

УДК (528.73:528.71)+004.93

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-62-71>

## Методика анализа точности фототриангуляции по данным автоматической обработки аэрофотоснимков на основе алгоритмов машинного зрения

С. Г. Могильный<sup>1</sup>, А. А. Шоломицкий<sup>2✉</sup>, М. С. Тутанова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,  
г. Караганда, Республика Казахстан

e-mail: sholomitskij@mail.ru

**Аннотация.** В статье приведена методика, которая позволяет выполнить строгую оценку точности фототриангуляции, полученную при обработке снимков алгоритмами машинного зрения. Выявлено, что в отличие от классической фотограмметрии с небольшим количеством сгруппированных связующих точек, цифровая фотограмметрия с распознаванием точек алгоритмами машинного зрения дает большое количество равномерно расположенных точек. Исследование показало, что более 40 % точек модели составляют точки, распознанные только на двух снимках. Имеется обратная зависимость между числом изображений и средними квадратическими ошибками координат точек. Средняя квадратическая ошибка определения высоты  $m_z$  более чем в два раза превысила ошибки плановых координат. Выявлено, что для достижения приемлемой для маркшейдерских и геодезических съемок точности определения координат в 0,05 м требуется идентификация точки не менее чем на четырех изображениях для вычисления плановых координат и не менее чем на восьми – для определения ее высотной отметки. Приведены практические рекомендации для планирования и выполнения аэрофотосъемки беспилотными авиационными системами. Для аэрофотосъемки бортов карьеров и отвалов рекомендовано прокладывать дополнительные маршруты с наклоном камеры. Эти рекомендации повысят число изображений точек и их распознавание, что приведет к повышению точности моделей открытых разработок.

**Ключевые слова:** беспилотная авиационная система, аэрофотосъемка, цифровой снимок, фототриангуляция, машинное зрение, точность, координаты, модель, алгоритм

### Для цитирования:

Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Тутанова М. С. Методика анализа точности фототриангуляции по данным автоматической обработки аэрофотоснимков на основе алгоритмов машинного зрения. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 1. С. 62–71. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-62-71>

## Methodology for evaluating phototriangulation accuracy via automated aerial imagery processing employing machine vision algorithms

S. G. Mogilny<sup>1</sup>, A. A. Sholomitskii<sup>2✉</sup>, M. S. Tutanova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,  
Karaganda, Republic of Kazakhstan

e-mail: sholomitskij@mail.ru

**Abstract.** The article introduces a methodology for the rigorous assessment of phototriangulation accuracy obtained through machine vision-based processing of aerial imagery. Findings indicate that, in contrast to classical photogrammetry relying on sparse clusters of tie points, digital approaches leveraging machine vision produce abundant, uniformly distributed points. Notably, over 40% of model points are detected on only two images. An inverse correlation is observed between imaging multiplicity and root-mean-square errors (RMSE) of coordinates, with height RMSE ( $m_z$ ) exceeding planar errors by more than twofold. Achieving sub-0.05 m accuracies suitable for mine surveying and geodesy necessitates at least four images per point for horizontal coordinates and eight for elevations. Practical guidelines are offered for unmanned aerial system photogrammetry planning, including oblique-angle supplementary routes for pit walls and dumps to boost point multiplicity, recognition, and open-pit model fidelity.

**Keywords:** unmanned aircraft system, aerial photography, digital image, phototriangulation, machine vision, accuracy, coordinates, model, algorithm

**For citation:**

Mogilny S. G., Sholomitskii A. A., Tutanova M. S. (2026). Methodology for evaluating phototriangulation accuracy via automated aerial imagery processing employing machine vision algorithms. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 1. pp. 62–71. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-62-71>

**Введение**

Прогресс беспилотной аэрофотосъемки стал следствием развития беспилотных авиационных систем (БАС). Появление широкого спектра БАС, оснащенных бюджетными камерами с простой оптикой и небольшими матрицами, привело к изменению подходов как к выполнению аэрофотосъемки, так и ее обработки. Высота фотографирования для открытых горных работ (ОГР) снизилась и составляет 150–250 м, перекрытие 80–90 %, число снимков выросло многократно – обрабатывать тысячи снимков по традиционной технологии даже на цифровых фотограмметрических станциях стало неэффективно. Поток цифровой фотограмметрической информации потребовал новых полностью автоматических алгоритмов обработки. Так появился алгоритм SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), предназначенный для обнаружения и описания локальных особенностей изображений, т. е. поиска идентичных точек на фотоизображениях [1, 2]; алгоритм требует больших вычислительных ресурсов. Потом появляется более быстрый алгоритм SURF (Speeded-Up Robust Features), который был представлен в 2006 г. группой исследователей (Herbert Bay, Tinne Tuytelaars и Luc Van Gool) как ускоренная в 3–5 раз альтернатива

SIFT [3, 4]. Развитие методов компьютерного анализа и распознавания характерных точек привело к появлению алгоритма ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) [5], который был почти в 100 раз быстрее SIFT [6], но менее устойчив к шуму и изменению освещения. Затем в 2012–2013 гг. разрабатывается алгоритм AKAZE – это улучшенная версия алгоритма KAZE для эффективного обнаружения ключевых точек и построения дескрипторов в нелинейных масштабных пространствах (на основе диффузионных фильтров). Главное преимущество – сочетание высокой точности и скорости, особенно на изображениях с искажениями (например, размытиями или неоднородным освещением) [7, 8], – достигается использованием анизотропной диффузии вместо гауссовых размытий, как в SIFT/SURF, и бинарных дескрипторов.

Развитие автоматических методов распознавания привело к возникновению SuperPoint – нейросетевого метода для обнаружения ключевых точек и построения дескрипторов, который сочетает преимущества классических подходов (SIFT, ORB) с возможностями глубокого обучения. Алгоритм обучается самоконтролируемо на синтетических данных, что позволяет достичь высокой точности распознавания точек на реальных изображениях [9]. Существуют и другие алго-

ритмы, которые позволяют более эффективно выполнять те или иные операции автоматического распознавания точек [10, 11].

В настоящее время алгоритмы SIFT и SURF используются в программах для картографирования, например, Agisoft Metashape [12] и Pix4D [13], получивших широкое распространение. Это связано с тем, что основным средством получения аэрофотоснимков являются беспилотные авиационные системы и обработать каким-то другим методом большое количество снимков в ограниченное время невозможно.

Еще одной особенностью автоматической обработки снимков, выполненной БАС, является применение ее конечными пользователями, которые в общем случае не являются специалистами в области фотограмметрии. Поэтому ПО для автоматической обработки имеет специфический упрощенный интерфейс, который де-факто стал стандартом и рассчитан на минимальное знание фотограмметрии [12, 13]. Отдельно нужно рассмотреть, как оцениваются результаты автоматической обработки снимков, полученных с БАС.

В общем случае качество съемки и ее обработки можно оценить только по остаточным отклонениям на опорных и контрольных точках.

По завершении вычислений программой автоматической обработки снимков формируется отчет о характеристиках, в том числе и о точности, а именно:

- СКО (средние квадратические ошибки) центров фотографирования снимков по результатам уравнивания;
- остаточные величины непересечения соответственных лучей на точках фотограмметрической модели (поперечный параллакс);
- отклонение вычисленных координат на опорных и контрольных точках модели.

Как правило, эти показатели очень оптимистические, дающие некоторую среднестатистическую характеристику результатов. Первый показатель характеризуется высокой точностью, потому что он вычисляется по нескольким тысячам точек на каждом снимке. В классической фототриангуляции число измеренных точек на снимках исчисляется в редких случаях сотнями точек.

Средняя величина остаточного поперечного параллакса, как правило, находится

в пределах одного пиксела. Для уменьшения параллаксов используется метод самокалибровки снимков [14–18].

В маркшейдерии, геодезии и в земельном кадастре для оценки точности результатов с использованием координат конкретных точек или контуров усредненных показателей точности недостаточно. Для решения же реальных производственных задач необходимо иметь более информативные сведения касательно точности обработки конкретного фотограмметрического проекта, что и является целью настоящей статьи.

Как показывает опыт авторов, фотограмметрическая модель из лучей снимков очень пластичная и в процессе итераций вычислений обработки аэрофотосъемки зачастую способна вписаться в допустимые величины параллакса при заметных отклонениях снимков от центральной проекции. Когда число точек, измеренных на снимках, очень большое, легко скрыть наличие грубых ошибок. Остаточный параллакс – важный показатель точности фототриангуляции, но недостаточный для применения в маркшейдерских и геодезических проектах.

Отклонения координат на контрольных и опорных точках являются объективными показателями точности сети, но количество их невелико и они расположены локально. Все остальное поле съемки не имеет надежных характеристик точности. Следует заметить, что контрольные точки опознаются наблюдателем вручную, что значительно повышает точность их опознавания и измерения.

Информативной характеристикой точности сети фототриангуляции являются средние квадратические ошибки всех точек модели, вычисленные по результатам уравнивания методом наименьших квадратов. Однако в популярных программах фотограмметрической обработки снимков эта характеристика точности ограниченно доступна рядовому пользователю технологии.

Точность координат точек ОГР при аэрофотосъемке с БАС определяется показателями точности сети фототриангуляции [19–23].

Исследованию статистических параметров автоматической обработки аэрофотоснимков методами машинного зрения и ана-

лизу случайных ошибок определения координат точек ОГР посвящается эта статья.

### Объект исследования

В качестве объекта исследования выбран карьер (рис. 1, а) площадью около 70 га, аэрофотосъемка проводилась в разные даты на высоте 120 м, всего получено 1075–1270

снимков. Перепад высот в пределах карьера не превышает 50 м.

Съемка велась параллельными маршрутами, с продольным и поперечным перекрытиями около 80 % (рис. 1, б). Положение центров фотографирования определялось по ГНСС-измерениям в режиме постобработки с точностью 15–20 мм.

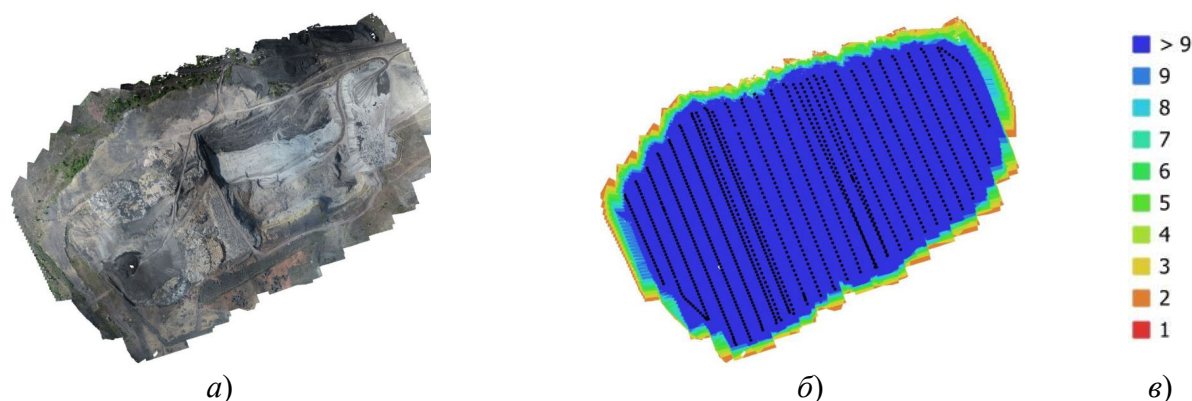


Рис. 1. Аэрофотосъемка карьера:

а) ортофотоплан карьера; б) центры и перекрытия снимков; в) легенда числа перекрытий снимков

Для исследований использовалась производственная съемка карьера камерой FC6310 (8,80 мм). Сеть фототриангуляции имела следующие параметры:

- количество снимков – 1 075 шт.;
- опорных планово-высотных пунктов – 14 шт.;
- измеренных навигационных координат центров съемки – 1 075 шт.;
- количество измеренных изображений точек – 3 900 тыс. шт.;
- количество точек сгущения на местности – 508 512 шт.;
- размер матрицы сенсора – 5 472×3 648 пкс.;
- размер пикселя – 2,35 × 2,35 мкм.;
- фокусное расстояние объектива – 8,6121 мм;
- средняя высота съемки – 120 м.

### Статистические свойства геометрических погрешностей снимков

В классической фотограмметрии были детально изучены закономерности накопления погрешностей при различных технологиях

построения и уравнивания фотограмметрических сетей [19, 24]. Снимки в блоках располагались равномерно, связующие точки между ними измерялись только в определенных местах снимков, число измеряемых точек было ограниченное – от десятков до сотни точек. На рис. 2 показана гистограмма распределения точек по осям координат снимка в блоке из 200 снимков, полученных аэрокамерой формата 23×23 см. Видно, что измеряемые точки выбирались главным образом вблизи главной точки и по краям рабочей области снимков.

В результате обработки получалась пространственная структура, которая при ошибках в вычислениях координат одной или группы точек существенно изменялась по форме. При таких ошибках сеть плохо вписывалась в жесткие элементы сети, заметно нарушались связи между соответственными точками перекрывающихся снимков.

Использование инструментов компьютерного зрения позволяет получить на каждом снимке тысячи соответственных точек, поэтому пространственная структура сети полу-

чается очень пластичной и оценка точности сети по невязкам непересечения лучей получается с существенно завышенной точностью измерений.

Большое перекрытие снимков приводит к тому, что точка местности определяется пересечением лучей, расположенных на снимках в равновозможных случайных местах снимков. Гистограммы (рис. 3) получены из анализа производственного блока фототриангуляции из 1 075 снимков с БПЛА, в котором измерено более 4 миллионов точек.

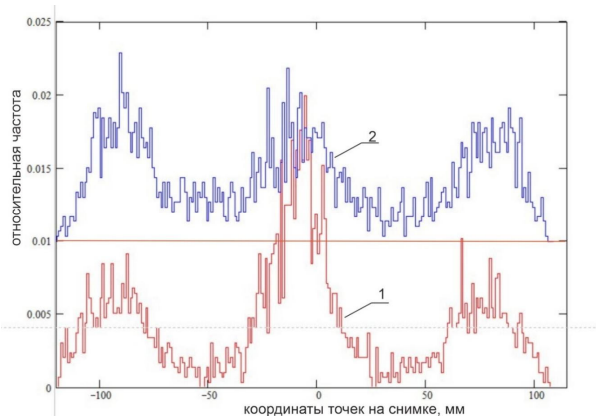


Рис. 2. Гистограмма расположения точек на снимке в блоке фототриангуляции из 200 снимков:

1 – по оси x; 2 – по оси y

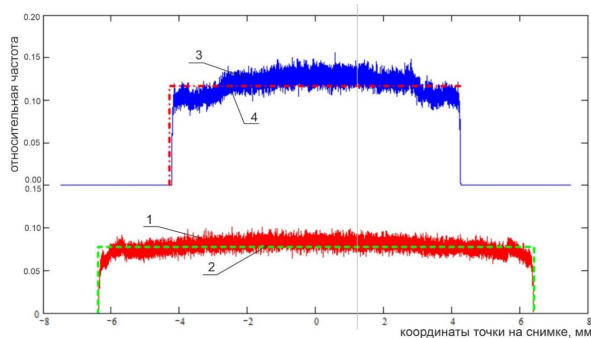


Рис. 3. Гистограммы расположения точек на снимках с БАС:

- 1 – измеренные координаты по оси x;
- 2 – равномерное распределение;
- 3 – измеренные координаты по оси y;
- 4 – равномерное распределение

Поэтому в общем случае можно рассматривать погрешности координат, определяю-

щих точку местности, случайными величинами, имеющими закон распределения вероятностей, зависящий от модели камеры.

### Методика обработки и анализа

Пользователи коммерческих программ обычно не имеют доступа к внутренним вычислительным процессам уравнивания сети, а исследований авторов этого в научных публикациях найти не удалось.

В представленных в статье исследованиях использовалось ПО BlockMSG, разработанное профессором С. Г. Могильным и имеющее многолетний опыт производственного применения во многих странах. Интерфейс программы позволяет осуществить полный доступ к алгоритмам и параметрам уравнивания фототриангуляции [25, 26].

Координаты изображений точек на снимках получены модулями компьютерного зрения ПО Agisoft, все дальнейшие вычисления выполнялись в ПО BlockMSG. Можно считать, что математическая основа обоих комплексов одинакова, но практическая программная реализация отличается: в Agisoft в основном использован Python, а в BlockMSG – Object Pascal (Delphi).

Для анализа выбран блок фототриангуляции из 1075 снимков БПЛА. Вначале аэрофотоснимки обрабатывались в ПО Agisoft Metashape (рис. 4). Входящей информацией являются аэрофотоснимки и геодезические данные: координаты опорных точек и центров фотографирования.

В результате автоматического распознавания точек на снимках по алгоритму SIFT определились фотограмметрические координаты точек (соответствия), которые вместе с параметрами уравнивания являются входными данными в для обработки в программе BlockMSG.

В протоколе вычислений BlockMSG содержатся такие показатели:

- средние квадратические ошибки определения координат каждой точки фототриангуляции;
- коэффициент увеличения случайных ошибок в элементах ориентирования снимков;
- уровень влияния некомпенсируемых систематических ошибок снимков;
- границы изменения поправок конкретного набора корректирующих параметров;
- показатель сингулярности редуцированной матрицы.

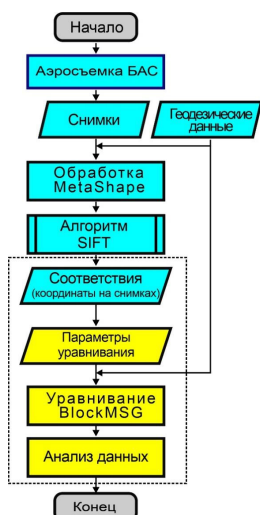


Рис. 4. Блок-схема методики обработки и анализа

В дальнейшем анализе будут использоваться средние квадратические ошибки определения координат точек и число изображений точки на снимках.

#### Анализ средних квадратических ошибок точек

В протоколе уравнивательных вычислений программы BlockMSG для каждой точки фототриангуляции приводятся СКО координат и число изображений, на которых была опознана эта точка. Если на площадь карьера наложить поверхность, отображающую число снимков, по которым определялись координаты точки, получим поверхность, показанную на рис. 5.

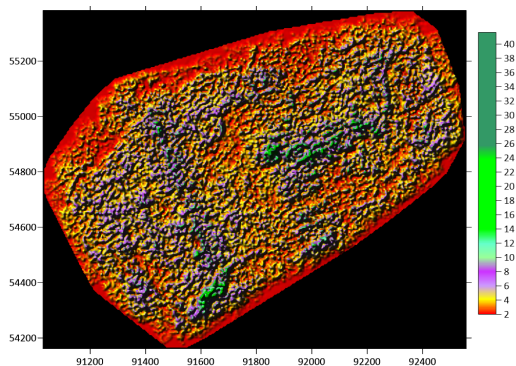


Рис. 5. Распределение числа изображений по полю съемки

Как видно из рис. 5, это распределение сильно отличается от «оптимистической»

картины на рис. 1, б, которая показывает, что все точки центральной части, кроме краевой, должны иметь по 9 изображений.

Если построить гистограммы распределения точек по числу изображений (рис. 6, а), то видно, что 42 % точек распознаны всего на двух снимках, еще 22 % точек имеется на трех изображениях.

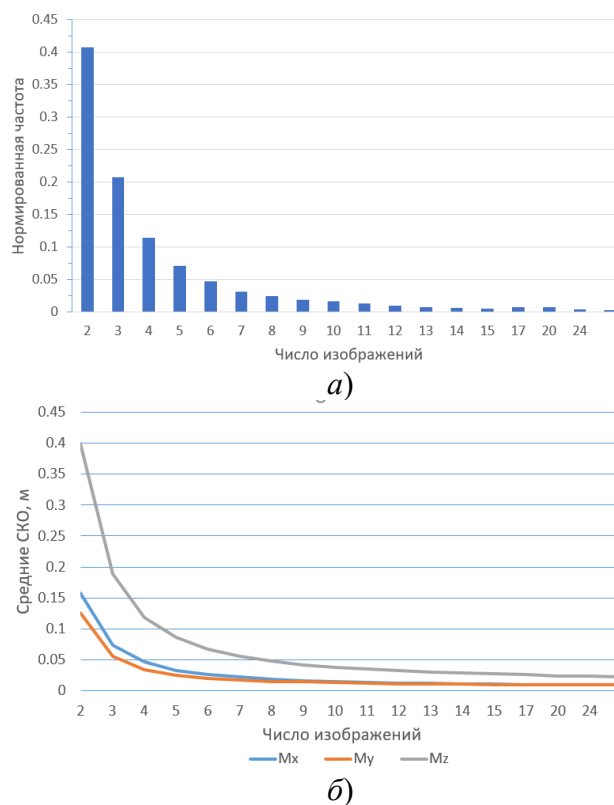


Рис. 6 Зависимость СКО от числа изображений точки:

а) распределение точек по числу изображений; б) зависимость СКО от числа изображений

Если рассмотреть зависимость СКО координат точки от числа изображений этой точки на снимках, получим гистограмму (рис. 6, б). На графиках рис. 6, б видно, что основной вклад в погрешность определения положения точки вносит  $Mz$ , а величины СКО  $Mx$  и  $My$  значительно меньше.

Для съемки открытых разработок может быть приемлемой СКО определения координат в 5 см. Для определения с такими СКО  $Mx$  и  $My$  требуется идентификация точки не менее чем на четырех изображениях для вычисления плановых координат и не менее чем на

восьми – для определения ее высотной отметки. На рис. 7 показано распределение  $Mz$  по полю съемки, которое коррелирует с числом изображений (см. рис. 5) и рельефом (см. рис. 1, а). Большие величины  $Mz > 0,3$  м (области красного цвета) расположены в краевой части съемки, где число изображений точки минимальное, и в центральной части, где имеются наклонные поверхности откосов уступов и съездов. На остальной территории средняя величина  $Mz \approx 0,2$  м. СКО  $Mx$  и  $My$  имеют такую же закономерность расположения на краевой части и в центре 0,2 м, на остальной территории 0,05–0,1 м.

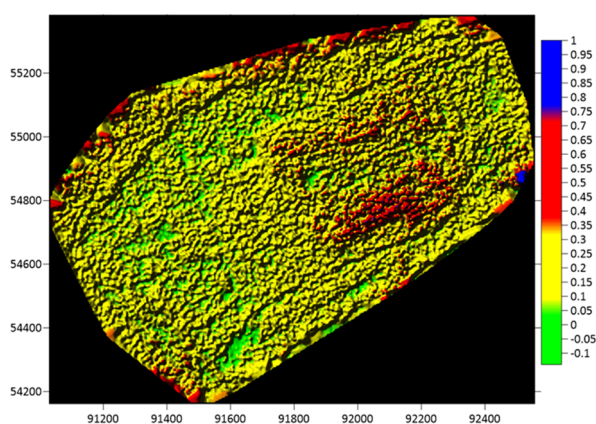


Рис. 7. Распределение СКО  $Mz$  по полю съемки

### Заключение

На основании выполненного анализа можно утверждать, что, в отличие от классической фотограмметрии, где число связующих точек небольшое и носит сгруппированный характер, цифровая фотограмметрия

с автоматическим распознаванием огромного количества точек, которые имеют равномерное распределение по площади снимка, повышает оценку точности обработки аэрофотоснимков методами машинного зрения.

Предложенная методика анализа позволяет не только оценить влияние случайных ошибок при машинных методах распознавания точек, но и позволяет сделать практические выводы для повышения точности модели ОГР:

- проектировать маршруты таким образом, чтобы вся территория съемки попадала в зону 9 перекрытий (см. рис. 1, б);

- для увеличения числа изображений точки маршруты с 80-процентным перекрытием следует прокладывать во взаимно перпендикулярных направлениях, что увеличит общее количество снимков и время обработки, однако позволит повысить точность определения координат точек модели;

- с целью улучшения распознавания точек на снимках откосов уступов и отвалов ОГР желательно выполнять дополнительную перспективную аэросъемку так, чтобы оптическая ось камеры была примерно перпендикулярна наклону борта карьера.

Особенностью объектов открытых разработок является их стационарность, что требует с высокой периодичностью выполнять аэрофотосъемку с БАС для актуализации картографических материалов ОГР и определения объемов выполненных работ. Анализ СКО определения координат точек для всей съемки рекомендуется сделать один раз для объекта, и по материалам анализа скорректировать параметры последующих аэрофотосъемок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lowe D. G. Object recognition from local scale-invariant features. International Conference on Computer Vision (ICCV). 1999. URL: <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf>.
2. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60, № 2. P. 91–110. DOI 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
3. Chibunichev G., Kurkov V. M., Smirnov A. V., Govorov A. V., Mikhalin V. A. Investigation of phototriangulation accuracy with using of various techniques laboratory and field calibration. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. T. XLI-B1. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.
4. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features. European Conference on Computer Vision (ECCV). 2006. DOI 10.1007/11744023\_32.

5. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features. *Computer Vision and Image Understanding*. 2008. Vol. 110, № 3. P. 346–359. DOI 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
6. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. *International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2011. DOI 10.1109/ICCV.2011.6126544.
7. Juan D., Gwon Y. A Comparison of SIFT, SURF, and ORB. 2016. DOI 10.1109/ICIT.2016.7474991.
8. Alcantarilla P. F., Nuevo J., Bartoli A. Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces. *British Machine Vision Conference (BMVC)*. 2013. DOI 10.5244/C.27.13.
9. DeTone D., Malisiewicz T., Rabinovich A. SuperPoint: Self-Supervised Interest Point Detection and Description. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2018. DOI 10.48550/arXiv.1712.07629.
10. Revaud J., Weinzaepfel P., De Souza C., Pion N., Csurka G., Cabon Y., Humenberger M. R2D2: Repeatable and Reliable Detector and Descriptor. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019. DOI 10.48550/arXiv.1906.06195.
11. Sun J., Shen Z., Wang Y., Bao H., Zhou X. LoFTR: Detector-Free Local Feature Matching with Transformers. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2021. DOI 10.48550/arXiv.2104.00680.
12. Agisoft Metashape User Manual. Standard Edition. Version 1.8 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.agisoft.com/pdf/metashape\\_1\\_8\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_8_en.pdf).
13. Pix4D Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360023629191>.
14. Кадничевский С. А., Курков М. В., Курков В. М., Чибуничев А. Г. Фотограмметрическая калибровка фотокамеры для аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна. *Геопрофи*. 2019. № 6. С. 35–40.
15. Suzuki T., Takahashi Y., Amano Y. Precise UAV Position and Attitude Estimation by Multiple GNSS Receivers for 3D Mapping [Электронный ресурс]. Waseda University, Japan. URL: [http://taroz.net/paper/IONGNSS2016\\_UAV.pdf](http://taroz.net/paper/IONGNSS2016_UAV.pdf).
16. Küng O., Strecha C., Beyeler A., Zufferey J.-C., Floreano D., Fua P., Gervais F. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2011. T. XXXVIII-1/C22. P. 125–130. DOI 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-125-2011.
17. Ginia R., Pagliari D., Passoni D., Pinto L., Sona G., Dosso P. UAV photogrammetry: block triangulation comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013. Vol. XL-1/W2. UAV-g2013, 4–6 September 2013, Rostock, Germany.
18. Ackermann F. Digital image correlation – performance and potential application in photogrammetry. *Photogrammetric Record*. 2006. Vol. 11, № 64. P. 429–439. DOI 10.1111/j.1477-9730.1984.tb00505.x.
19. Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2011. T. XXXVIII-1/C22. ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14–16 September 2011, Zurich, Switzerland.
20. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVIII-1/C22: UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.
21. James M. R., Robson S. Mitigating Systematic Error in Topographic Models Derived from UAV and Ground-Based Image Networks. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2014. Vol. 39, № 10. DOI 10.1002/esp.3609.
22. Sanz-Ablanedo E., Chandler J. H., Rodríguez-Pérez J. R., Ordóñez C. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sens*. 2018. Vol. 10. 1606. DOI 10.3390/rs10101606.
23. Mogilny S. G. Programmauswahl der zusätzlichen Parametr bei der Bündelblockausgleichung. *Bildmessung und Luftbildwesen*. 1981. Vol. 49. P. 181–190.

24. Сайт ООО «Аналитика» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vingeo.com/Rus/index.html>. Дата обращения: 25.06.2025.
25. Сайт ДонНТУ [Электронный ресурс]. URL: <http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/13801/1/Mogilnij2.pdf>. Дата обращения: 25.06.2025.
26. Сайт А. А. Шоломицкого [Электронный ресурс]. URL: <https://sholomitskij.wixsite.com/sholomitskij/kalibrovka-cifrovyh-kamer>. Дата обращения: 25.06.2025.

## REFERENCES

1. Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. *International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Retrieved from <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf> (accessed: 11.08.2025).
2. Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91–110. DOI 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
3. Chibunichev, G., Kurkov, V. M., Smirnov, A. V., Govorov, A. V., Mikhailin, V. A. (2016). Investigation of phototriangulation accuracy using various techniques of laboratory and field calibration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B1, XXIII ISPRS Congress*, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.
4. Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2006). SURF: Speeded Up Robust Features. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. DOI 10.1007/11744023\_32.
5. Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2008). SURF: Speeded Up Robust Features. *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3), 346–359. DOI 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
6. Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G. (2011). ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. *International Conference on Computer Vision (ICCV)*. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>.
7. Juan, D., Gwon, Y. (2016). A Comparison of SIFT, SURF, and ORB. DOI 10.1109/ICIT.2016.7474991.
8. Alcantarilla, P. F., Nuevo, J., Bartoli, A. (2013). Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces. *British Machine Vision Conference (BMVC)*. <https://doi.org/10.5244/C.27.13>.
9. DeTone, D., Malisiewicz, T., Rabinovich, A. (2018). SuperPoint: Self-Supervised Interest Point Detection and Description. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. DOI 10.48550/arXiv.1712.07629.
10. Revaud, J., Weinzaepfel, P., De Souza, C., Pion, N., Csurka, G., Cabon, Y., Humenberger, M. (2019). R2D2: Repeatable and Reliable Detector and Descriptor. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. DOI 10.48550/arXiv.1906.06195.
11. Sun, J., Shen, Z., Wang, Y., Bao, H., Zhou, X. (2021). LoFTR: Detector-Free Local Feature Matching with Transformers. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. DOI 10.48550/arXiv.2104.00680.
12. Agisoft Metashape User Manual. Standard Edition, Version 1.8. [Electronic resource]. Retrieved from [https://www.agisoft.com/pdf/metashape\\_1\\_8\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_8_en.pdf) (accessed: 11.08.2025).
13. Pix4D Documentation. [Electronic resource]. Retrieved from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360023629191> (accessed: 11.08.2025).
14. Kadnichevsky, S. A., Kurkov, M. V., Kurkov, V. M., Chibunichev, A. G. (2019). Photogrammetric calibration of a camera for UAV aerial photography. *Geoprofi [Geoprofi]*, No. 6, 35–40.
15. Suzuki, T., Takahashi, Y., Amano, Y. (2016). Precise UAV Position and Attitude Estimation by Multiple GNSS Receivers for 3D Mapping. from [http://taroz.net/paper/IONGNSS2016\\_UAV.pdf](http://taroz.net/paper/IONGNSS2016_UAV.pdf) (accessed: 11.08.2025).
16. Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J.-C., Floreano, D., Fua, P., Gervais, F. (2011). The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *International*

*Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22, 125–130. DOI 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-125-2011.

17. Ginia, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., Dosso, P. (2013). UAV photogrammetry: block triangulation comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, UAV-g2013, 4–6 September 2013, Rostock, Germany.

18. Ackermann, F. (2006). Digital image correlation – performance and potential application in photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 11(64), 429–439. DOI 10.1111/j.1477-9730.1984.tb00505.x.

19. Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22, ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14–16 September 2011, Zurich, Switzerland.

20. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-1/C22: UAV-g 2011, *Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*, Zurich, Switzerland.

21. James, M. R., Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10). DOI 10.1002/esp.3609.

22. Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing*, 10, Article 1606. DOI 10.3390/rs10101606.

23. Mogilny, S. G. (1981). Program selection of additional parameters in strip adjustment. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 49, 181–190.

24. Analytical LLC website. Retrieved from <https://www.vingeo.com/Rus/index.html> (accessed: 25.06.2025).

25. DonNTU website. Retrieved from <http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/13801/1/Mogilnij2.pdf> (accessed: 25.06.2025).

26. Website of Sholomitskii A. A. Retrieved from <https://sholomitskij.wixsite.com/sholomitskij/kalibrovka-cifrovyyh-kamer> (accessed: 25.06.2025).

### Об авторах

*Сергей Георгиевич Могильный* – доктор технических наук, профессор кафедры геоинформатики, геодезии и землеустройства.

*Андрей Аркадьевич Шоломицкий* – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

*Мируэрт Серикпаевна Тутанова* – старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии.

### Authors details

*Sergey G. Mogilny* – D. Sc., Professor of the Department of Geoinformatics, Geodesy and Land Management.

*Andrei A. Sholomitskii* – D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

*Miruert S. Tutanova* – Senior Lecturer at the Department of Surveying and Geodesy.

Получено / Received 30.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.10.2025

Принята к публикации / Accepted 11.11.2025