPS}$  для второй области исследования, где (A) ASTER V3, (B) GTOPO 30, (C) GMTED 2010, (D) SRTM GL 1, (E) SRTM 1, (F) ALOS PALSAR**  
**Fig. 4. Scatter plot between  $H_{DEM}$  and  $H_{GPS}$  for the second study areas where (A) ASTER V3, (B) GTOPO 30, (C) GMTED 2010, (D) SRTM GL 1, (E) SRTM 1, (F) ALOS PALSAR**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании изучалась точность и разрешение шести последних глобальных цифровых моделей высот для использования в

гидрологическом анализе. Эти модели включают SRTM1, ALOS PALSAR, GMTED2010, GTOPO 30, ASTER V3 и SRTM GL1. Оценка проводилась на двух изучаемых территориях:



Сирийское побережье, представляющее равнинную топографию, Черноярский и Ахтубинский район в Астраханской области в России, представляющий сложный рельеф. 237 и 62 контрольных точек с измеренными GPS-координатами были использованы в обеих областях соответственно. Основываясь на полученных результатах, можно сделать выводы, что по коэффициенту корреляции и стандартному отклонению модель GMTED 2010 и ASTER V3, исследующая сирийский регион, и модель ALOS PALSAR и SRTM GL 1 для региона России, являются лучшими для проведения гидрологического анализа считаются хорошим инструментом в отсутствие точных локальных моделей. Информация, представленная в табл. 1, показывает пространственное разрешение в градусах и метрах, лучше из них

ALOS PALSAR, SRTM GL 1, SRTM1, ASTER V3 и SRTM GL1. Исходя из результатов можно сказать что ALOS PALSAR, SRTM1 и ASTER V3 наиболее надежные ЦМР для гидрологического анализа.

Обеспечение высокого разрешения и точности данных ЦМР необходимо для надежного гидрологического анализа. Однако при использовании ЦМР в гидрологических приложениях необходимо учитывать проблемы, связанные с доступностью, обработкой и точностью данных.

Постоянное совершенствование методов сбора данных и процессов контроля качества продолжает улучшать разрешение и точность ЦМР, повышая их пригодность для точного гидрологического анализа и управления водными ресурсами.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ilinich V.V., Perminov A.V., Belolybcev A.I., Naumova A. A. Assessment of the Impact of Changes in Storm Rainfall and Landscape Characteristics on the Maximum Flow of Small Rivers // Springer Water. 2020. P. 717–725. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0\\_55](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0_55). EDN: KDLPPN.
2. Гусев В.Л., Потапов С.Л., Синькова М.Г. Оценка точности цифровых моделей рельефа и цифровых моделей местности из открытых источников // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2022. Т. 66. № 1. С. 52–63. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2022-66-1-52-63>. EDN: UYHXGM.
3. Кошель С.М., Энтин А.Л. Современные методы расчета распределения поверхностного стока по цифровым моделям рельефа // Геоморфологи. 2016. № 6. С. 24–34. EDN: WZPQOH.
4. Павлова А.Н. Геоинформационное моделирование речного бассейна по данным спутниковой съемки SRTM (на примере бассейна р. Терешки) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2009. Т. 9. № 1. С. 39–44. EDN: JVCBHW.
5. Гулиев А.Ш.О. Оценка точности определения высот по данным воздушного лазерного сканирования для автоматизации пространственных трансформаций функциональной модели регионов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1. № 4. С. 43–51. EDN: VSFLHW.
6. Fernandez A., Adamowski J., Petroselli A. Analysis of the Behavior of Three Digital Elevation Model Correction Methods on Critical Natural Scenarios // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2016. Vol. 8. P. 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.09.009>.
7. Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Trevisani S., Romaikin S.V. Statistical and Visual Quality Assessment of Nearly-Global and Continental Digital Elevation Models of Trentino, Italy // Remote Sensing Letters. 2019. Vol. 10. Iss. 8. P. 726–735. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1602790>.
8. Ермолаев О.П., Семёнов Ф.В. Использование цифровых моделей рельефа для морфометрического анализа тектонических структур и поиска россыпей аллювиального генезиса // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 142–147. EDN: RXNVPP.
9. Брызжев А.В., Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А. [и др.] Организация ретроспективного мониторинга почвенного покрова и земель Азовского района Ростовской области // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1294–1315. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13110026>. EDN: REKBUN.
10. Mukherjee S., Joshi P.K., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R.D., Mukhopadhyay A. Evaluation of Vertical Accuracy of Open Source Digital Elevation Model (DEM) // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013. Vol. 21. P. 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004>.
11. Мубораков Х., Рузиев А.С., Абдуллаев И.У. Об использовании материалов ДЗЗ для расчетов проектных параметров и мониторинга режима водохранилищ // Известия Географического общества Узбекистана. Специальный том. 2018. С. 179–181.
12. Астапович А.В., Жбанов К.К., Медяников Д.О., Яковлев А.И. Модель рельефа недоступной территории, построенная по результатам комплексирования разнородной спутниковой информации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2021. № 677. С. 75–83. EDN: WDKYET.
13. Biau G., Devroye L. Lectures On the Nearest Neighbor Method. New York: Springer, 2015. 300 p.

14. Fisher R., Hobgen S., Mandaya I., Kaho N.R., Zulkarnain Satellite Image Analysis and Terrain Modelling – A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software. Charles Darwin University, Universitas Nusa Cendana dan Universitas Halu Oleo, 2017. 151 p.
15. Ильинич В.В., Перминов А.В., Наумова А.А. Оценка влияния климатических характеристик и ландшафтных изменений на максимальный сток малых водосборов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 9. С. 1228–1235. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.9.1228-1235>. EDN: UDKCUS.
16. Althumania D., Achour H. External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria // Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 6. Iss. 5. P. 4600–4620. <https://doi.org/10.3390/rs6054600>.
17. Patel A., Katiyar S.K., Prasad V. Performance Evaluation of Different Open Source DEM Using Differential Global Positioning System (DGPS) // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. 2016. Vol. 19. Iss. 1. P. 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004>.
18. Ильинич В.В., Перминов А.В., Наумова А.А. Влияние ландшафтных и климатических изменений на максимальный сток малых водосборов // Гидротехническое строительство. 2022. № 7. С. 15–19. EDN: AZIXGJ.
19. Алали Х., Перминов А.В. Мониторинг водохранилища 16 Тишрин с использованием ГИС-технологий и дистанционного зондирования // Мелиорация и водное хозяйство. 2024. № 1. С. 11–16. <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2024-1-11-16>. EDN: AKHRPC.
20. Алали Х., Перминов А.В. Испарение воды из водохранилища 16 Тишрин в Сирии: измерение объема и оценка экономических последствий // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13. № 3. С. 314–331. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-314-331>. EDN: XFAYAM.
21. Алали Х., Перминов А.В. Использование современных ГИС-технологий при анализе гидрологических данных для реки Ал Кабир Ал Шамали в Сирии // Гидротехническое строительство. 2024. № 4. С. 49–54. <https://doi.org/10.34831/EP.2024.57.90.006>. EDN: MVOLRE.
22. Алали Х., Перминов А.В., Редников С.Н., Алсадек Е.С. Морфометрический анализ бассейн реки Ал Кабир Ал Шамали в Сирии с использованием изображения ASTER (цифровая модель рельефа) на основе ГИС-технологии // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т.10. №1. С. 46–58.
23. Бухарицин П.И., Овчарова А.Ю., Токарева А.А., Кутлусурина Г.В. Геоэкология природных комплексов низовьев Волги в условиях антропогенного воздействия: коллект. монография. Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 288 с.

## REFERENCES

1. Ilinich V.V., Perminov A.V., Belolybcev A.I., Naumova A. A. Assessment of the Impact of Changes in Storm Rainfall and Landscape Characteristics on the Maximum Flow of Small Rivers. *Springer Water*. 2020:717-725. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0\\_55](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0_55). EDN: KDLPPN.
2. Gusev V.L., Potapov S.L., Sinkova M.G. Open Sources Digital Terrain Models and Digital Elevation Models Accuracy Estimation. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(1):52-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2022-66-1-52-63>. EDN: UYHXGM.
3. Koshel' S.M., Entin A.L. Contemporary Methods for Calculating Surface Water Distribution from Digital Elevation Models. *Geomorfologi*. 2016;6:24-34. (In Russ.). EDN: WZPQOH.
4. Pavlova A.N. Geomodeling of River Basin Based of the Space Data SRTM (as Example of Tereshka River). *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle*. 2009;9(1):39-44. (In Russ.). EDN: JVCBHW.
5. Guliyev A.Sh.O. Evaluation of The Height Accuracy of Air Laser Scanning for Automation of Spatial Transformations of the Functional Model for The Regions. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018;1(4):43-51. (In Russ.). EDN: VSFLHW.
6. Fernandez A., Adamowski J., Petroselli A. Analysis of the Behavior of Three Digital Elevation Model Correction Methods on Critical Natural Scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2016;8:304-315. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.09.009>.
7. Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Trevisani S., Romaikin S.V. Statistical and Visual Quality Assessment of Nearly-Global and Continental Digital Elevation Models of Trentino, Italy. *Remote Sensing Letters*. 2019;10(8):726-735. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1602790>.
8. Ermolaev O.P., Semenov F.V. Use of Digital Terrain Models in Morphometric Analysis of Tectonic Structures and Prospecting of Placers of Alluvial Genesis. *Geography and Natural Resources*. 2014;1:142-147. (In Russ.). EDN: RXNVPP.
9. Bryzzhev A.V., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Vil'chevskaya E.V., Dolinina E.A. [et al.] Organization of Retrospective Monitoring of Soil Cover and Lands in The Azov District of the Rostov Region.

- Eurasian Soil Science*. 2013;11:1294-1315. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X13110026>. EDN: REKBUEH.
10. Mukherjee S., Joshi P.K., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R.D., Mukhopadhyay A. Evaluation of Vertical Accuracy of Open Source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013;21:205-217. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004>.
11. Muborakov Kh., Ruziev A.S., Abdullaev I.U. On The Use of Remote Sensing Materials for Calculating Design Parameters and Monitoring the Regime of Reservoirs. *Izvestiya Geograficheskogo obshchestva Uzbekistana. Spetsial'nyi tom*. 2018:179-181. (In Russ.).
12. Astapovich A.V., Zhanov K.K., Medyanikov D.O., Yakovlev A.I. Relief Model of an Inaccessible Territory, Built Based On the Results of Integrating Heterogeneous Satellite Information. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2021;677:75-83. (In Russ.). EDN: WDKYET.
13. Biau G., Devroye L. *Lectures On the Nearest Neighbor Method*. New York: Springer, 2015. 300 p.
14. Fisher R., Hobgen S., Mandaya I., Kaho N.R., Zulkarnain *Satellite Image Analysis and Terrain Modelling – A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software*. Charles Darwin University, Universitas Nusa Cendana dan Universitas Halu Oleo, 2017. 151 p.
15. Ilinich V.V., Perminov A.V., Naumova A.A. Assessment of The Impact of Climatic Characteristics and Landscape Changes On the Maximum Flow of Small Watersheds. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2021;16(9):1228-1235. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.9.1228-1235>. EDN: UDKCUS.
16. Althumania D., Achour H. External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Journal of Remote Sensing*. 2014;6(5):4600-4620. <https://doi.org/10.3390/rs6054600>.
17. Patel A., Katiyar S.K., Prasad V. Performance Evaluation of Different Open Source DEM Using Differential Global Positioning System (DGPS). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2016;19(1):7-16. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004>.
18. Ilinich V.V., Perminov A.V., Naumova A.A. Impact of Landscape and Climate Changes On the Maximum Runoff of Small Watersheds. *Hydraulic Structures Construction*. 2022;7:15-19. (In Russ.). EDN: AZIXGJ.
19. Alali H., Perminov A.V. Monitoring of The 16 Tishrin Reservoir Using GIS-Technologies and Remote Sensing. *Reclamation and Water Management*. 2024;1:11-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2024-1-11-16>. EDN: AKHRPC.
20. Alali H., Perminov A.V. Water Evaporation from The 16 Tishrin Reservoir in Syria: Volume Measurement and Economic Impact Assessment. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):314-331. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-314-331>. EDN: XFAYAM.
21. Alali H., Perminov A.V. Use of Modern GIS Technologies in The Analysis of Hydrological Data of the Alkabeer Alshamali River in Syria. *Hydraulic Structures Construction*. 2024;4:49-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.34831/EP.2024.57.90.006>. EDN: MVOLRE.
22. Alali H., Perminov A.V., Rednikov S.N., Alsadek E.S. Morphometric Analysis of Al Kabir Al Shamali River Basin in Syria Using Aster (Digital Elevation Model) Image Based On GIS-Technology. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024;10(1):46-58. (In Russ.). EDN: YTMFDM.
23. Bukharitsin P.I., Ovcharova A.Yu., Tokareva A.A., Kutlusrina G.V. *Geoecology of Natural Complexes of the Lower Volga Under Conditions of Anthropogenic Impact: Collective Monograph*. Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 288 p. (In Russ.).

#### Информация об авторе

**Алали Хозефа,**  
аспирант,  
Российский государственный аграрный  
университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,  
127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия,  
✉e-mail: Hothefa.alali@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0000-3691-7230>  
Author ID: 1212752

#### Information about the author

**Hothefa Alali,**  
Postgraduate Student,  
Russian State Agrarian University - Moscow  
Timiryazev Agricultural Academy,  
49 Timiryazevskay St., Moscow 127434, Russia,  
✉e-mail: Hothefa.alali@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0000-3691-7230>  
Author ID: 1212752

#### Вклад автора

Автор провел исследование, подготовил  
рукопись к печати и несет ответственность за  
плагиат.

#### Contribution of the author

Author has conducted the study, prepared the manu-  
script for publication and bears the  
responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

**Conflict of interests**

The author declares that there is no conflict of interest.

The final manuscript has been read and approved by the author.

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 14.06.2024.  
Одобрена после рецензирования 01.07.2024.  
Принята к публикации 02.07.2024.

**Information about the article**

The article was submitted 14.06.2024.  
Approved after reviewing 01.07.2024.  
Accepted for publication 02.07.2024.