



Особенности формирования цифровой модели рельефа по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна

А.А. Дычко¹✉, Л.В. Быков¹

АФФИЛИАЦИИ

¹ Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Омск, Россия
✉ dychkooa@yandex.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Дычко А.А., Быков Л.В. Особенности формирования цифровой модели рельефа по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Пространственные данные: наука и технологии. 2025. Т. 16, № 3. С. 32–41. DOI:10.30533/scidata-2025-16-13.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

беспилотное воздушное судно, интерполяция, фотограмметрическая обработка аэроснимков, цифровая модель, экстраполяция

АННОТАЦИЯ

В данной статье исследована возможность использования методов интерполяции и экстраполяции при построении цифровой модели рельефа в условиях лесостепной зоны. Оценивается целесообразность применения указанных методов в этой географической области, учитывая ее особенности и характер рельефа. Описаны проблемы, возникающие при построении цифровых моделей рельефа, полученных по результатам фотограмметрической обработки аэроснимков с беспилотного воздушного судна. Проведен сравнительный анализ точности различных подходов. Изучены факторы, влияющие на точность при использовании обоих методов, такие как процент залесенности участка и расположение лесных массивов в отдельно заданных областях. В рамках исследования выявлены основные факторы, влияющие на качество моделирования, включая плотность исходных

данных, характер рельефа и параметры используемых алгоритмов. Полученные результаты позволяют определить наиболее эффективные методы для повышения точности цифровых моделей рельефа в лесостепной зоне. Исследование способствует развитию методов цифрового моделирования рельефа и может быть использовано при проектировании линейных объектов, планировании природоохранных мероприятий, сельскохозяйственных работах, а также при топографо-геодезических работах и картографировании в условиях данной природной зоны.

1 Введение

Беспилотные воздушные суда (БВС), оснащенные спутниковыми приемниками геодезического класса, нашли широкое применение в проведении инженерных изысканий для проектирования различных объектов [1]. Их популярность обусловлена высокой точностью получаемой информации, скоростью сбора данных и относительно низкими затратами на производство конечного результата [2].

Несмотря на значительные преимущества данной технологии, она сопряжена с рядом ограничений как в правовой [3], так и в технической сфере. Особенно это касается БВС, оснащенных лишь аэрофотокамерой и лишенных систем LiDAR [4] (англ. Light Detection and Ranging — «обнаружение и определение дальности при помощи света»). При обработке данных аэрофотосъемки, выполненной с использованием БВС, в условиях плотной сомкнутости крон добиться достоверного определения высотных отметок рельефа в лесных массивах практически невозможно. Для создания точной и корректной цифровой модели рельефа [5], как правило, требуется проведение дополнительных полевых измерений с применением традиционных наземных геодезических методов съемки. Это ведет к увеличению времени обработки и удорожанию готовой продукции.

2 Материалы и методы

Исследуемая территория располагается в центральной части Омской области и представляет собой равнинный ландшафт, преобладающая часть которого занята сельскохозяйственными угодьями. Территория покрыта развитой сетью автомобильных дорог и включает участки с высокоствольными лесными массивами как естественного, так и искусственного происхождения. Для проведения аэрофотосъемки был задействован беспилотный воздушный комплекс «Геоскан 201».

Результатом аэрофотосъемки стал набор фотоснимков [6], которые в дальнейшем были обработаны в фотограмметрическом программном обеспечении (ПО)

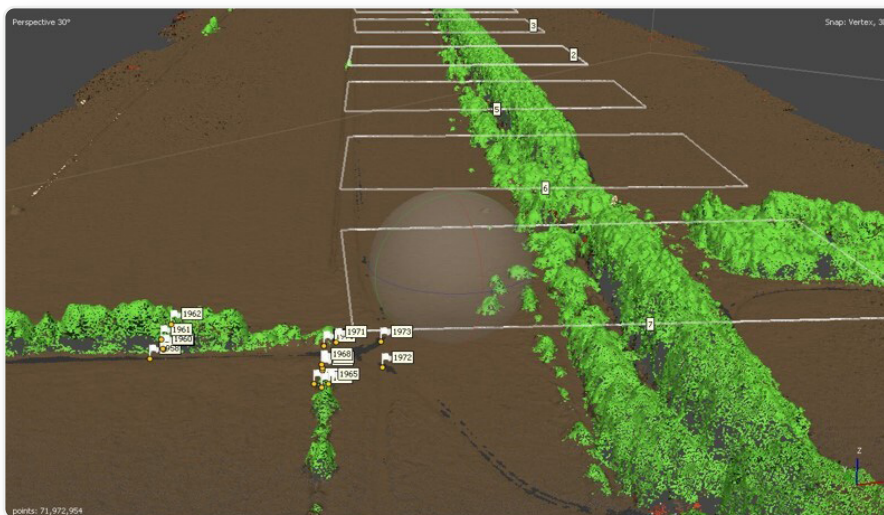
Agisoft Metashape. После обработки [7] было получено плотное облако точек¹ [8, 9], классифицированное стандартными средствами ПО.

Параллельно с аэрофотосъемкой на заданном участке работ проводился комплекс наземных контрольных измерений с применением электронного тахеометра. В результате был получен набор точек с известными плано-высотными координатами.

Поскольку объект исследования расположен в равнинной местности, можно предположить, что уклон рельефа на небольших участках будет относительно стабильным, без значительных перепадов высот. В таких условиях для восстановления данных о рельефе под пологом леса целесообразно применить методы интерполяции и экстраполяции [10]. Наиболее точным, на наш взгляд, может стать подход, основанный на построении профилей и поверхностей поперек оси проектируемого объекта (рис. 1).

Рис. 1 Поверхности, построенные поперек оси проектируемой трассы

Fig. 1 Surfaces constructed across the axis of the designed route



Точки облака, попадающие в каждый подобный участок, образуют поверхность, которую можно описать формулой

1
$$Z = A_0 + A_1 X + A_2 Y,$$

где A_0 — свободный член;
 X, Y, Z — известные координаты точек, образующих поверхность;
 A_1 и A_2 — коэффициенты, которые показывают, как изменения в X и Y влияют на значение Z .

¹ Чибуничев А.Г. Фотограмметрия: учебник. М.: МИИГАиК, 2022. 327 с.

Решением данного уравнения являются коэффициенты A_0 , A_1 и A_2 , с помощью которых можно определить предполагаемую высоту любой точки на поверхности, используя ее плановые координаты X и Y . При расчетах использовались точки, отнесенные к слою «Земля». Все точки, попадающие в границы лесных массивов, были заранее исключены из анализа.

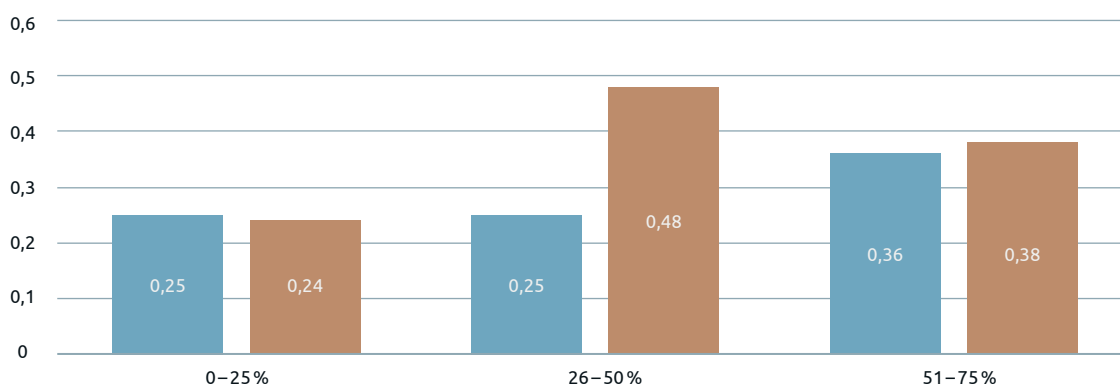
После этого было определено отклонение высоты контрольных и вычисленных по формуле (1) точек.

3 Результаты

Участки были ранжированы по проценту залесенности и по методу вычисления точек (интерполированные и экстраполированные). Средние значения разности высот представлены на **рис. 2**.

Рис. 2 Средние отклонения высоты точек в зависимости от процента залесенности территории

Fig. 2 Average deviations of the height of points depending on the percentage of forest cover of the territory



Условные обозначения

- Интерполяция
- Экстраполяция

Всего было обработано 10 км трассы, включающие участки с различной степенью покрытия лесными массивами. На эти участки пришлось выборка из 240 точек: 120 контрольных и 120 вычисленных, соответствующих контрольным в плановом положении.

4 Обсуждение

Вычисление точек проводилось двумя методами. Если участок леса располагался таким образом, что слева и справа от него были точки фотограмметрического облака, по которым выполнялось решение уравнения (1), то он относился к группе интерполированных. Участок леса, расположенный ближе к границе и пересекающий ее, принадлежал группе экстраполированных.

При относительно небольшой степени залесенности (до 25 %) полученные значения идентичны и не зависят от метода вычисления точек, поскольку количество точек класса «Земля» достаточно велико и позволяет вычислить значение высоты точек под пологом леса с точностью, достаточной для формирования топографической основы масштаба 1:500–1:1000.

Наиболее интересные значения получились во второй группе, которую составляют участки с процентом залесенности от 26 до 50 %. Группа интерполированных точек показала практически двухкратное увеличение точности вычисления в сравнении с экстраполированными точками. При этом не замечено падение точности в группе интерполированных точек относительно группы с процентом залесенности до 25 %.

При увеличении площади покрытия леса свыше 50 % наблюдается резкое снижение точности высоты вычисленных точек. Вероятно, это связано с недостаточным количеством исходных точек класса «Земля».

5 Выводы

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Выбор методики вычисления особенно сильно влияет на точность конечного результата при средней степени залесенности поперечников.
2. Для слабозалесенных участков (до 25 %) допустимо применение обоих методов вычисления высоты точек для восстановления рельефа под кронами деревьев.
3. На поперечниках, до 50 % площади которых покрыто высокоствольной растительностью, предпочтительно использовать только метод интерполяции.
4. Точность полученных значений удовлетворяет созданию топографической основы с высотой сечения 1,0 м. При соблюдении ряда условий возможно создание топографической основы с высотой сечения 0,5 м.
5. Методика позволяет в камеральных условиях выбирать участки для полевого контроля, что, в свою очередь, способствует оптимизации выполнения работ.

БИБЛИОГРАФИЯ


1. Бабашкин Н.М., Нехин С.С. Топографическая аэросъемка. Современное состояние и перспективы развития // Геодезия и картография. 2015. № 7. С. 36–41. DOI:10.22389/0016-7126-2015-901-7-36-41.
2. Турк Г.Г., Карачёв Н.К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии // Вектор ГеоНаук. 2023. Т. 6, № 2. С. 56–60. DOI:10.24412/2619-0761-2023-2-56-60.
3. Зазулин В.А., Чернов А.В., Ершов А.В. Особенности использования беспилотных летательных аппаратов при выполнении кадастровых работ на территории Новосибирской области // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Международный научный конгресс: сборник материалов: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 7, № 1. С. 45–52.
4. Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 4 (382). С. 9–22. DOI:10.37482/0536-1036-2021-4-9-22.
5. Зарипов А.С. Особенности создания трехмерной цифровой модели центрального планировочного района города Перми по данным аэрофотосъемки // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 3. С. 160–168. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-3-160-168.
6. Хлебникова Т.А., Опритова О.А., Аубакирова С.М. Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Международный научный конгресс: сборник материалов: в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 1. С. 32–37.
7. Ушнова С.В., Желтко Ч.Н., Жулин Я.И. О фототриангуляции для составления ортофотоплана // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015. № 2. С. 61–68.
8. Кочуров Б.И., Карандеев А.Ю., Мерекалова К.А. и др. Выделение древесной растительности с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для оценки зеленой инфраструктуры городских ландшафтов // Проблемы региональной экологии. 2021. № 5. С. 42–47. DOI:10.24412/1728-323X-2021-5-42-47.
9. Захлебин А.С. Метод обработки материалов аэрофотосъемки для построения геопривязанного ортофотоплана местности с телевизионной камеры беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 PRO // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2021. № 4 (53). С. 26–35. DOI:10.17212/1727-2769-2021-4-26-35.
10. Быков Л.В., Дычко А.А. Особенности построения модели рельефа при линейных изысканиях по материалам аэрофотосъемочных работ с БВС в лесостепной зоне // Геодезия и картография. 2025. Т. 86, № 1. С. 2–9. DOI:10.22389/0016-7126-2025-1015-1-2-9.

АВТОРЫ

Дычко Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»,
Омск, Россия

кафедра геодезии и дистанционного зондирования, землеустроительный факультет

 0009-0007-4676-3686


Быков Леонид Васильевич

 blv-55@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»,
Омск, Россия

кафедра геодезии и дистанционного зондирования, землеустроительный факультет

канд. техн. наук, доцент

 0009-0000-5670-5761

Поступила 13.06.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.

UDC 528.7

DOI:10.30533/scidata-2025-16-13



Features of Digital Formation of the Model Relief Based on the Results of Aerial Photography from Unmanned Aerial Vehicles

Andrei A. Dychko¹✉, Leonid V. Bykov¹

AFFILIATIONS

¹ Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia

✉ dychkoaa@yandex.ru

CITATION

Dychko AA, Bykov LV. Features of Digital Formation of the Model Relief Based on the Results of Aerial Photography from Unmanned Aerial Vehicles. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(3): 32–41. DOI:10.30533/scidata-2025-16-13.

KEYWORDS

unmanned aerial vehicle, interpolation, photogrammetric processing of aerial photographs, digital model, extrapolation

ABSTRACT

This article explores the feasibility of using interpolation and extrapolation methods to construct a digital elevation model in the forest-steppe zone. The feasibility of applying these methods in this geographic area is assessed, taking into account its features and the nature of the terrain. The challenges encountered in constructing digital elevation models obtained from photogrammetric processing of aerial photographs taken by an unmanned aerial vehicle (UAV) are described. A comparative analysis of the accuracy of various approaches is conducted. Factors influencing the accuracy of both methods are examined, including the percentage

of forest cover and the location of forested areas within specific areas. The study identified the main factors influencing modeling quality, including the density of the initial data, the nature of the terrain, and the parameters of the algorithms used. The results obtained make it possible to identify the most effective methods for improving the accuracy of digital elevation models in the forest-steppe zone. The study contributes to the development of digital terrain modeling methods and can be used in the design of linear objects, planning environmental measures, agricultural work, as well as in topographic and geodetic work and mapping in the conditions of this natural zone.


REFERENCES

1. Babashkin NM, Nekhin SS. Topograficheskaya aeros''emka. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Topographical Aerial Photography. Situation and Development Prospects]. *Geodesy and Cartography*. 2015;7: 36–41. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2015-901-7-36-41.
2. Turk GG, Karachev NK. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov (BPLA) v geodezii [Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Geodesy]. *Vector of Geosciences*. 2023;6(2): 56–60. (In Russian). DOI:10.24412/2619-0761-2023-2-56-60.
3. Zazulin VA, Chernov AV, Ershov AV. Osobennosti ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri vypolnenii kadastrykh rabot na territorii Novosibirskoi oblasti [Features of the Use of Unmanned Aerial Vehicles when Performing Cadastral Works on the Territory of the Novosibirsk Region]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XVIII International Scientific Congress*. In 8 vols. Vol. 7. Iss. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 45–52. (In Russian).
4. Nizametdinov NF, Moiseev PA, Vorob'ev IB. Lazernoe skanirovanie i aerofotos''emka s BPLA v issledovanii struktury lesotundrovyykh drevostoev Khibin [Laser Scanning and Aerial Photography with UAV in Studying the Structure of Forest-Tundra Stands in the Khibiny Mountains]. *Russian Forestry Journal*. 2021;4(382): 9–22. (In Russian). DOI:10.37482/0536-1036-2021-4-9-22.
5. Zaripov AS. Osobennosti sozdaniya trekhmernoi tsifrovoi modeli tsentral'nogo planirovochnogo raiona goroda Permi po dannym aerofotos''emki [Creating a Three-Dimensional Digital Surface Model of the Central Planning District of Perm Based on Aerial Survey Data]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(3): 160–168. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-3-160-168.
6. Khlebnikova TA, Opritova OA, Aubakirova SM. Eksperimental'nye issledovaniya tochnosti postroeniya fotogrammetricheskoi modeli po materialam BPLA [Experimental Studies of Photogrammetric Model Accuracy by UAV]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XIV International Scientific Congress*. In 2 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2018: 32–37. (In Russian).



7. Ushnova SV, Zheltko ChN, Zhulin Ya. O fototriangulyatsii dlya sostavleniya ortofotoplana [About Triangulation to Produce Orthophoto]. *Scientific Papers of Kuban State Technological University*. 2015;2: 61–68. (In Russian).
8. Kochurov BI, Karandeev AYu, Merekalova KA, et al. Vydelenie drevesnoi rastitel'nosti s pomoshch'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov (BPLA) dlya otsenki zelenoi infrastruktury gorodskikh landshaftov [Identification of Trees Canopy Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Assessing Green Infrastructure of Urban Landscapes]. *Regional Environmental Issues*. 2021;5: 42–47. (In Russian). DOI:10.24412/1728-323X-2021-5-42-47.
9. Zakhlebin AS. Metod obrabotki materialov aerofotos'emki dlya postroeniya geopriv'yazannogo ortofotoplana mestnosti s televizionnoi kamery bespilotnogo letatel'nogo apparata DJI Phantom 4 PRO [A Method of Processing Aerial Photography Materials for Building a Georeferenced Orthomosaic of the Terrain from a Television Camera of the Unmanned Aerial Vehicle DJI Phantom 4 PRO]. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2021;4(53): 26–35. (In Russian). DOI:10.17212/1727-2769-2021-4-26-35.
10. Bykov LV, Dychko AA. Osobennosti postroeniya modeli rel'efa pri lineinykh izyskaniyakh po materialam aerofotos'emochnykh rabot s BVS v lesostepnoi zone [Features of Relief Model Constructing at Linear Surveys Based on UAV-Aerial Photography Materials in the Forest-Steppe Zone]. *Geodesy and Cartography*. 2025;86(1): 2–9. DOI:10.22389/0016-7126-2025-1015-1-2-9.

AUTHORS

Andrei A. Dychko

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia
Department of Geodesy and Remote Sensing, Faculty of Land Management
 0009-0007-4676-3686

Leonid V. Bykov

 blv-55@yandex.ru
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia
Department of Geodesy and Remote Sensing, Faculty of Land Management
PhD in Engineering, Associate Professor
 0009-0000-5670-5761

Submitted: June 13, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.