

СТАТЬЯ

УДК 528.02:528.7:528.2/.5
DOI 10.17513/use.38405

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБЩЕДОСТУПНОЙ
ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ
В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ BLENDER**

Насередин Х.Х., Алексашина Е.В., Акель М.А.

¹*Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва,
e-mail: eo-gis25@mail.ru;*

²*Дамасский университет, Дамаск*

Цифровые двух и трёхмерных документы можно использовать в бесчисленном количестве областей нашей жизни, как в военной, так и в гражданской, и в экономической области. Свойство документов и способ получения различаются в зависимости цели дальнейшего использования, требуемой точности и области применения. Виды цифровых документов местности: цифровые модели местности, цифровые модели рельефа, цифровые модели высоты, цифровые топографические карты, ортофотопланы местности и т.д. Целью данного исследования является использование компьютерного моделирования для имитации аэрофотосъемки с применением беспилотного летательного аппарата для повышения точности создания цифровой модели, полученной из одного из открытых источников в сети Интернет, путем изучения эффекта увеличения количества опорных точек, полученных в результате полевой геодезической съемки предполагаемой территории, что помогает дать наилучшие результаты реальной цифровой карты, с оптимальными финансовыми и временными затратами. Была проведена работа по моделированию многих территорий, по которым имеются полевые геодезические съемки, но из-за ограниченной возможности статьи автор выбрал лишь два варианта, на которых представлены открытая местность без сооружений и местность с плотной застройкой, различные климат и условия съемки на обоих участках. Результаты исследований и практических экспериментов показали снижение ошибок аэрофотосъемки исходной модели по контрольным точкам с известными координатами за счет увеличения количества опорных точек, которые используются для масштабирования моделей, полученных в результате обработки снимков компьютерного моделирования аэрофотосъемки исходной модели и в результате снижения среднеквадратических ошибок до четверти значения в большинстве случаев.

Ключевые слова: аэрофототопографическая съемка, имитационное моделирование, программное обеспечение BLENDER, фотографирование, цифровая модель местности, цифровая модель рельефа

**IMPROVING THE ACCURACY OF PUBLICLY AVAILABLE DIGITAL
TERRAIN MODELS USING SIMULATION MODELING OF AERIAL
PHOTOGRAMMETRIC SURVEYS IN BLENDER SOFTWARE**

Nasereddin K.K., Aleksashina E.V., Akel M.A.

¹*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, e-mail: eo-gis25@mail.ru;*

²*Damascus University, Damascus*

Two-dimensional and three-dimensional digital documents can be utilized in countless areas of scientific research, as well as in civil, military, and economic applications. The properties of the documents and the method of obtaining them differ depending on the required accuracy, the purpose of further use and the area of application. Types of digital terrain documents: digital terrain models, digital elevation models, digital topographic maps, orthophoto plans, etc. The purpose of this study is to use computer modeling to simulate aerial photography using Drones, to improve the accuracy of creating a digital model obtained from open sources on the Internet, by studying the effect of increasing the number of control points obtained as a result of field geodetic survey of the proposed territory, which give the best results of a real digital map, with optimal financial and time. Work was carried out on modeling many territories for which field geodetic surveys are available, due to the limited the article, were chosen only two options, which with and without structures and terrain, different climates and survey conditions in both areas. The results of experiments showed a decrease error of aerial photography of the original model increasing control points with known coordinates, and as a result, reducing the mean square errors more than 50% in most cases.

Keywords: digital terrain model, digital terrain elevation, aerial survey simulation, aerial photography, photography, blender software abstract

Введение

Цифровая модель рельефа (ЦМР) и цифровая модель местности (ЦММ) являются важными инструментами для создания

трехмерного представления местности и используются в различных областях науки и производства, таких как география, геология, экология, городское планирова-

ние и многие другие. Эти модели позволяют глубже понять характер местности, ее направления, склоны, а также методы трехмерного отображения рельефа поверхности Земли. ЦМР широко применяется в геоинформационных системах для решения различных задач – от простого анализа данных до сложного моделирования, направленного на определение оптимальных мест для строительства инженерных сооружений. Кроме того, цифровые модели рельефа находят многочисленные применения в гражданском строительстве, в частности при проектировании канализационных сетей, выделении контурных линий, анализе склонов и естественных направлений изучаемого участка. Они также полезны при проведении работ по гражданскому планированию и в оценке объемов земляных работ и обратной засыпки в строительных проектах [1-3].

Существует несколько типов цифровых моделей рельефа. Цифровая модель рельефа (ЦМР) отображает рельеф местности на основе высот, отображая его в целом. Цифровая модель рельефа на основе поверхности (digital surface models DSM) учитывает все объекты, находящиеся над землей, такие как деревья, здания и другие сооружения. Наземная цифровая модель рельефа (DTM) представляет поверхность Земли с учетом удаления различных объектов, чтобы показать только естественный рельеф [4-6].

Целью исследования является использование компьютерного моделирования для имитации аэрофотосъемки с использованием беспилотного летательного аппарата для повышения точности создания цифровой модели территории.

Материалы и методы исследования

Для достижения этой цели проводится исследование влияния увеличения количе-

ства контрольных точек, полученных в результате геодезической съемки предполагаемой территории. Данный подход позволяет достичь наилучших результатов при создании реальной цифровой карты с учетом оптимальных финансовых и временных затрат, что способствует повышению эффективности процесса картографирования и геодезических изысканий.

Существует несколько общедоступных универсальных цифровых моделей рельефа, которые отличаются друг от друга по точности (5, 10, 12,5, 30 и 90 м), таких как SRTM, ALOS AW3D30, ASTER GDEM, TANDEM, ALOS PALSAR, EMG2008 [7]. В качестве исходных данных для исследований использована цифровая модель рельефа SRTM, полученная из общедоступных интернет-источников, таких как OpenStreetMap. Для визуализации, редактирования и моделирования аэрофотосъемки на базе модели SRTM применялось программное обеспечение Blender 3D. Для этого необходимо настроить программное обеспечение и установить специальное приложение под названием GSI, которое позволяет соединяться с различными источниками общедоступной цифровой модели рельефа SRTM [8; 9]. На рисунке 1 показано, как использовать приложение GSI, а также как выбирать подходящую цифровую модель местности.

Также использовалось программное обеспечение Metashape для получения ортофотопланов и цифровой модели местности на основании данных аэрофотосъемки. В программном продукте Civil 3D построены поверхности на основе топографической съемки для каждого района исследования, а результаты экспортированы в формате LandXML [10].

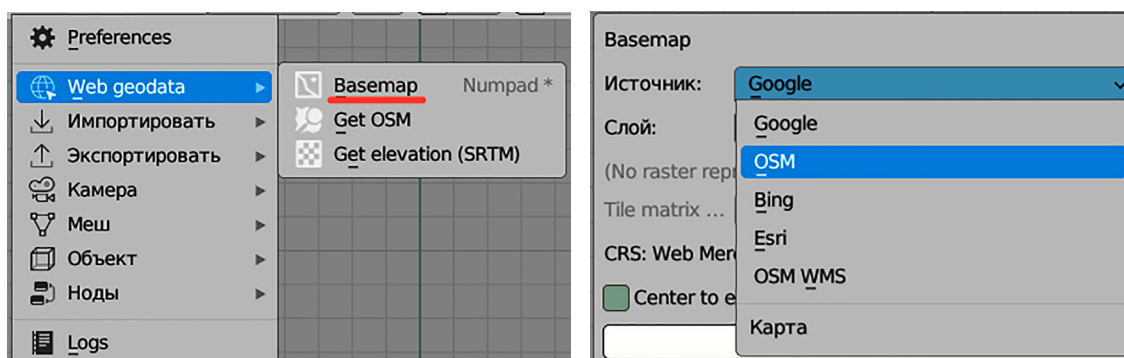


Рис. 1. Функции GSI (слева), OSM (справа) в программе Blender 3D
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

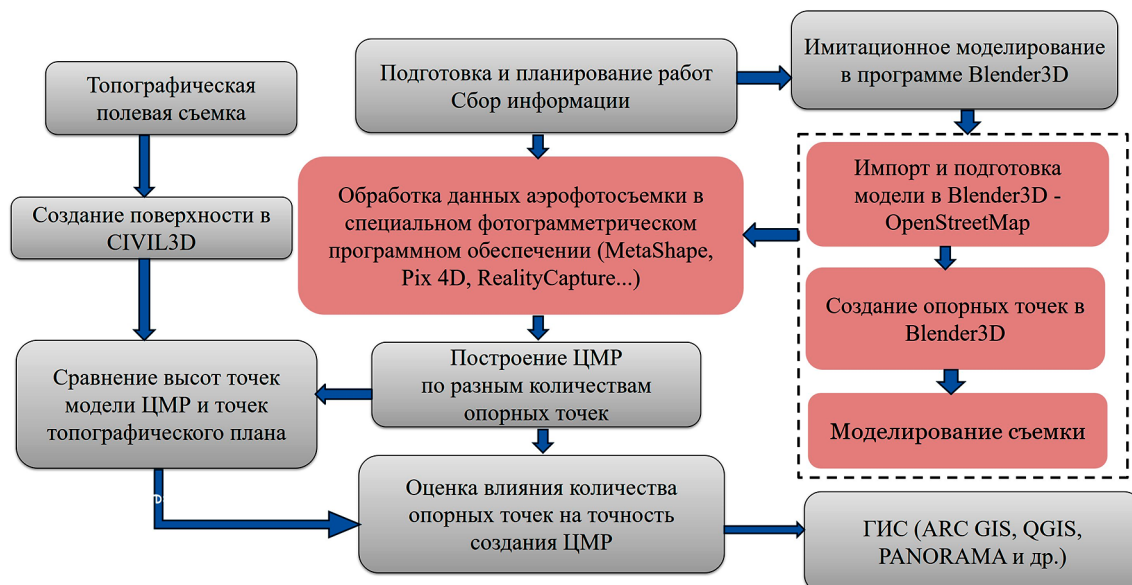


Рис. 2. Порядок исследования
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

В статье представлен анализ точности общедоступной цифровой модели рельефа SRTM, а также оценка ее точности. Для этого использовались геодезические данные в виде следующих топографических планов:

1. Топографический план в масштабе 1:500 для строительства инженерных проектов жилого комплекса «I Love» (г. Москва, СВАО).

2. Топографический план в масштабе 1:500 для строительства инженерных проектов жилого комплекса «Бирюлево» (г. Москва, ЮАО).

3. Модель SRTM была применена для каждого исследуемого района и получена с использованием программного обеспечения для 3D-моделирования, такого как Blender.

Порядок исследования, представленный на рисунке 2, начинается с подготовки и планирования работы, а также сбора информации. На первом этапе осуществляется сбор топографической съемки для каждого исследуемого района.

На втором этапе проводится имитационное моделирование в программе Blender 3D, которое проходит несколько шагов. В первый шаг входят импорт и подготовка модели в Blender 3D. В рамках данного исследования авторы импортировали модель из известных источников общедоступной цифровой модели местности, таких как Get OSM и Get Elevation (SRTM). После выбора источников выбираем участок, нажимаем на клавиатуре букву *E*, чтобы импортировать

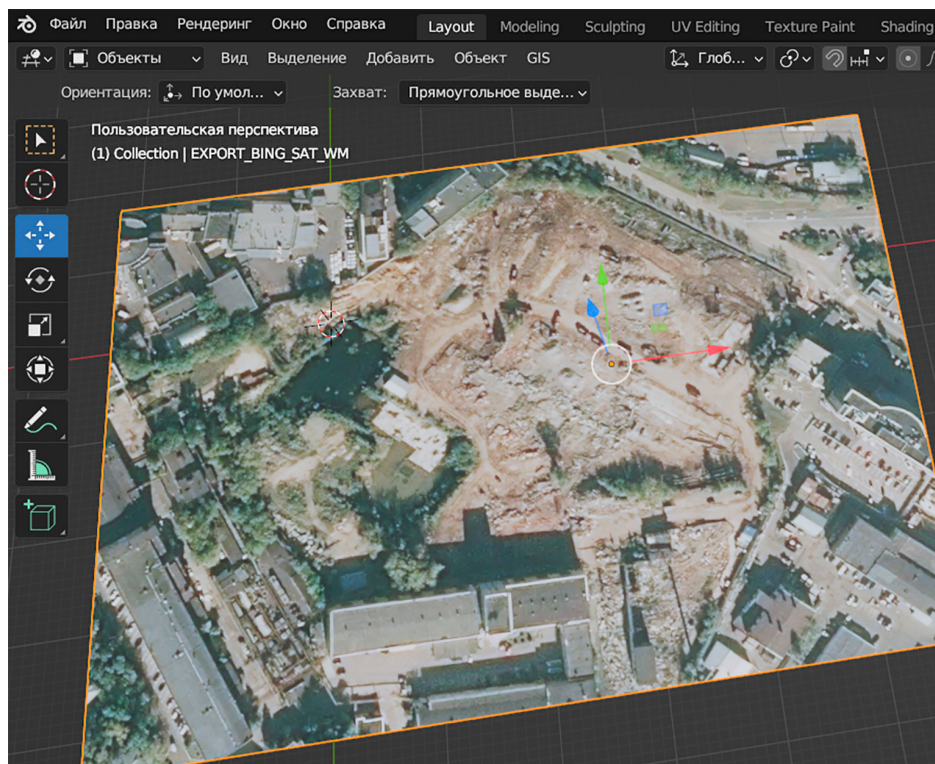
выбранную область в программу Blender. Таким образом, получим цифровую модель местности для районов жилого комплекса «I Love» и жилого комплекса «Бирюлево» в среду программного продукта Blender 3D, что показано на рисунках 3а и 3б.

Второй шаг в имитационном моделировании в программных продуктах Blender 3D – это создание опорных геодезических точек для преобразования импортируемых моделей в местные системы координат. Для этого необходимо смоделировать опорные точки. Используем одну из фигур, которую можно добавить в программу (например, куб), разделяем её на две части и раскрашиваем в разные цвета, чтобы четко обозначить центр куба, который будет служить координатой опорной точки. Повторяем действия для других опорных точек, и в структуре проекта появятся все опорные точки. Перемещаем эти точки на высотную модель SRTM и определяем местонахождение каждой точки, которая соответствует топографическому плану района исследования [11–13], что показано на рисунках 4а и 4б.

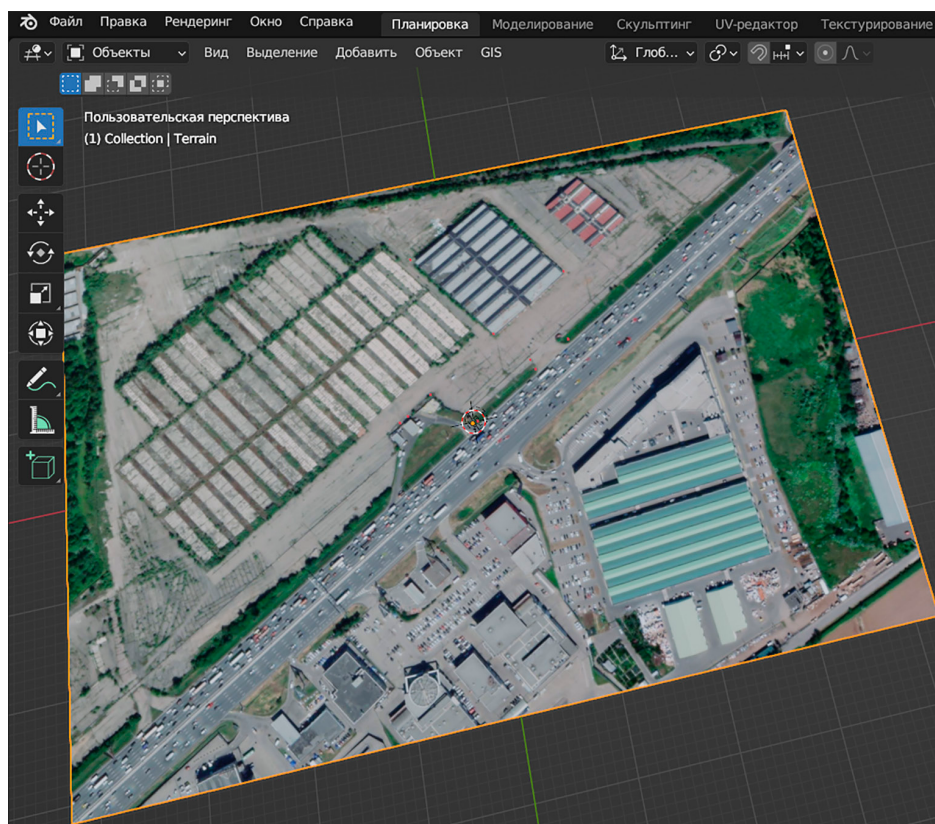
Третий шаг – это моделирование съемки. На основании длины и ширины участка, а также максимальной и минимальной высоты модуля можно определить размер пикселей по формуле:

$$PxI = Xn / Xu, \quad (1)$$

где Xn – физический размер матрицы и Xu – размер изображения.



*Рис. 3а. Модель ЦММ района ЖК «I Love»
Источник: составлено автором на основе результатов исследования*



*Рис. 3б. Модель ЦММ района ЖК «Бирюлево»
Источник: составлено автором на основе результатов исследования*

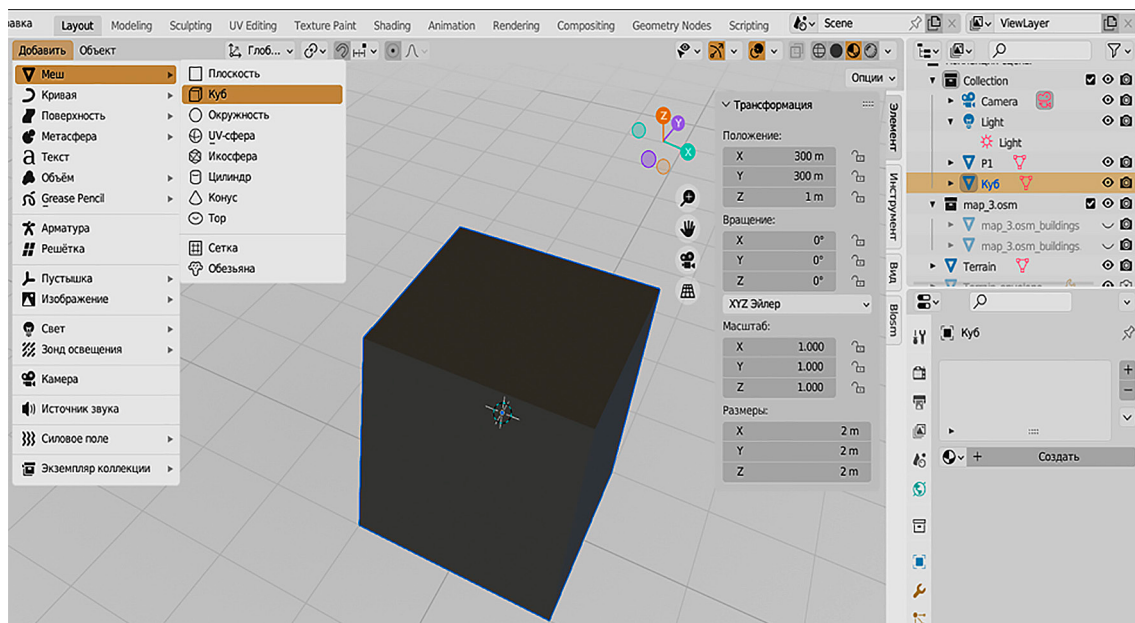


Рис. 4а. Пример маркеров в качестве опорных точек
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

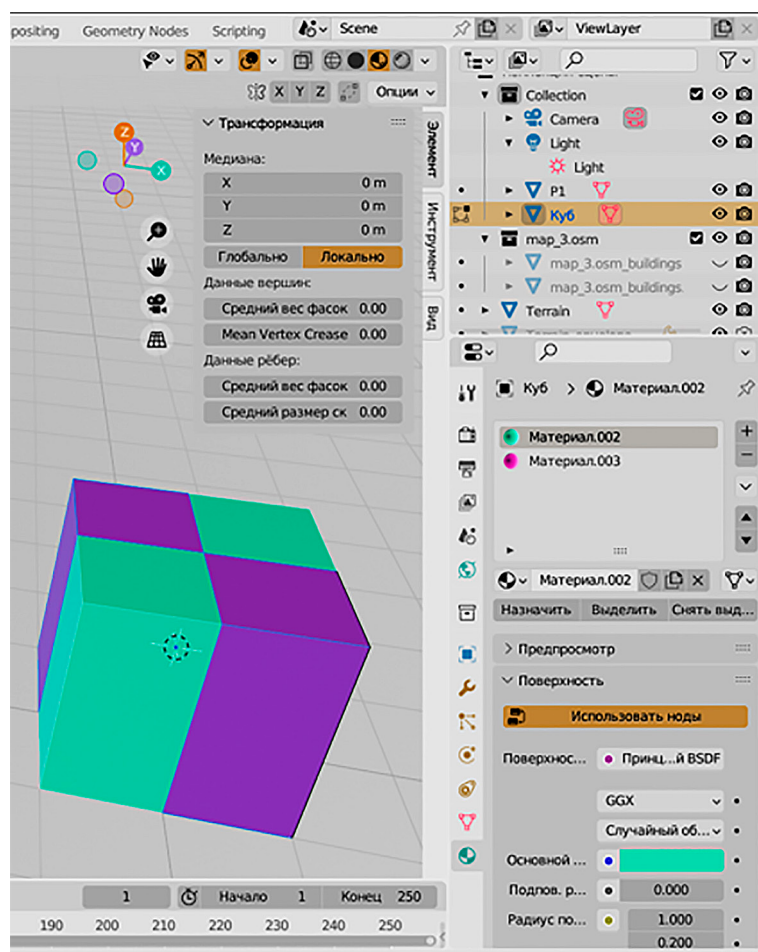


Рис. 4б. Пример маркеров опорных точек
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

Также определяем параметры камеры аэрофотосъемки, её калибровку, расчет маршрутов и значений продольного и поперечного перекрытия между снимками, а также рассчитываем высоту моделируемой съемки с учетом разрешения, необходимого для получения требуемой модели [14].

Расчетная высота фотографирования H_ϕ [15]

$$H_\phi = 2R \cdot GSD \cdot (f_k / \delta), \quad (2)$$

где H_ϕ – высота фотографирования относительно заданной поверхности (м);

f_k – фокусное расстояние фотосистемы (м);

GSD – проекция пикселя матрицы ЦАФА на заданной поверхности (м);

R – разрешение на матрице (цикл./пиксель)

δ – размер пикселя матрицы (м).

Расчетное продольное перекрытие аэрофотоснимков, p_x % [15]

$$p_x = p_{x0} + \Delta ph + \Delta pn, \quad (3)$$

где p_{x0} – минимальное продольное перекрытие = 60%,

Δph – поправка за рельеф,

$$\Delta ph = \Delta h \cdot \frac{(100 - p_{x0})}{H_\phi}. \quad (4)$$

где Δh – разность между самой высокой точкой и самой низкой точкой участка,

Δpn – навигационная поправка за ошибку самолетоуправления.

Расчетное поперечное перекрытие аэрофотоснимков, p_y % [15].

Для масштаба 1:10 000 и крупнее

$$p_y = 40\% + \left(50 \times \frac{\Delta h}{100 \times H_\phi} \right). \quad (5)$$

Продольный базис фотографирования, B_x (м)

$$B_x = \frac{(X_\Pi M_\phi)(100 - p_x)}{100}, \quad (6)$$

где $M_\phi = H_\phi / f$: знаменатель масштаба фотографирования

Поперечный базис фотографирования, B_y (м) [15]

$$B_y = \frac{(Y_\Pi M_\phi)(100 - p_y)}{100}, \quad (7)$$

где X_Π, Y_Π : физический размер матрицы (м)

Интервал фотографирования τ (сек.):

$$\tau = \frac{X_\Pi H_\phi}{f \cdot w} \cdot \frac{100 - p_x}{100}, \quad (8)$$

где X_Π – физический размер фото матрицы вдоль линии полета (м),

W – путевая скорость БВС (м/с).

Количество аэроснимков в одном маршруте, N_x [15]:

$$N_x = (L_x / B_x) + N_3; \quad N_3 = 4, \quad (9)$$

где L_x – длина участка съёмки (м)

Количество маршрутов, N_y [15]:

$$N_y = (L_y / B_y) + 0.5j; \quad j = 2, \quad (10)$$

где L_y – ширина участка (м)

Таблица 1

Расчетные данные аэрофотосъемки для двух районов: «I Love» и «Бирюлево»

Название элементов	Усл. обозначение	ЖК «I Love»	ЖК «Бирюлево»
Длина участка, км	Lx	0.38	0,7
Ширина участка, км	Ly	0.4	0,58
Максимальная высота участка, м	h max.y.	183.00	178
Минимальная высота участка, м	h min.y.	170.00	160
Высота среднего уровня участка, м	h ср.y.	176.50	169
Физический размер матрицы	X _п (lx)	0.0086	0.0086
	Y _п (ly)	0.0129	0.0129
Размер изображения	X _и	3648	3648
	Y _и	5472	5472
Фокусное расстояние (м)	f	0.0088	0.0088
Размер пикселя (м)	pxl	0,00000236	0,00000236
Количество маршрутов		5	5
Количество снимков		52	72
Высота съемки, м		186	186

Источник: составлено автором на основе результатов исследования.

Все результаты расчетов и параметры аэрофотосъемки для двух районов исследования представлены в таблице 1.

В результате моделирования съемки с использованием программных продуктов Blender 3D были получены данные аэрофотосъемки для двух районов исследования. Эти данные можно обрабатывать в специализированном программном обеспечении Metashape для построения цифровой модели местности и ортофотоплана. Следует отметить, что программа используется для решения задач построения трехмерных моделей на основе фотографий и является универсальной, позволяя создавать высоко детализированные 3D-модели только по фотографиям.

При работе в программе Metashape после указания параметров камеры, добавления и выравнивания снимков строится плотное облако точек и модель привязывается по четырем опорным геодезическим точкам, далее создаются 3D-модель, ЦММ и ортофотоплан [16].

После этого возвращаемся к облаку точек и увеличиваем количество опорных точек до восьми, продолжая построение цифровой модели местности и ортофотоплана. На последнем этапе увеличиваем количе-

ство опорных точек до двадцати и вновь формируем цифровую модель местности и ортофотоплан.

Повторяем эту работу для второго района исследования. В итоге авторы получали три цифровые модели местности и три ортофотоплана для каждого района.

Первая модель привязана по четырем опорным точкам, вторая – по восьми точкам, а третья, финальная модель – по максимальному количеству 20 геодезических точек (рис. 5).

На рисунках 6а, 6б представлено, как был получен ортофотоплан для каждого района работы, который был максимально привязан к опорным геодезическим точкам. В данном примере использовано 20 точек.

Экспортируем цифровую модель местности для каждого примера в формате LandXML.

На последнем этапе исследований можно провести сравнение двух поверхностей – существующей, полученной с помощью CIVIL3D, и поверхности, созданной на основе общедоступной цифровой модели местности с использованием методики имитационного моделирования в программном продукте BLENDER.

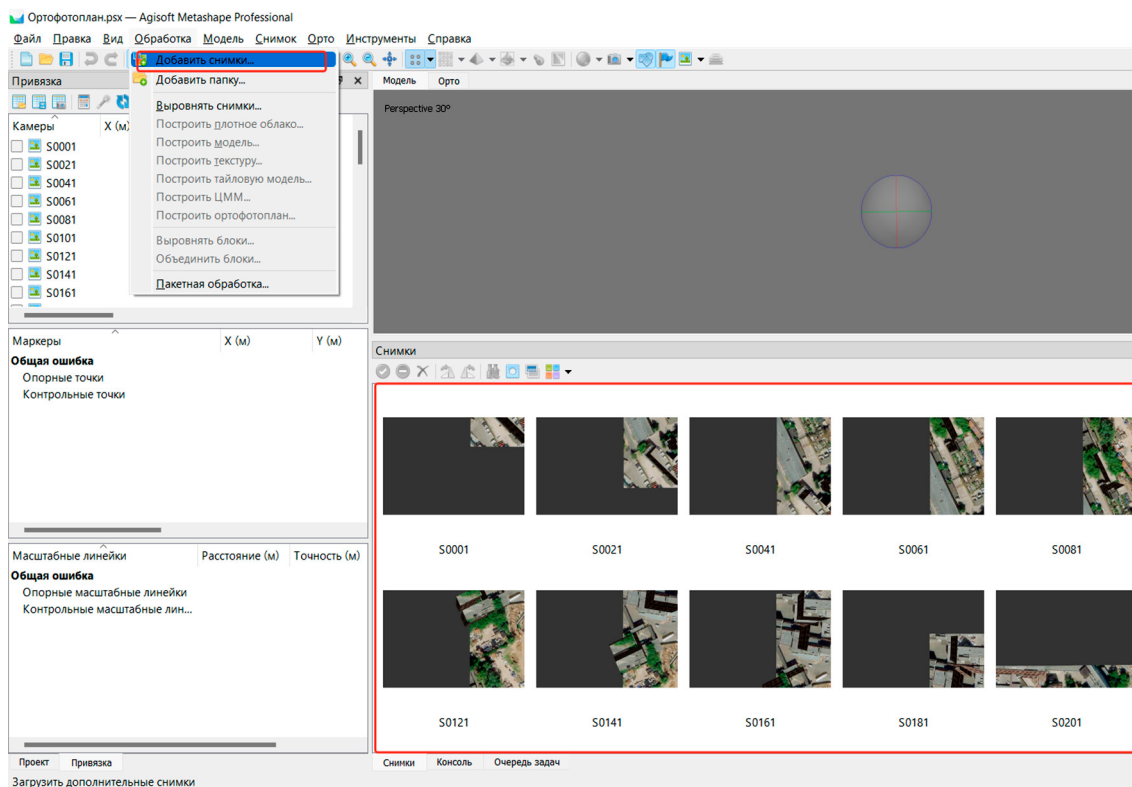


Рис. 5. Порядок построения цифровой модели местности в программе MetaShape
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

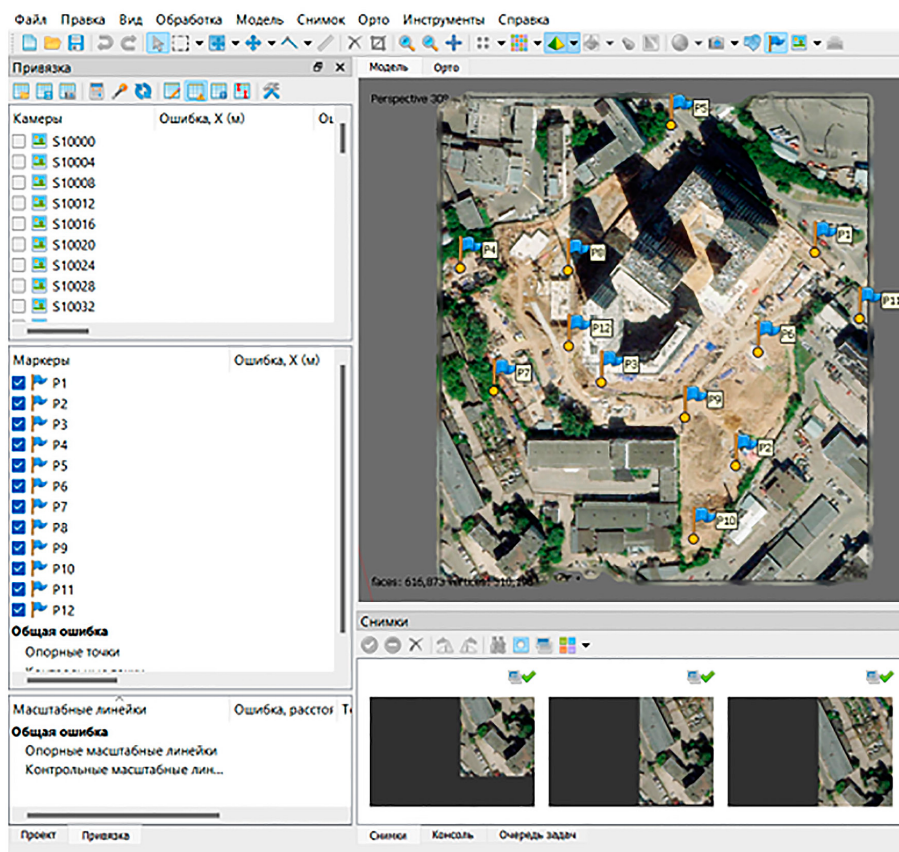


Рис. 6а. Ортофотоплан, ЖК «I Love»

Источник: составлено автором на основе результатов исследования

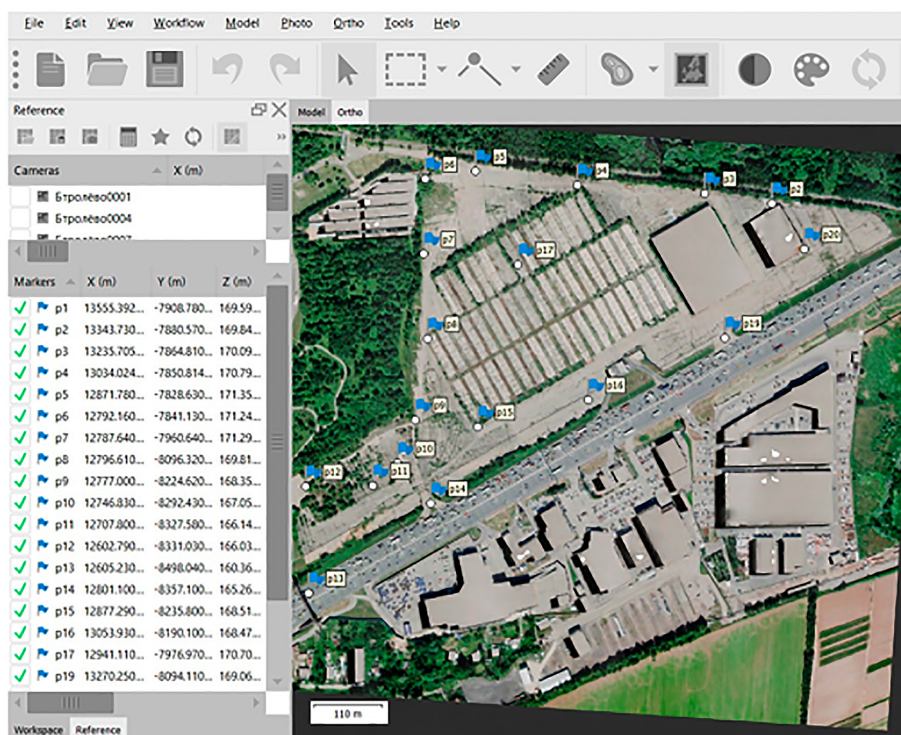


Рис. 6б. Ортофотоплан, ЖК «Бирюлево»

Источник: составлено автором на основе результатов исследования

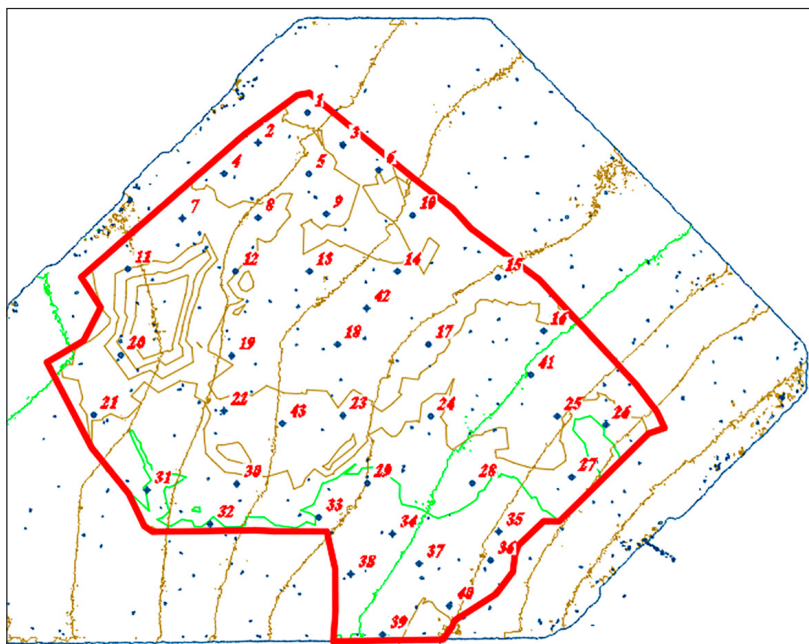


Рис. 7а. Сравнение двух поверхностей по высоте
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

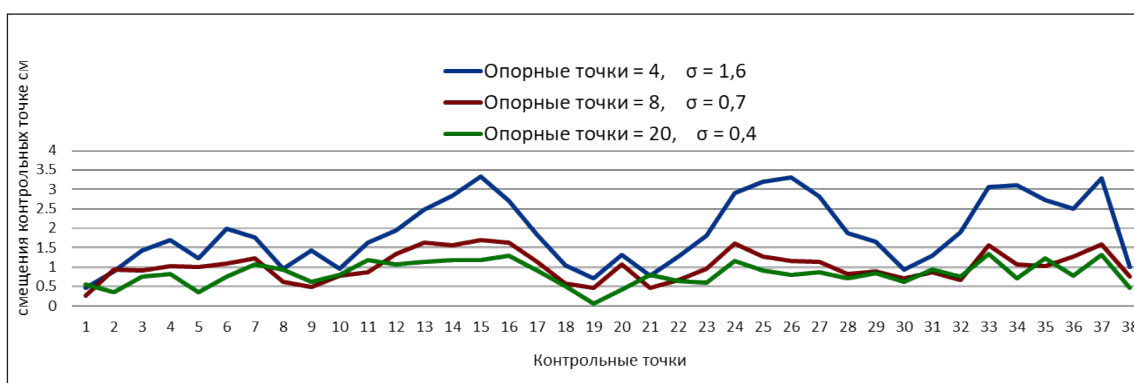


Рис. 7б. Точность модуля при увеличении количества геодезических опорных точек (ЖК «I Love»)
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

В результате сравнения среднее квадратическое отклонение между существующей поверхностью и поверхностью, созданной на основе общедоступной цифровой модели местности, привязанной к четырем опорным точкам, составляет 1,6 метра. При увеличении количества опорных точек до восьми среднее квадратическое отклонение уменьшилось до 0,7 метра. Для поверхности общедоступной цифровой модели местности, привязанной к 20 опорным геодезическим точкам, средняя квадратическая ошибка составила 0,4 метра. Это вся информация по жилому комплексу «I Love». Все результаты сравнения представлены на рисунках 7а, 7б и в таблице 2.

При повторении такого сравнения для второго района исследования – жилого комплекса «Бирюлево» средняя квадратическая ошибка при сравнении между существующей поверхностью и поверхностью общедоступной цифровой модели местности, привязанной к четырем опорным точкам, составила 4,6 метра. При увеличении количества опорных точек до восьми среднее квадратическое отклонение уменьшилось до 1,6 метра. При привязке к 20 опорным геодезическим точкам оно снизилось до 1,3 метра. Результаты сравнения представлены на рисунках 8а, 8б и в таблице 3.

Таблица 2

Сравнение высот точек модели SRTM и точек топографического плана (ЖК «I Love»)

Номер точки	ЖК «I Love»			4 опорные точки			8 опорных точек			20 опорных точек		
	Восточное положение	Северное положение	Отметка	Отметка	ΔH		Отметка	ΔH		Отметка	ΔH	
1	7988,050	16048,269	154,280	154,750	-0,470	1,487	154,530	-0,250	0,206	154,830	-0,550	0,033
2	7970,611	16040,365	155,360	154,470	0,890	2,541	154,420	0,940	2,703	155,000	0,360	1,191
3	8010,270	16041,162	154,000	155,430	-1,430	0,527	154,900	-0,900	0,038	154,750	-0,750	0,000
4	8014,127	16030,577	153,930	155,620	-1,690	0,972	154,960	-1,030	0,106	154,750	-0,820	0,008
5	7962,349	16027,380	155,450	154,220	1,230	3,740	154,460	0,990	2,870	155,110	0,340	1,148
6	8033,319	16018,391	154,060	156,040	-1,980	1,628	155,140	-1,080	0,141	154,810	-0,750	0,000
7	8003,732	16016,393	153,670	155,430	-1,760	1,115	154,890	-1,220	0,266	154,740	-1,070	0,115
8	7980,941	16015,794	154,070	155,030	-0,960	0,066	154,700	-0,630	0,005	155,010	-0,940	0,043
9	7954,352	16014,196	155,040	153,610	1,430	4,554	154,550	0,490	1,426	155,650	-0,610	0,015
10	7942,558	16001,184	155,380	154,420	0,960	2,769	154,610	0,770	2,173	156,180	-0,800	0,005
11	7975,062	16001,786	153,970	155,590	-1,620	0,839	154,830	-0,860	0,024	155,140	-1,170	0,192
12	8005,359	16002,187	153,780	155,720	-1,940	1,528	155,110	-1,330	0,392	154,840	-1,060	0,108
13	8032,445	16003,189	153,760	156,230	-2,470	3,119	155,390	-1,630	0,857	154,900	-1,140	0,167
14	8055,519	16003,390	153,930	156,760	-2,830	4,520	155,490	-1,560	0,733	155,120	-1,190	0,210
15	8072,625	15982,483	154,270	157,610	-3,340	6,948	155,960	-1,690	0,972	155,450	-1,180	0,201

Примечание: $\delta = 1,6$ $\delta = 0,7$ $\delta = 0,4$.

Источник: составлено автором на основе результатов исследования.

Таблица 3
Сравнение высот точек модели SRTM и точек топографического плана (ЖК «Бирюлево»)

Номер точки	ЖК «Бирюлево»			4 опорные точки			8 опорных точек			13 опорных точек		
	Восточное положение	Северное положение	Отметка	Отметка	ΔН		Отметка	ΔН	Отметка	Отметка	ΔН	
1	-245689,23	-120709,838	697,72	696,33	1,39	17,25	700,11	-2,39	697,58	697,58	0,14	0,26
2	-244923,8	-120745,455	700	693,86	6,14	79,26	697,71	2,29	698,57	698,57	1,43	3,25
3	-245328,37	-120810,163	696,54	693,97	2,57	28,44	697,71	-1,17	695,54	695,54	1	1,88
4	-245691,25	-120805,006	700	697,65	2,35	26,14	700,55	-0,55	699,93	699,93	0,07	0,19
5	-245686,25	-120895,947	703,43	706,45	-3,02	0,07	704,45	-1,02	703,84	703,84	-0,41	0,00
6	-245325,39	-120927,733	695,89	697,21	-1,32	2,08	696,57	-0,68	694,73	694,73	1,16	2,35
7	-245331,69	-121017,699	696,88	700	-3,12	0,13	697,53	-0,65	697,05	697,05	-0,17	0,04
8	-245329,38	-121137,62	698,37	706,38	-8,01	27,53	701,72	-3,35	700,41	700,41	-2,04	2,78
9	-244895,95	-121171,393	696,19	699,38	-3,19	0,18	695,98	0,21	696,94	696,94	-0,75	0,14
10	-245327,24	-121271,315	700	707,46	-7,46	22,06	701,75	-1,75	700,99	700,99	-0,99	0,38
11	-244882,03	-121268,739	697,48	702,18	-4,7	3,75	696,22	1,26	698,44	698,44	-0,96	0,35
12	-244881,29	-121368,043	698,89	707,28	-8,39	31,66	700,05	-1,16	698,55	698,55	0,34	0,51
13	-245317,29	-121356,055	699,21	708,37	-9,16	40,92	702,53	-3,32	702,86	702,86	-3,65	10,75

Примечание: $\delta = 4,6$ $1,6$ $\delta = 1,3$.
Источник: составлено автором на основе результатов исследования.

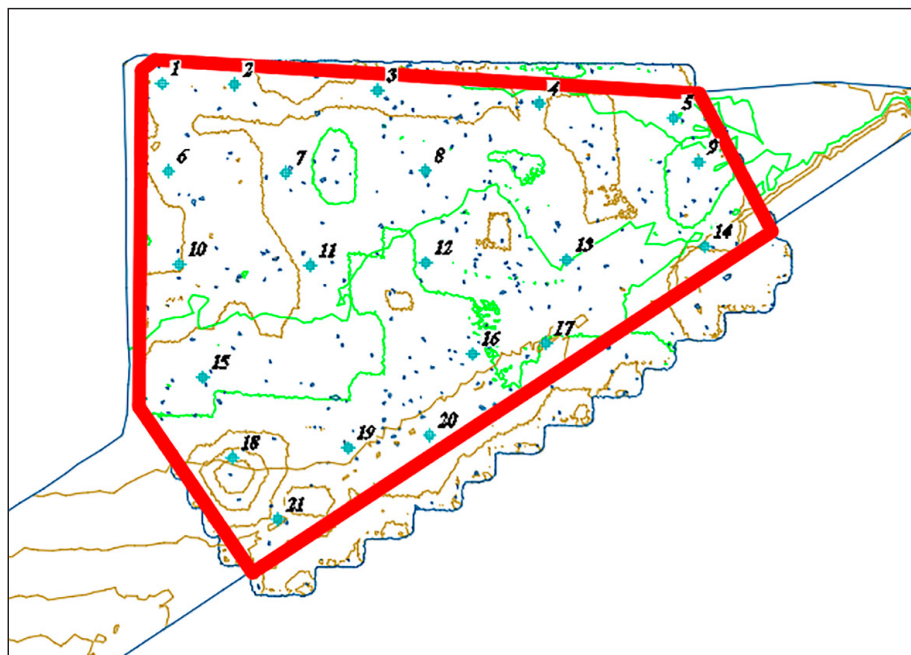


Рис. 8а. Сравнение двух поверхностей по высоте
Источник: составлено автором на основе результатов исследования

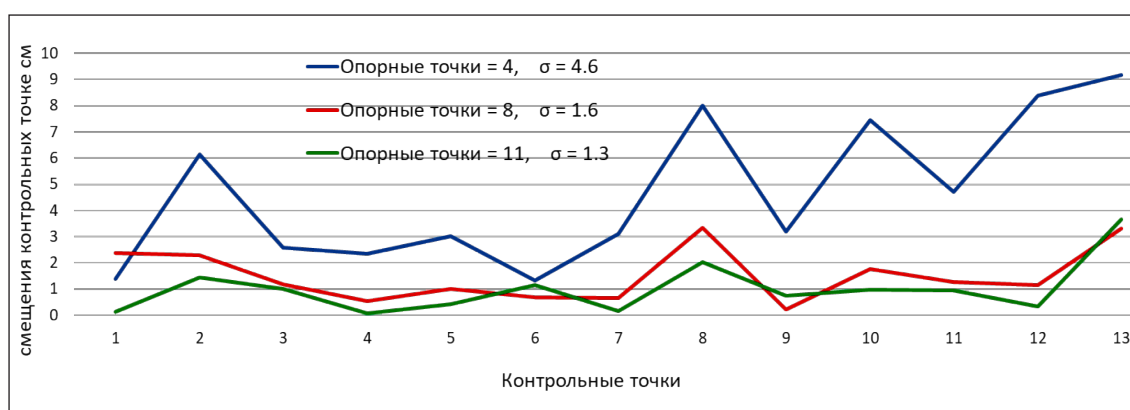


Рис. 8б. Точность модуля при увеличении количества геодезических опорных точек (ЖК «Бирюлево»)
Источник: составлено автором на основе результатов исследования.

Выводы

1. В исследовании выполнена оценка точности цифровой модели рельефа, которая демонстрирует, что средняя квадратическая погрешность высот понижается за счет добавления опорных точек.

2. Из исследования видно, что цифровая модель местности лучше зарекомендовала себя на «открытых» равнинных участках, чем на «закрытых» участках или на участках с уклоном.

3. Рекомендуется использовать цифровую модель местности для проектирования только после добавления минимально

12 и более опорных точек в зависимости от уровня и свойства сложности рельефа.

4. Цифровая модель рельефа SRTM является важным бесплатным исходным материалом для многих исследований, но она по-прежнему содержит значительные высотные погрешности.

Список литературы

1. Костин А.В. Цифровая модель рельефа (методы создания и направления использования) // Наука и техника в Якутии. 2011. № 1 (20). С. 23-28. EDN: VZWGUW.

2. Gospodinov S.G. Geoinformatics as a science of space // European Journal of Technology and Design. 2022. № 10-1. P. 3-8. DOI: 10.13187/ejtd.2022.1.3. EDN: UZKTCC.

3. Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов: 5-я Всероссийская научно-техническая интернет-конференция, Тула, 23–27 декабря 2015 года / Под редакцией И.А. Басовой. Тула: Тульский государственный университет, 2015. 392 с. ISBN 978-5-7679-3156. EDN: UBWVLT.
4. Васин А.О., Круглов Б.В. Построение трехмерных цифровых моделей рельефа по данным дистанционного зондирования земли // Контенант. 2019. Т. 18. № 1-1. С. 11-15. EDN: ZAMZSX.
5. Белова Е.А. Создание цифровой модели местности по результатам топографической съемки // Вестник магистратуры. 2016. № 11-2 (62). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-tsifrovoy-modeli-mestnosti-po-rezultatam-topograficheskoy-semki> (дата обращения: 15.06.2025).
6. Черных Е.Г., Букреев Д.А. Цифровые модели местности: классификация и методика // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2023. № 6. EDN: KYNPTH.
7. Павлова А.И., Павлов А.В. Анализ методов коррекции цифровых моделей рельефа, построенных по спутниковым данным // Автометрия. 2018. Т. 54. № 5. С. 25-32. DOI: 10.15372/AUT20180503. EDN: YLEOST.
8. Mukul M., Srivastava V., Mukul M. Analysis of the accuracy of shuttle radar topography mission (SRTM) height models using international global navigation satellite system service (IGS) network // Journal of Earth System Science. 2015. Vol. 124. P. 1343-1357. DOI: 10.1007/s12040-015-0597-2.
9. Nwacholundu U.V., Izuchukwu I.J., Ebele E.J., Onyedika E.J., Chinagorom I.E. Generating and analyzing terrain characteristics from shuttle radar topographic mission (SRTM), DEM. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2021. Vol. 10 (3). P. 198-206. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/d741/bb6205691d206f35664322a13ba6d579aeca.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).
10. Agisoft Metashape. Руководство пользователя // Agisoft [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agisoft.com> (дата обращения: 15.06.2025).
11. Акель Мохаммад Амин, Акл Магер Нассер, Алтынов А.Е. Использование методов имитационного моделирования для поиска наилучших решений получения трехмерных моделей местности по данным с беспилотных авиационных систем // Успехи современного естествознания. 2022. № 8. С. 150-159. DOI: 10.17513/use.37882. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37882> (дата обращения: 15.06.2025).
12. Акель Мохаммад Амин, Алтынов А.Е. Исследование влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы (аэрофотосъемки, лазерного сканера) на точность создания ЦММ с помощью имитационного моделирования // Успехи современного естествознания. 2022. № 5. С. 110-120. DOI: 10.17513/use.37833. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37833> (дата обращения: 15.06.2025).
13. Акель М.А. Выбор соответствующих параметров аэрофотосъемки с БВС для получения ЦММ с необходимой точностью // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26–28 апреля 2022 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. С. 391-396. EDN: CPNNOV.
14. Рихтер А.А., Чуклин С.И. Алгоритм калибровки фотограмметрических параметров для расчёта трёхмерных координат точек изображения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2024. Т. 20. № 3. С. 259-275. EDN: PLMRMV.
15. Курков В.М., Киселева А.С., Чибуничев А.Г. Исследование точности цифровой модели рельефа, построенной по материалам беспилотной аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования // Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений : материалы международной научно-практической конференции (Кемерово, 13–14 апреля 2022 года) / Под редакцией Т.В. Галаниной, М.И. Баумгартэна. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. С. 309.1–309.9. EDN: HDLUVС.
16. Торопов И.С. Оценка точности создания модели местности на основе аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата с помощью Agisoft Metashape // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2020. Т. 1. С. 195-199. EDN: UPZGTD.