

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ЛАБОРАТОРНОЙ И ПОЛЕВОЙ КАЛИБРОВКИ

© 2016 А.Г. Чибуничев<sup>1</sup>, В.М. Курков<sup>1</sup>, А.В. Говоров<sup>1</sup>, А.В. Смирнов<sup>1</sup>, В.А. Михалин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии

<sup>2</sup>ООО «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург

*mik-vad@mail.ru, fot@miigaik.ru*

**Аннотация.** В данной статье описаны исследования точности фототриангуляции, с использованием различных методов калибровки камер, как лабораторной так и полевой. В качестве экспериментальной площадки использовался Заокский испытательный полигон МИИГАиК, обеспеченный достаточно плотной сетью опорных точек для выполнения полевой калибровки камер и пространственный тест-объект кафедры фотограмметрии для выполнения лабораторной калибровки. В качестве программного обеспечения использовались цифровые фотограмметрические станции PHOTOMOD и PhotoScan, а также специальное ПО кафедры фотограмметрии для лабораторной калибровки. В статье приведены результаты исследований, сделаны выводы и даются практические рекомендации.

**Ключевые слова:** лабораторная калибровка, полевая калибровка, программная самокалибровка, беспилотные летательные аппараты, бытовые камеры

## INVESTIGATION OF ACCURACY IN PHOTOTRIANGULATION USING DIFFERENT LABORATORY CALIBRATING METHODS AND FIELD CALIBRATING METHODS

© 2016 А.Г. Чибуничев<sup>1</sup>, В.М. Курков<sup>1</sup>, А.В. Говоров<sup>1</sup>, А.В. Смирнов<sup>1</sup>, В.А. Михалин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии

<sup>2</sup>ООО «Специальный Технологический Центр», Санкт-Петербург

*mik-vad@mail.ru, fot@miigaik.ru*

**Abstract.** Nowadays, aerial surveying using aerial systems based on unmanned aerial vehicles (UAVs) becomes more popular. UAVs physically can not carry professional aerocameras. Consumer digital cameras are used instead. Such cameras usually have rolling, lamellar or global shutter. Quite often manufacturers and users of such aerial systems do not use camera calibration. In this case self-calibration techniques are used. However such approach is not confirmed by extensive theoretical and practical research. In this paper we compare results of phototriangulation based on laboratory and test-field or self-calibration. For investigations we use Zaoksky test area as an experimental field provided dense network of target and natural control points. Racurs PHOTOMOD and Agisoft PhotoScan software have been used in evaluation. The results of investigations, conclusions and practical recommendations are presented in this article.

**Keywords:** laboratory calibration, test-field calibration, self-calibration, unmanned aerial vehicles (UAVs), consumer cameras

В последнее время широкое распространение приобретает технология выполнения аэрофотосъемки с использованием аэрофотосъемочных комплексов на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с различными цифровыми камерами на борту. Это могут быть «бытовые» камеры со шторно-целевыми затворами, профессиональные — с ламельными затворами и аппараты с центральным затвором. Среди производителей и пользователей таких аэрофотосъемочных систем зачастую бытует мнение, что выполнять лабораторную калибровку не следует, поскольку алгоритмы современных цифровых фотограмметрических систем (ЦФС) имеют возможность выполнения самокалибровки в

процессе построения и уравнивания фототриангуляции. Однако всесторонних исследований, теоретических и практических, по этому направлению не выполнялось.

На кафедре фотограмметрии МИИГАиК уже много лет проводятся исследования различных методов калибровки камер. Ниже приведены в качестве примера результаты исследований различных методов калибровки для камеры Phase One IXU 150, установленной на БПЛА Орлан-10. Сравнивались результаты лабораторной и полевой калибровок.

Для лабораторной калибровки использовался пространственный тест-объект и специализированное программное обеспечение,

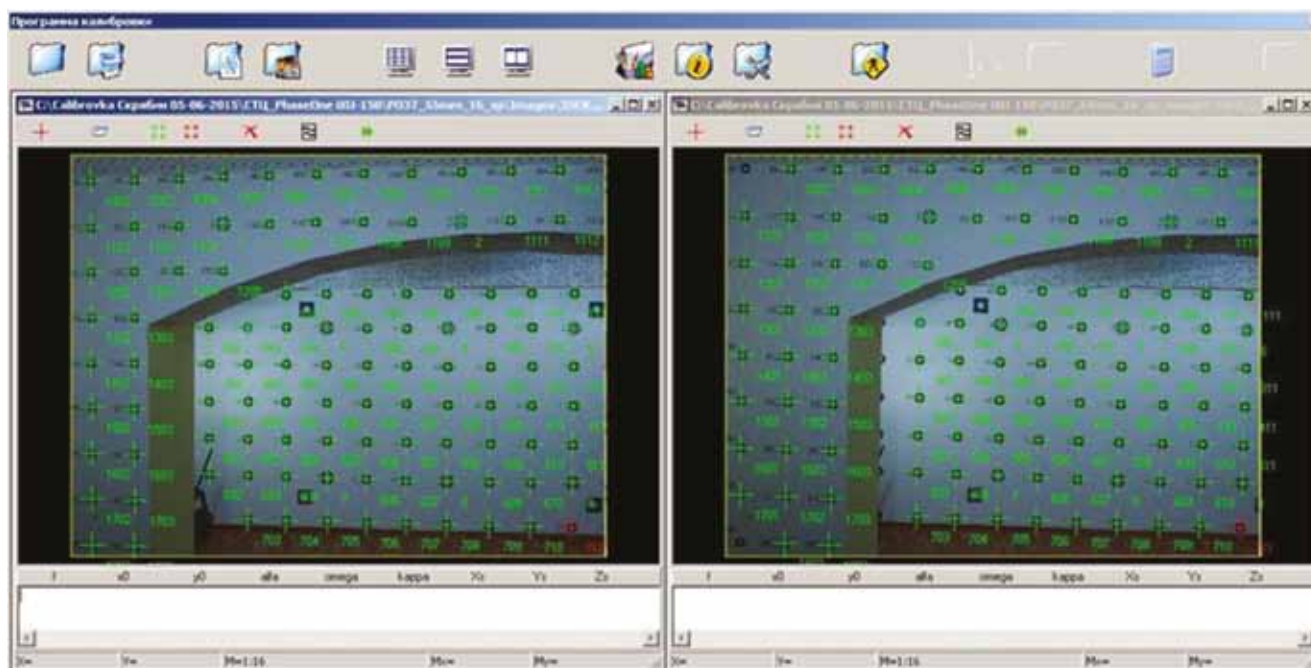


Рис. 1. Пространственный тест-объект для лабораторной калибровки камер

разработанное на кафедре фотограмметрии МИИГАиК (рис. 1).

Для проведения полевой калибровки использовался Заокский геополигон МИИГАиК и цифровые фотограмметрические системы PHOTOMOD и PhotoScan. На полигоне имеется более 100 маркированных опорных точек и достаточный перепад высот для выполнения калибровки камер (рис. 2).

PHOTOMOD — универсальная программа, использующая классические алгоритмы обработки аэрофотосъемки. Для компенсации дисторсии объектива здесь применяется два уравнения. Первое уравнение описывает физическую дисторсию объектива, используя классическое уравнение Брауна – Конрада:

$$\begin{aligned}x_{corr} &= x - k_1 x r^2 - k_2 x r^4 - k_3 x r^6 - P_1 (2x^2 + r^2) - 2P_2 xy - b_1 x - b_2 y; \\y_{corr} &= y - k_1 y r^2 - k_2 y r^4 - k_3 y r^6 - P_2 (2y^2 + r^2) - 2P_1 xy - a_1 x - a_2 y; \\r^2 &= x^2 + y^2,\end{aligned}$$

где  $x_{corr}$ ,  $y_{corr}$  — координаты точек снимка, исправленные за дисторсию;  $x$ ,  $y$  — координаты точек на исходном снимке;  $r$  — длина радиус-вектора;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  — коэффициенты радиальной дисторсии;  $P_1$ ,  $P_2$  — коэффициенты тангенциальной дисторсии;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  — коэффициенты растяжения и сжатия снимка.

Такая же формула используется при классической лабораторной калибровке камер на кафедре фотограмметрии МИИГАиК.

Второе уравнение — смешанное, суть его в добавлении к основной физической формуле до-



Рис. 2. Заокский геополигон МИИГАиК

полнительных коэффициентов, описывающих остаточные систематические погрешности аэрофотоснимков:

$$\begin{aligned}x_{corr} &= x - k_1 x r^2 - k_2 x r^4 - k_3 x r^6 - P_1 (2x^2 + r^2) - 2P_2 xy - a_1 x - a_2 y - a_3 x^2 - a_4 xy - \\&\quad - a_5 y^2 - a_6 x^2 y - a_7 xy^2 - x / c (c_1 x^2 + c_2 xy + c_3 y^2 + c_4 x^3 + c_5 x^2 y + c_6 xy^2 + c_7 x^3); \\y_{corr} &= y - k_1 y r^2 - k_2 y r^4 - k_3 y r^6 - P_2 (2y^2 + r^2) - 2P_1 xy - b_1 x - b_2 y - b_3 x^2 - b_4 xy - \\&\quad - b_5 y^2 - b_6 x^2 y - b_7 xy^2 - y / c (c_1 x^2 + c_2 xy + c_3 y^2 + c_4 x^3 + c_5 x^2 y + c_6 xy^2 + c_7 x^3); \\r^2 &= x^2 + y^2,\end{aligned}$$

где  $x_{corr}$ ,  $y_{corr}$  — координаты точек снимка, исправленные за дисторсию;  $x$ ,  $y$  — координаты точек на исходном снимке;  $r$  — длина радиус-вектора;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  — коэффициенты радиальной дисторсии;  $P_1$ ,  $P_2$  — коэффициенты тангенциальной дисторсии;  $a_1 \dots a_n$ ,  $b_1 \dots b_n$ ,  $c_1 \dots c_n$  — коэффициенты растяжения и сжатия снимка.

Съемка полигона проводилась при двух высотах фотографирования 600 и 800 м с размером пикселя на земле соответственно 4 и 6 см (GSD). Съемка для полевой калибровки, как правило, производится маршрутами крест на крест для увеличения количества измерений на снимках. Избыточные измерения дают возможность получить более достоверный результат. В первом случае было получено 327 снимков (проект Полевая\_600), а во втором случае блок состоял из 200 снимков (проект Полевая\_800). Всего в пределах блока снимков попало 109 маркированных опорных точек, которые были взяты для калибровки (рис. 3).

Также выполнялась полевая калибровка с использованием снимков, полученных с обеих высот фотографирования (проект Полевая\_600-800). Каждый блок снимков уравнивался в нескольких вариантах: с параметрами лабораторной калибровки, с использованием формул физической и смешанной самокалибровки.

Для оценки точности различных вариантов калибровки камеры была выполнена фототриангуляция двух блоков снимков полигона, полученных с высот фотографирования 600 и 800 м, той же камерой. (проекты Контроль\_600 и Контроль\_800). При этом в качестве опорных точек ис-

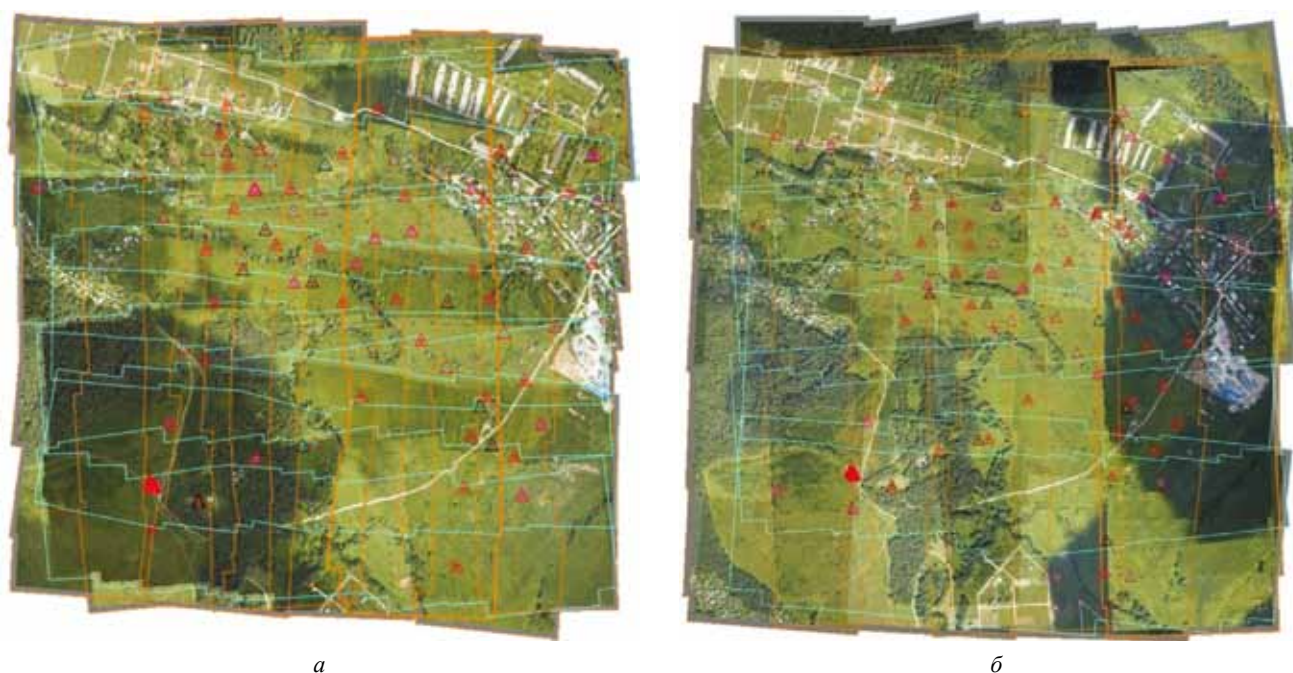


Рис. 3. Схема съемки:

а — высота съемки 600 м; б — высота съемки 800 м



пользовалось только 5 точек, остальные 44 точки использовались как контрольные. Естественно, самокалибровка при этом не выполнялась. В табл. 1 приведены результаты оценки точности фототриангуляции, выполненной в программе PHOTOMOD, используя при этом различные варианты калибровки, на рис. 4 показаны соответствующие диаграммы.

Из табл. и диаграмм (см. рис. 4) видно, что наилучшие по точности результаты получают при применении результатов лабораторной калибровки либо при использовании результатов полевой калибровки камеры (формулы смешанной дисторсии). При использовании программы

Таблица 1

Результаты оценки точности фототриангуляции в PHOTOMOD

Проекты	Калибровка PHOTOMOD	GSD, см	Точность					
			Опорные точки (5 шт.)			Контрольные точки (44 шт.)		
			$M_x$	$M_y$	$M_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
Контроль_600	Лабораторная	4,1	0,035	0,025	0,030	0,030	0,053	0,155
Контроль_800	Лабораторная	6	0,013	0,027	0,054	0,034	0,056	0,201
Контроль_600	Полевая 600_смеш	4,1	0,025	0,031	0,070	0,046	0,049	0,161
Контроль_600	Полевая 800_смеш	4,1	0,028	0,037	0,088	0,049	0,055	0,171
Контроль_600	Полевая 600-800_смеш	4,1	0,035	0,046	0,094	0,051	0,064	0,188
Контроль_800	Полевая 600_смеш	6	0,021	0,018	0,045	0,038	0,040	0,070
Контроль_800	Полевая 800_смеш	6	0,021	0,015	0,059	0,040	0,040	0,076
Контроль_800	Полевая 600-800_смеш	6	0,021	0,013	0,068	0,039	0,041	0,085
Контроль_600	Полевая 600_физ	4,1	0,180	0,107	0,139	0,245	0,317	0,712
Контроль_600	Полевая 800_физ	4,1	0,204	0,050	0,113	0,306	0,302	0,691
Контроль_600	Полевая 600-800_физ	4,1	0,183	0,087	0,137	0,263	0,306	0,736
Контроль_800	Полевая 600_физ	6	0,136	0,135	0,070	0,479	0,316	1,085
Контроль_800	Полевая 800_физ	6	0,143	0,164	0,058	0,808	0,655	0,857
Контроль_800	Полевая 600-800_физ	6	0,144	0,146	0,088	0,495	0,308	1,007

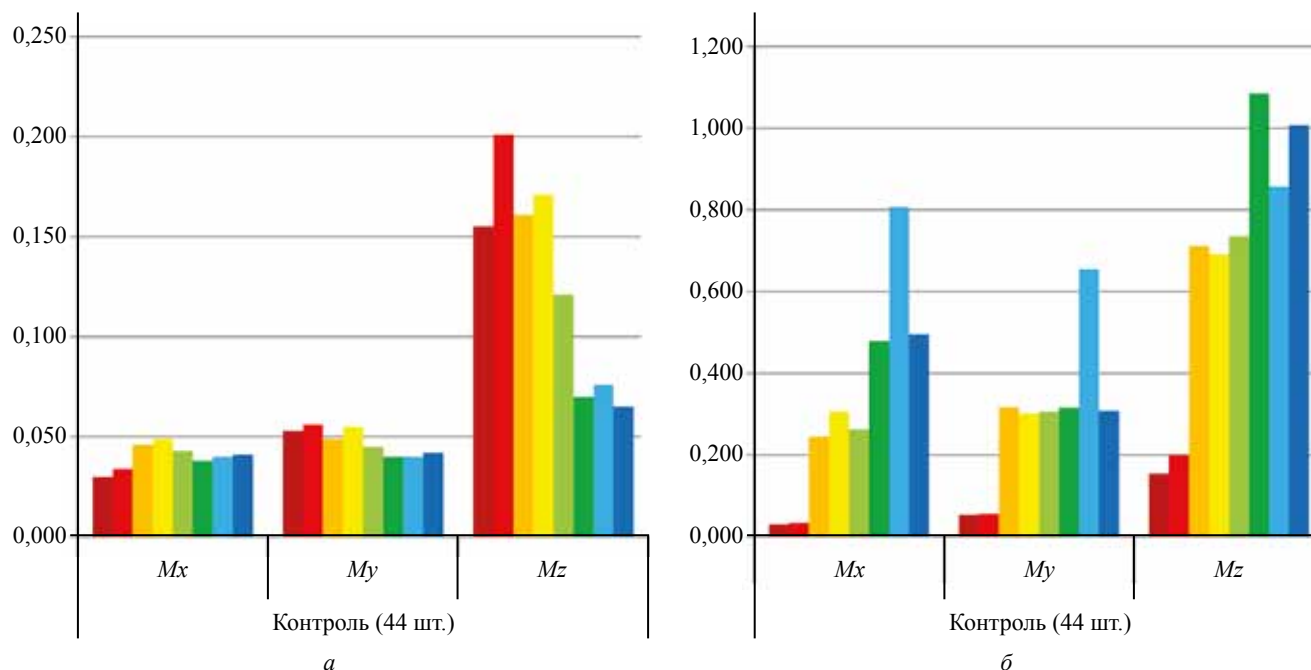


Рис. 4. Оценка точности фототриангуляции на основе применения результатов полевой калибровки PHOTOMOD:

а — формула смешанной дисторсии; б — формула физической дисторсии;

■ — С-Ю\_600 Лабораторная; ■ — С-Ю\_800 Лабораторная; ■ — С-Ю\_600 Полевая 600; ■ — С-Ю\_600 Полевая 800; ■ — С-Ю\_600 Полевая 600\_800; ■ — С-Ю\_800 Полевая 600; ■ — С-Ю\_800 Полевая 800; ■ — С-Ю\_800 Полевая 600\_800

PHOTOMOD рекомендуется применять самокалибровку со смешанной дисторсией, т.к. это приводит к повышению точности фототриангуляции.

Второй частью работы был анализ точности фототриангуляции в системе Agisoft PhotoScan. В данной программе используется другая модель калибровки камер, приведенная ниже:

$$\begin{aligned}x' &= x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1xy; \\y' &= y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy; \\x &= X / Z; \quad y = Y / Z; \quad u = cx + x'fx + y'skew; \\v &= cy + y'fy; \quad r = \sqrt{x^2 + y^2},\end{aligned}$$

где  $X, Y, Z$  — координаты точек в пространственной системе координат снимка;  $u, v$  — координаты точек в системе координат снимка (в пикселях);  $fx, fy$  — проекции фокусного расстояния на плоскости  $ZX$  и  $ZY$  соответственно;  $cx, cy$  — координаты главной точки;  $K_1, K_2, K_3$  — коэффициенты радиальной дисторсии;  $P_1, P_2$  — коэффициенты тангенциальной дисторсии;  $skew$  — коэффициент неортогональности системы координат снимка.

Параметры калибровки камеры определялись на основе выполнения фототриангуляции с самокалибровкой по тем же блокам снимков, что и для PHOTOMOD, полученным с высот фотографирования 600 и 800 м (рис. 5).

Далее выполнялась оценка точности фототриангуляции по тем же блокам снимков, что и в случае PHOTOMOD, применяя различные варианты параметров калибровки камеры. При этом блоки снимков были полностью идентичные в обеих программах, с одинаковым количеством снимков, опорных и контрольных точек.

В табл. 2 приведены результаты оценки точности фототриангуляции, выполненной в программе PhotoScan, на рис. 6 показана соответствующая диаграмма.

Из табл. 2 и диаграммы (см. рис. 6) видно, что наилучшие результаты в плане получаются при применении полевой калибровки на меньшей высоте фотографирования и с меньшим размером пикселя на местности. При этом, точность по высоте значительно лучше при большей высоте фотографирования. Это объясняется тем, что при высоте фотографирования 600 м перекрытия между снимками составляли примерно 80%, а при высоте 800 м — 70%. При перекрытиях между снимками 80% базис фотографирования меньше, чем при перекрытии 70%, а следовательно, угол засечки меньше, что приводит к понижению точности фототриангуляции по высоте.

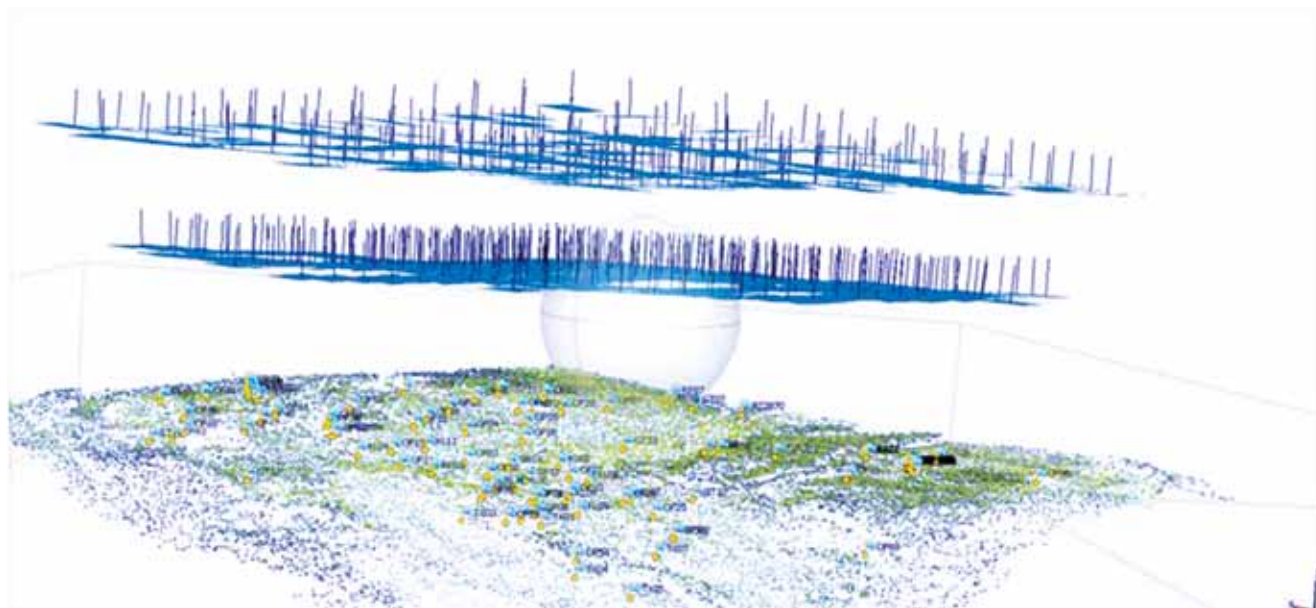


Рис. 5. Схема съемки

Результаты оценки точности фототриангуляции в PhotoScan

Проекты	Калибровка PhotoScan	GSD, см	Точность, м					
			Опорные точки (5 шт.)			Контрольные точки (44 шт.)		
			$M_x$	$M_y$	$M_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
Контроль_600	Полевая 600_физ	4,1	0,045	0,042	0,057	0,045	0,040	0,204
Контроль_600	Полевая 800_физ	4,1	0,042	0,042	0,033	0,043	0,036	0,211
Контроль_600	Полевая 600-800_физ	4,1	0,045	0,042	0,041	0,045	0,037	0,228
Контроль_800	Полевая 600_физ	6	0,014	0,020	0,053	0,056	0,050	0,133
Контроль_800	Полевая 800_физ	6	0,011	0,016	0,063	0,056	0,043	0,125
Контроль_800	Полевая 600-800_физ	6	0,011	0,016	0,055	0,051	0,046	0,098

**Заключение.** Лабораторная калибровка камеры дает результаты сопоставимые по точности с полевой калибровкой, поэтому рекомендуется всегда выполнять лабораторную калибровку камеры, так как это гарантирует получение удовлетворительного результата по точности при выполнении реальных проектов. Выполнение самокалибровки при фототриангуляции реальных проектов может давать хорошие результаты по точности, однако могут быть случаи когда самокалибровка не даст желаемого результата при низком качестве съемки из-за погодных и атмосферных условий, работы штормно-щелевого затвора и т.д. или вообще задача самокалибровки может не решаться в случае съемки плоско-равнинной местности.

Целесообразно выполнять исследования каждого набора аппаратно-программных средств (БПЛА с камерой, ГНСС и ЦФС для обработки снимков) на полигоне с целью подтверждения заявленных производителем характеристик для получения документов о местности заданной точности. Такие исследования в настоящее время выполняются в центре сертификации МИИГАиК с выдачей соответствующего сертификата.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. –М.: ЦНИИГАиК, 2002. –100 с.
2. Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов

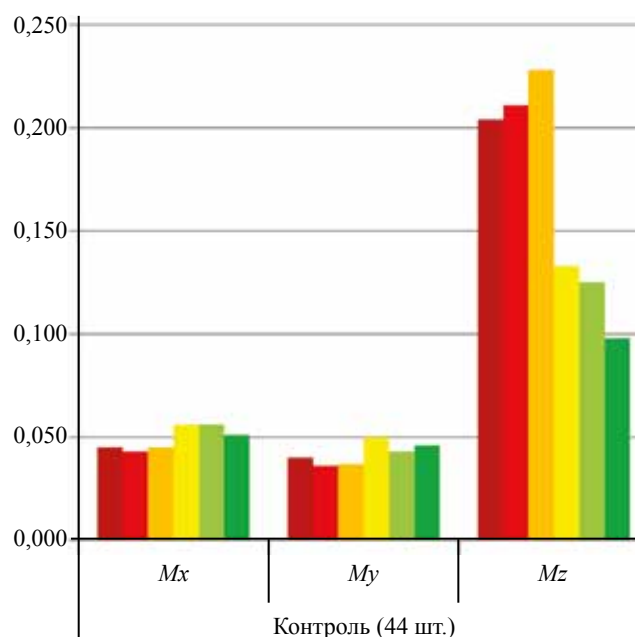


Рис. 6. Оценка точности фототриангуляции на основе применения результатов полевой калибровки PhotoScan (формула физической дисторсии):

- — С-Ю\_600 Полевая 600\_физ.; ■ — С-Ю\_600 Полевая 800\_физ.; ■ — С-Ю\_600 Полевая 600\_800\_физ.;
- — С-Ю\_800 Полевая 600\_физ.; ■ — С-Ю\_800 Полевая 800\_физ.; ■ — С-Ю\_800 Полевая 600\_800\_физ.

/ Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Министерство гражданской авиации. –М.: Недра, 1982. –15 с.

3. Михайлов А.П., Чибунчиков А.Г. Конспект лекций по фотограмметрии. –М.: МИИГАиК, 2012. –252 с.

4. PHOTOMOD 6.0.2. Руководство пользователя. –М.: АО Фирма «Ракурс», –1605 с.

5. PhotoScan Professional Edition, версия 1.2. Руководство пользователя. –М.: ООО Agisoft. –116 с.