



Исследование точности двухъярусной аэрофотосъемки с определением координат центров фотографирования при создании топографических планов по материалам беспилотной аэрофотосъемки

Л.В. Быков¹✉, О.Н. Пушак¹, А.А. Морозова²

АФФИЛИАЦИИ

¹ Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Омск, Россия

² «Газстройпром», Санкт-Петербург, Россия

✉ lv.bykov@omgau.org

ЦИТИРОВАНИЕ

Быков Л.В., Пушак О.Н., Морозова А.А. Исследование точности двухъярусной аэрофотосъемки с определением координат центров фотографирования при создании топографических планов по материалам беспилотной аэрофотосъемки // *Пространственные данные: наука и технологии*. 2025. Т. 16, № 2. С. 98–108. DOI:10.30533/scidata-2025-16-11.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

двухъярусная аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, материалы дистанционного зондирования, калибровка

АННОТАЦИЯ

В современных цифровых фотограмметрических системах при обработке данных, как правило, по умолчанию выполняется самокалибровка снимков. Планово-высотная привязка изображений при топографических съемках должна учитывать особенности наземного обеспечения самокалибровки. Колебания высот между опорными точками должны быть

больше, чем возможные превышения определяемых точек. Если это требование не выполняется, необходимо дополнительно определять координаты центров фотографирования. На равнинных территориях с высотной застройкой нужна привязка координат опознаков и центров фотографирования. Это позволяет определить достоверные параметры калибровки, соответствующие всему координатному пространству объекта. В практике кадастровых работ при аэрофотосъемке часто ограничиваются привязкой центров фотографирования. Опознаками на местности в лучшем случае служат базовые станции. При самокалибровке снимков в условиях равнинной местности ошибки в координатах точек не ощущаются. При попытке определить отметки высоких объектов, таких как многоэтажные строения, возникают недопустимые ошибки по высоте. Избежать ошибок в этих условиях привязки можно, выполняя двухъярусную съемку с совместной обработкой снимков. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований особенностей двухъярусных съемок с высот 110 и 90 м. Рассматриваются технологии, применяемые при создании топографических планов, исследуется методика самокалибровки снимков в условиях равнинной местности. Сделаны практические выводы о возможности применения метода двухъярусной аэрофотосъемки для создания ортофотопланов.

1 Введение

В настоящее время при создании крупномасштабных топографических планов используются материалы дистанционного зондирования. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет снизить экономические и временные затраты на производство работ.

Наличие материалов аэрофотосъемки облегчает процесс создания топографического плана. Для получения качественной продукции необходимо, чтобы материалы, полученные с БПЛА, соответствовали требованиям к качеству снимков и точности результатов фотограмметрических построений.

У БПЛА по сравнению с пилотируемыми средствами имеется ряд недостатков: они оснащены не профессиональными, а любительскими камерами. Для получения снимков надлежащего качества необходима съемка с относительно малых высот (порядка 50–200 м). Любительские камеры нуждаются в калибровке, поскольку неизвестны их элементы внутреннего ориентирования и параметры дисторсии, а нелинейные искажения оптики могут достигать нескольких десятков пикселей, что на порядок снижает точность результатов обработки^{1,2} [1–3]. Современное программное обеспечение для фотограмметрической обработки снимков позволяет автоматизировать процесс калибровки фотоаппаратов

1 Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. М.: Недра, 1982. 224 с.

2 Чибуничев А.Г. Фотограмметрия: учебник. М.: МИИГАиК, 2022. 328 с.

на основе принципа самокалибровки [4–6]. При этом следует обеспечить избыток исходных данных и выполнение определенных геометрических условий. Аэрофотосъемка с определением координат центров фотографирования в сочетании с привязкой избыточного количества наземных опорных точек обеспечивает выполнение всех необходимых требований.

В практике нередко случаи, когда исполнитель, стремясь ускорить процесс съемки и снизить затраты, отказывается от привязки наземных опорных точек или уменьшает их количество до минимума. В итоге после фотограмметрической обработки снимков получают недостоверные параметры самокалибровки и грубые ошибки в результатах построений [7–9].

Цель работы заключается в исследовании точности материалов беспилотной съемки с определением координат центров фотографирования при самокалибровке камеры путем двухъярусной аэрофотосъемки.

2 Материалы и методы

Двухъярусная аэрофотосъемка с определением координат центров фотографирования является одним из способов корректного решения задачи калибровки камеры в процессе фотограмметрических построений при минимуме наземных опорных точек. На небольших по площади объектах затраты на двухъярусную аэрофотосъемку могут оказаться меньше, чем затраты на привязку опорных точек на местности. При работах на линейных объектах в труднодоступных районах двухъярусная аэрофотосъемка может быть единственно возможным способом корректного решения задачи. Таким образом, исследование технологии двухъярусной съемки является актуальным.

Сущность способа самокалибровки состоит в том, что одновременно определяются поправки к приближенным элементам внешнего ориентирования, координатам точек местности, элементам внутреннего ориентирования и суммарные поправки к координатам точек за влияние источников систематических ошибок [10]. Математические условия решения задачи выражаются уравнениями коллинеарности проектирующих лучей в пространстве снимка и местности:

$$1 \left. \begin{aligned} -f \frac{a_1(X_g - X_s) + b_1(Y_g - Y_s) + c_1(Z_g - Z_s)}{a_3(X_g - X_s) + b_3(Y_g - Y_s) + c_3(Z_g - Z_s)} - (x - x_0 + \delta_x) &= 0, \\ -f \frac{a_2(X_g - X_s) + b_2(Y_g - Y_s) + c_2(Z_g - Z_s)}{a_3(X_g - X_s) + b_3(Y_g - Y_s) + c_3(Z_g - Z_s)} - (y - y_0 + \delta_y) &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где f — фокусное расстояние;

a, b, c — направляющие косинусы — функции угловых элементов внешнего ориентирования снимка a, ω, κ ;

X_g, Y_g, Z_g — координаты точки местности во внешней системе координат;

X_s, Y_s, Z_s — координаты центра проекции во внешней системе координат;

x, y — координаты главной точки в системе координат снимка.

3 Результаты

В рамках исследования была выполнена аэрофотосъемка с БПЛА DJI Phantom 4 Advanced, оснащенного GPS-антенной, что позволило определить координаты центров фотографирования и использовать их в качестве опорных точек. Для определения точности фотограмметрических построений были также заложены и координированы контрольные точки на местности. Маркировка точек выполнена красной краской, что обеспечивает читаемость знаков на фоне подстилающей поверхности. Аэрофотосъемка выполнялась с высот 90 и 110 м. Колебание фактических высот фотографирования не превысило 5 м. Фотограмметрическая обработка снимков выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional (разработчик — группа компаний «Геоскан», Санкт-Петербург). Результатом обработки аэрофотосъемки являются три блока снимков (рис. 1).

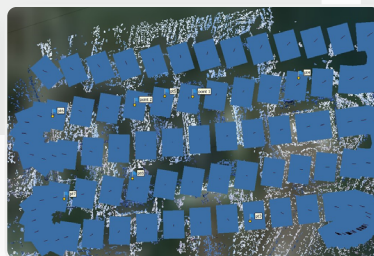
Рис. 1 Блоки, составленные из аэрофотоснимков

Fig. 1 Blocks made up of aerial photographs

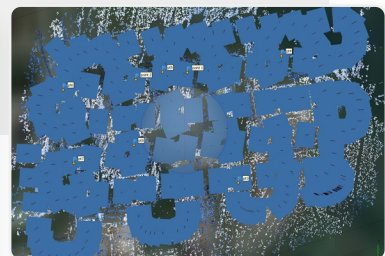
Высота 110 м /
110 metres height



Высота 90 м /
90 metres height



Высоты 90 и 110 м /
90 and 110 metres height



4 Обсуждение

Обработка представленных блоков снимков была выполнена в двух вариантах. В первом в качестве опорных точек использовались только координаты центров фотографирования, во втором — координаты одной или двух опорных точек на местности наряду с центрами фотографирования.

При построении фотограмметрических сетей с использованием только координат центров фотографирования средние квадратичные ошибки (СКО), вычисленные по расхождениям координат контрольных точек, при фотографировании с 90 м составили 3 см в плане и 15 см по высоте, с 110 м — 7 см в плане и 12 см по высоте, для блока разномасштабных снимков — 3 см в плане и 4 см по высоте.

При одновременном использовании координат центров фотографирования и опорных точек погрешности уравнивания блоков уменьшились до уровня случайных ошибок определения координат и идентификации опорных точек.

Более полные данные по оценке точности представленных вариантов построения фотограмметрической сети показаны в **табл. 1**.

Таблица 1 Погрешности уравнивания блоков

Table 1 Block alignment errors

Высота, с которой сделаны снимки в блоках, м	Количество опорных точек	СКО координат, м			
		центров фотографирования		контрольных точек	
		в плане	по высоте	в плане	по высоте
90	0	0,05	0,09	0,03	0,15
110	0	0,04	0,05	0,07	0,12
90 и 110	0	0,05	0,02	0,03	0,04
90	1	0,01	0,01	0,03	0,09
110	1	0,01	0,01	0,07	0,07
90 и 110	1	0,01	0,01	0,03	0,04
90	2	0,01	0,01	0,03	0,06
110	2	0,01	0,01	0,07	0,06
90 и 110	2	0,01	0,01	0,02	0,04

Погрешности построения блоков из снимков, снятых с одной высоты, при уравнивании по центрам фотографирования существенно грубее, чем ошибки, полученные при одновременном использовании координат центров и опорных точек. Это говорит о том, что при незначительном колебании высот фотографирования в блоках, полученных с одной высоты фотографирования (около 5 м), результаты самокалибровки снимков недостоверны.

В то же время значения погрешностей оказались существенно меньше ожидаемых ошибок, прогнозируемых на основе ранее выполненных исследований³. Это объясняется тем, что текущий эксперимент проводился в условиях равнинного рельефа и отметки контрольных точек незначительно отклоняются

³ Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. М.: Недра, 1982. 224 с.

от средней плоскости местности. Даже незначительные колебания высот фотографирования позволяют получить более точные результаты, чем в условиях пересеченной местности. На этом основании было сделано предположение о том, что по контрольным точкам с незначительными взаимными превышениями не удастся выявить реальные деформации модели местности, которые обусловлены недостоверными результатами самокалибровки снимков.

С целью выявления реальных деформаций модели по высоте был проведен следующий эксперимент. Для обеспечения необходимого перепада высот в качестве дополнительных контрольных точек были выбраны точки на крыше здания, отобразившегося на снимках всех блоков. Превышение точек составило около 15 м. Координаты точки определялись фотограмметрическим способом по блоку, обеспеченному координатами центров фотографирования и опорными точками. Обобщенные данные из отчетов представлены в **табл. 2**.

Таблица 2 Результаты уравнивания с использованием контрольных точек на крыше здания
Table 2 Results of adjustment using control points on the roof of the building

Высота, с которой сделаны снимки в блоках, м	Количество опорных точек	СКО координат контрольных точек, м	
		в плане	по высоте
90	0	0,15	0,24
110	0	0,08	0,79
90 и 110	0	0,05	0,02

Использование дополнительных контрольных точек с существенными взаимными превышениями позволяет наиболее точно оценить остаточные деформации геометрической модели местности, обусловленные погрешностями самокалибровки снимков. В блоках, построенных по снимкам, полученным с одной высоты фотографирования, наблюдаются наиболее существенные ошибки по высоте.

Ошибки уравнивания блоков при использовании разномасштабных снимков практически не зависят от количества опорных точек, что подтверждает отсутствие деформаций при построении данного блока снимков во всех вариантах.

5 Выводы

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Применение способа самокалибровки гарантированно дает положительный эффект при использовании координат центров фотографирования и достаточного количества опорных точек на местности.

2. Использование исключительно координат центров в качестве опорных точек не гарантирует получения достоверных параметров самокалибровки снимков.
3. В условиях равнинного рельефа не удастся достоверно оценить величины деформации геометрической модели местности, обусловленные погрешностями самокалибровки снимков.
4. Использование контрольных точек со значительным превышением над земной поверхностью позволяет обнаружить деформации фототриангуляционной сети по высоте в условиях равнинного рельефа.
5. Погрешности, полученные при двухъярусной съемке с применением только координат центров фотографирования, не зависят от количества опорных точек на местности.
6. Полное исключение опорных точек на местности можно обеспечить лишь при двухъярусной съемке с обязательным использованием координат центров фотографирования и контрольных точек.

Согласно проекту госстандарта⁴, для построения локальных сетей, состоящих не более чем из пяти маршрутов, каждый из которых содержит 25 снимков, необходимо использовать координаты центров фотографирования и минимум 5 опорных точек, расположенных по краям блока и в центре, поэтому, несмотря на получившийся результат, рекомендуется применять опорные точки при аэрофотосъемке. Однако, если нельзя заложить опознаки на местности, применение двухъярусной съемки является альтернативой.

БИБЛИОГРАФИЯ


1. Кадничанский С.А., Курков В.М., Курков М.В. и др. Фотограмметрическая калибровка фотокамеры для аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Геопрофи. 2019. № 6. С. 35–40.
2. Чибуничев А.Г., Курков В.М., Говоров А.В. и др. Исследование точности фототриангуляции с использованием различных методов лабораторной и полевой калибровки // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2016. № 2. С. 42–47.
3. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г., Курков В.М. и др. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=321> (дата обращения: 10.02.2019).
4. Лазарева Н.С. Калибровка неметрических малоформатных камер и их применение для решения некоторых задач фотограмметрии // Науки о Земле. 2011. № 1. С. 81–92. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://geo-science.ru/wp-content/uploads/GeoScience_2011_1-80-91.pdf (дата обращения: 29.05.2025).

⁴ Проект ГОСТ Р-2019. Работы стереофотограмметрические высокоточные. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 26 с.



5. Антипов И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 2003. 297 с.
6. Лунев А.А. Выбор оптимальных параметров калибровки цифровой камеры. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://masters.donntu.ru/2007/ggeo/sagaidak/library/book7.htm> (дата обращения: 29.05.2025).
7. Cramer M., Przybilla H.-J., Zurhorst A. UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. XLII-2/W6. P. 85–92. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017.
8. Быков Л.В., Чехлов Д.В. Особенности межевания границ земельных участков по материалам аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития: сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Омск, 26 марта 2020 г. Омск: Омский ГАУ им. П.А. Столыпина, 2020. С. 43–47.
9. Аникеева И.А., Бабашкин Н.М., Кадничанский С.А. и др. О возможности и эффективности использования беспилотных воздушных судов при выполнении кадастровых работ // Геодезия и картография. 2018. Т. 79, № 8. С. 44–52. DOI:10.22389/0016-7126-2018-938-8-44-52.
10. Быков В.Л. Полевая калибровка снимков с использованием средств спутникового позиционирования // Геодезия и картография. 2007. № 8. С. 39–43.

АВТОРЫ


Быков Леонид Васильевич

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»
(Омский ГАУ), Омск, Россия
кафедра геодезии и дистанционного зондирования, землеустроительный факультет
канд. техн. наук, доцент
 0009-0000-5670-5761

Пушак Оксана Николаевна

 on.puschak@omgau.org
ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»
(Омский ГАУ), Омск, Россия
кафедра геодезии и дистанционного зондирования, землеустроительный факультет
 0000-0002-3139-5397

Морозова Анастасия Александровна

 morozovaanasty@gmail.com
АО «Газстройпром», Санкт-Петербург, Россия

Поступила 11.06.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.

UDC 528.7

DOI:10.30533/scidata-2025-16-11



Research of the Accuracy of Two-Stage Aerial Photographing with Determination of Coordinates of Photography Centers for Creating Topographic Plans from Unmounted Survey Materials

Leonid V. Bykov¹✉, Oksana N. Pushchak¹,
Anastasia A. Morozova²

AFFILIATIONS

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

² Gazstroyprom, Saint Petersburg, Russia

✉ lv.bykov@omgau.org

CITATION

Bykov LV, Pushchak ON, Morozova AA. Research of the Accuracy of Two-Stage Aerial Photographing with Determination of Coordinates of Photography Centers for Creating Topographic Plans from Unmounted Survey Materials. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(2): 98–108. DOI:10.30533/scidata-2025-16-11.

KEYWORDS

two-stage aerial photographing, unmanned aerial vehicle, DZ materials, calibration

ABSTRACT

In modern digital photogrammetric systems, image self-calibration is performed during data processing. This process is typically performed by default. The horizontal and vertical georeferencing of images during topographic surveys must take into account the specifics

of ground-based self-calibration support. Elevation variations between control points must be greater than the possible elevations of the points being determined. If this requirement is not met, additional determination of the coordinates of the photographic centers is necessary. In flat areas with high-rise buildings, georeferencing of the coordinates of landmarks and photographic centers is required. This allows for the determination of reliable calibration parameters corresponding to the entire coordinate space of the object. In the practice of cadastral works, aerial photography is often limited to referencing the centers of photography. At best, a base station serves as a marker on the ground. When self-calibrating images in flat terrain, errors in the coordinates of points are not felt. When trying to determine the marks of high objects, such as multi-story buildings, unacceptable errors in height occur. Errors in these referencing conditions can be avoided by performing a two-tier survey with joint processing of images. The article presents the results of experimental studies of the features of two-tier surveys from heights of 110 and 90 meters. The article discusses the technologies used in creating topographic plans. A study of the self-calibration technique of images in flat terrain is carried out. Practical conclusions are made on the possibility of using the two-tier aerial photography method to create orthophotoplans.

REFERENCES

1. Kadnichanskiy SA, Kurkov VM, Kurkov MV, et al. Fotogrammetricheskaya kalibrovka fotokamery dlya aerofotos"yemki s bespilotnogo vozдушnogo sudna [Photogrammetric Camera Calibration for Aerial Photography from an Unmanned Aircraft]. *Geoprofi*. 2019;6: 35–40. (In Russian).
2. Chibunichev AG, Kurkov VM, Govorov AV, et al. Issledovaniye tochnosti fototriangulyatsii s ispol'zovaniyem razlichnykh metodov laboratornoy i polevoy kalibrovki [Investigation of Accuracy in Phototriangulation Using Different Laboratory Calibrating Methods and Field Calibrating Methods]. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2016;2: 42–47. (In Russian).
3. Mikhailov AP, Chibunichev AG, Kurkov VM, et al. *Primenenie tsifrovyykh nemetricheskikh kamer i lazernyykh skanerov dlya resheniya zadach fotogrammetrii* [Application of Digital Non-Metric Cameras and Laser Scanners for Solving Photogrammetry Problems]. Available from: <http://www.racurs.ru/?page=321> (Accessed 10 February 2019).
4. Lazareva NS. Kalibrovka nemetricheskikh maloformatnykh kamer i ikh primeneniye dlya resheniya nekotorykh zadach fotogrammetrii [Calibration of the Non-Metric Small Format Cameras for Their Use for the Decision of Some Problems Photogrammetry]. *GeoScience*. 2011;1: 81–92. (In Russian). Available from: https://geo-science.ru/wp-content/uploads/GeoScience_2011_1-80-91.pdf (Accessed 29 May 2025).
5. Antipov IT. *Matematicheskie osnovy prostranstvennoi analiticheskoi fototriangulyatsii* [Mathematical Foundations of Spatial Analytical Phototriangulation]. Moscow: Kartgeotsentr – Geodezizdat; 2003. 297 p. (In Russian).

6. Lunev AA. *Vybor optimal'nykh parametrov kalibrovki tsifrovoi kamery* [Choosing the Optimal Digital Camera Calibration Parameters]. (In Russian). Available from: <https://masters.donntu.ru/2007/ggeo/sagaidak/library/book7.htm> (Accessed 29 May 2025).
7. Cramer M, Przybilla HJ, Zurhorst A. UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017;XLII-2/W6: 85–92. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017.
8. Bykov LV, Chekhlov DV. Osobennosti mezhevaniya granits zemel'nykh uchastkov po materialam aerofotos"emki s bespilotnogo letatel'nogo apparata [Features of Land Surveying of Land Areas on Materials of Aerial Photography from UAV]. *Geodesy, Land Management and Cadastre: Problems and Prospects of Development: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Omsk, March 26, 2020*. Omsk: Omsk SAU named after P.A. Stolypin; 2020: 43–47. (In Russian).
9. Anikeyeva IA, Babashkin NM, Kadnichanskiy SA, et al. O vozmozhnosti i effektivnosti ispol'zovaniya bespilotnykh vozdushnykh sudov pri vypolnenii kadastrykh rabot [The Possibility and Effectiveness of Using Drones when Performing Cadastral Works]. *Geodesy and Cartography*. 2018;79(8): 44–52. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2018-938-8-44-52.
10. Bykov VL. Polevaya kalibrovka snimkov s ispol'zovaniem sredstv sputnikovogo pozitsionirovaniya [Field Adjustment of Images Using Satellite]. *Geodesy and Cartography*. 2007;8: 39–43. (In Russian).


AUTHORS

Leonid V. Bykov

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

Oksana N. Pushchak

 on.puschak@omgau.org

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

 0000-0002-3139-5397

Anastasia A. Morozova

 morozovaanasty@gmail.com

“Gazstroyprom”, Saint Petersburg, Russia

Submitted: June 11, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.