

4. Aronov, A.G. The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004 / A.G. Aronov [et al.] // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2007. – Vol. 164. – P. 63–74.
5. Аронов, А.Г. Сейсмотектонические критерии долгосрочного прогноза Калининградских землетрясений / А.Г. Аронов, Т.И. Аронова // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года / А.Г. Аронов [и др.] ; отв. ред. А.В. Николаев. – СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. – С. 136–150.

## **SYSTEM OF SEISMOLOGICAL MONITORING IN CURRENTLY USED IN THE REPUBLIC IN BELARUS**

**A. ARONOV, R. SEROGLAZOV, T. ARONOVA, V. ARONOV**

*Seismological monitoring as a part of the State system of monitoring and forecast of natural and technogeneous emergency situations in the Republic of Belarus and of the National system of environmental monitoring in the Republic of Belarus is carried out in order to monitor the local, regional and global seismicity, to assess the seismic conditions and degree of seismic effects both in the territory of Belarus as a whole, and in sites where critical industrial and civil objects (NPP's, waterworks, high-rise buildings, etc.) are located.*

**Keywords:** *seismicity, seismic station, monitoring, earthquake, hazard, parameters, magnitude, epicenter, focus*

**УДК 528**

## **ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН МИИГАиК ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КАЛИБРОВКИ И СЕРТИФИКАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

**д-р техн. наук, проф. А.Г. ЧИБУНИЧЕВ,**

**канд. техн. наук, доц. А.В. ГОВОРОВ,**

**канд. техн. наук, доц. В.М. КУРКОВ, А.В. СМИРНОВ**

*(Московский государственный университет геодезии и картографии,  
Россия)*

*Рассмотрен опыт работы на испытательном геополигоне МИИГАиК по тестированию и сертификации аэрофотосъемочных комплексов на базе пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Дано описание и приведены характеристики испытательного полигона. описа-*

ны исследования точности фототриангуляции, с использованием различных методов калибровки камер как лабораторной, так и полевой на примере результатов аэросъемки камеры Phase One IXU 150, установленной на БЛА Орлан-10.

В качестве экспериментальной площадки использовался Заокский испытательный геополYGON 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. Приведены результаты исследований, сделаны выводы и даются практические рекомендации.

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

В МИИГАиК в 2011 году начались работы по созданию специализированного исследовательского полигона для разработки и оценки технологий картографирования и мониторинга территорий с использованием аэрофотосъемочных комплексов, установленных на беспилотных летательных аппаратах (БЛА).

Полигон расположен в Заокском районе Тульской области в 110 км от Москвы. На территории полигона имеются лесные массивы, различные гидрографические объекты, многообразные формы рельефа, сельскохозяйственные угодья и производственные объекты (рис. 1).

К настоящему времени на полигоне имеется планово-высотная опорно-геодезическая сеть, состоящая из 314 точек, из них 54 пункта локальной сети, закрепленных грунтовыми реперами и турами, в том числе 4 пункта ГГС, 63 маркированных опознака на площади 12 км<sup>2</sup>, 195 естественных опознаков, в том числе 37 для привязки космических сканерных изображений на площади 200 км<sup>2</sup>, 95 на площади 12 км<sup>2</sup>, 50 высотных опознаков для калибровки воздушного лазерного сканера, 21 опознак вдоль линейного объекта протяженностью 10 км, 6 точек опорной межевой сети Заокского района Тульской области. Закреплены точки для базовых станций на территории аэродрома «Дракино» в 10 км от Заокского полигона и «Большое Грызлово» в 17 км.

На участок полигона № 1 получена ЦМР по результатам обработки воздушного лазерного сканирования (ВЛС) (рис. 2). ВЛС выполнено орга-

низацией МОСГИПРОТРАНС в июне 2012 года, при этом использован сканер Liica ALS-50, высота полета 1000 м, частота сканирования 63 000 Гц, угол сканирования  $\pm 58^\circ$ , плотность точек отражения на  $1 \text{ м}^2$  – 1.2. Результирующая матрица рельефа получена с плотностью 1 м и показана на рисунке 3. Точность определения высот ЦМР (СКО) 0.21 м.



Рис. 1. Центральная часть полигона



Рис. 2. Участок полигона № 1 площадью  $18 \text{ км}^2$  с расположением опознаков и точек геодезической сети

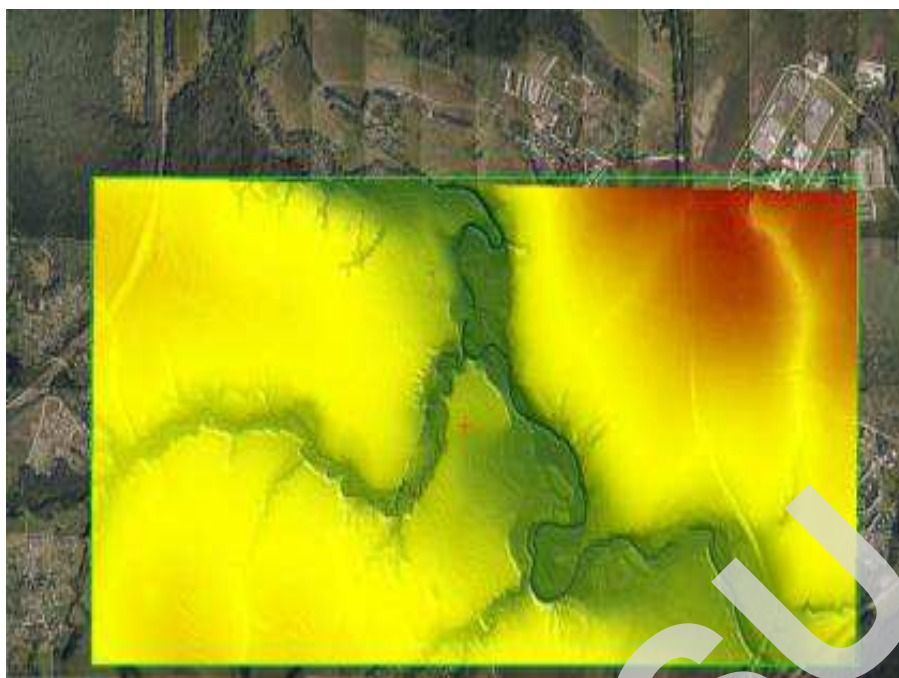


Рис. 3. Матрица рельефа, полученная в результате воздушного лазерного сканирования

Перепад высот на участок №4, предназначенный для полевой калибровки съемочных камер, составляет 98 метров с высотами над уровнем моря от 132 до 230 метров.

Координаты точек геодезического обоснования и опознаков получены в результате наблюдений ГНСС в режиме статики с точностью (СКО) 2 см по всем трем координатам. Маркировка пунктов локальной сети выполнена в виде окошки размером 3 × 3 м, где центральная часть размером 1.5 × 1.5 м засыпана белым порошком. Искусственные опознаки маркированы окошкой размером 1 × 1 м, где в центральной части пункта используется пластиковый белый круг диаметром 32 см или черно-белый квадрат со стороной 50 см (рис. 4, 5).

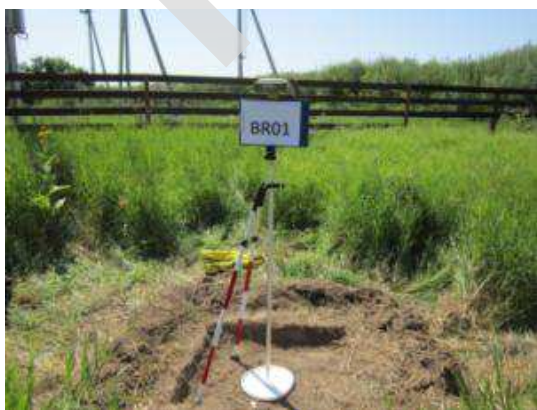


Рис. 4

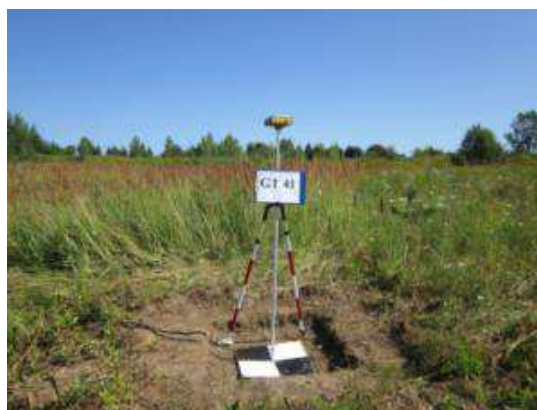


Рис. 5

Для определения разрешающей способности аэрофотоснимков на время аэрофотосъемки используется радиальная мира размером  $206 \times 250$  см с диаметром секторов 155 (рис. 6, 7). Размер сектора на краю окружности 25 см. Число черных и белых секторов – 10.



Рис. 6. Общий вид радиальной миры



Рис. 7. Изображение миры на снимке

Для определения разрешающей способности космических сканерных изображений используется радиальная мира диаметром 15.1 м с 8-ю секторами (рис. 8 и 9).



Рис. 8. Общий вид радиальной миры диаметром 15.1 м



Рис. 9. Изображение миры на космическом сканерном снимке «Pleiades» с расчетным пространственным разрешением 0.5 м

В последнее время на рынке оборудования для дистанционного зондирования земли появились и появляются разнообразные комплексы, позволяющие получать информацию о земной поверхности с целью решения задач топографии, кадастра и мониторинга объектов и явлений. Среди них широкоформатные и среднеформатные топографические камеры, малоформатные неметрические камеры, многокамерные съемочные системы, сканерные съемочные системы оптического и мультиспектрального диапа-

зона, системы воздушного лазерного сканирования, космические сканерные сенсоры. В комплексы для дистанционного зондирования входят аэрофотоустановки для стабилизации съемочной аппаратуры, системы глобального позиционирования (спутниковые и инерциальные) для геопривязки сенсоров. В качестве носителей средств дистанционного зондирования используются как беспилотные летательные аппараты, так и пилотируемые легкомоторные и тяжелые самолеты и вертолеты.

Многообразие средств дистанционного зондирования и навигационной аппаратуры вызывает необходимость независимой оценки геометрических и радиометрических характеристик получаемых изображений, определения элементов выставки съемочной аппаратуры, спутниковой антенны и инерциальной системы. Наряду с тестированием и калибровкой съемочной аппаратуры необходима разработка теоретически обоснованных рекомендаций по выбору параметров аэрофотосъемки в зависимости от масштаба создаваемых карт и требуемой точности создания цифровых моделей местности для каждого из используемых аэрофотосъемочных комплексов. Необходимо также разработать рекомендации по планово-высотной подготовке материалов аэрофотосъемки. Очевидно, что достоверность разработанных рекомендаций должна быть подтверждена опытно-производственными работами.

В последнее время широкое распространение приобретает технология выполнения аэрофотосъемки с использованием аэрофотосъемочных комплексов на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с различными цифровыми камерами на борту. Это могут быть «бытовые» камеры со шторно-щелевыми 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.

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 калибровки.

Для лабораторной калибровки использовался пространственный тест-объект и специализированное программное обеспечение, разработанное на кафедре фотограмметрии МИИГАиК (рис. 10).

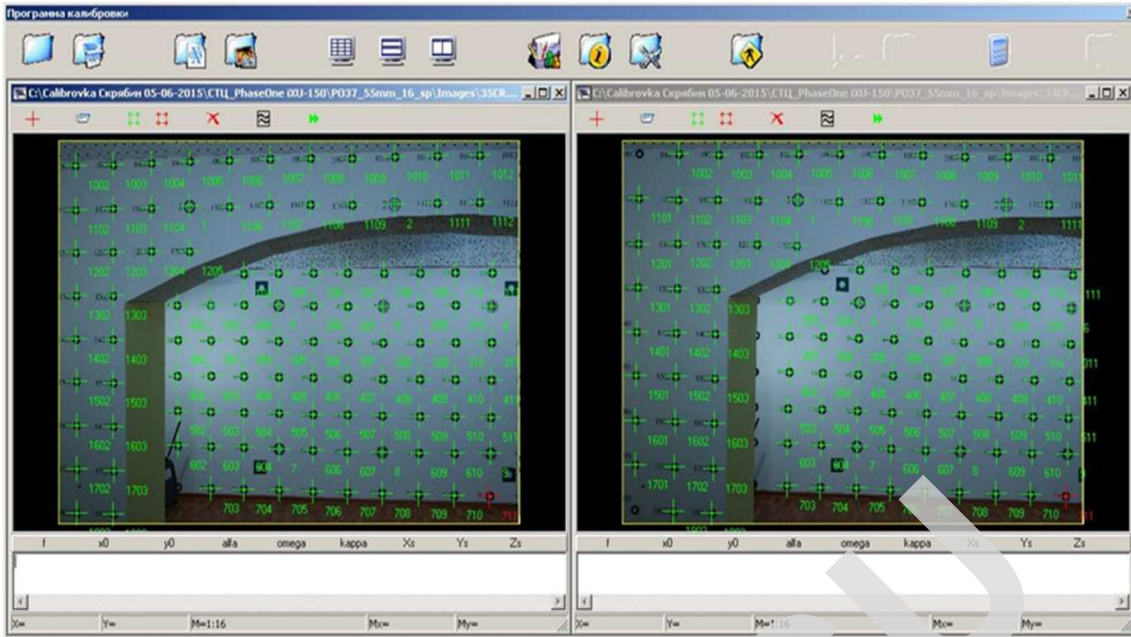


Рис. 10. Пространственный тест-объект для лабораторной калибровки камер

Для проведения полевой калибровки использовался Заокский геополигон МИИГАиК и цифровые фотограмметрические системы *PHOTOMOD* и *PhotoScan*.

Сначала приведены результаты исследований, выполненных на основе ЦФС *PHOTOMOD*.

*PHOTOMOD* является универсальной программой, использующей классические алгоритмы обработки аэрофотосъемки. Для компенсации дисторсии объектива применительно к неметрическим камерам здесь используется формула смешанной дисторсии.

Ее суть заключается в добавлении к основной физической формуле дополнительных нескольких десятков коэффициентов, описывающих остаточные систематические погрешности аэрофотоснимков.

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

где  $(x_{corr}, y_{corr})$  – координаты точек снимка, исправленные за дисторсию;

$(x, y)$  – координаты точек на исходном снимке, относительно точки симметрии;

$(r)$  – 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*) (рис. 11). 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 (см. рис. 3).



Рис. 11. Схема съемки: *а* – высота съемки 600 м.; *б* – высота съемки 800 м

Также выполнялась полевая калибровка с использованием снимков, полученных с обеих высот фотографирования (проект Полевая\_600-800).

Для оценки точности различных вариантов калибровки камеры была выполнена фототриангуляция двух блоков снимков полигона, полученных с высот фотографирования 600м и 800м той же камерой (проекты Контроль\_600 и Контроль\_800). При этом в качестве опорных точек использовалось только 5 точек, остальные 44 точки использовались как контрольные. Естественно, самокалибровка при этом не выполнялась. В таблице 1 приведены результаты оценки точности фототриангуляции, выполненной в программе *PHOTOMOD*, используя при этом раз-



личные варианты калибровки, а на рисунках 12 и 13 показаны соответствующие диаграммы.

Таблица 1

**Результаты оценки точности фототриангуляции в PHOTOMOD**

| Проекты      | Калибровка<br><i>PHOTOMOD</i> | GSD<br>(см) | Точность                 |       |       |                               |       |       |
|--------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|
|              |                               |             | Опорные точки<br>(5 шт.) |       |       | Контрольные точки<br>(44 шт.) |       |       |
|              |                               |             | Mx                       | My    | Mz    | Mx                            | My    | Mz    |
| 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 |

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

$$x' = x(1 + K1r^2 + K2r^4 + K3r^6) + P2(r^2 + 2x^2) + 2P1xy;$$

$$y' = y(1 + K1r^2 + K2r^4 + K3r^6) + P1(r^2 + 2y^2) + 2P2xy;$$

$$x = X / Z;$$

$$y = Y / Z;$$

$$u = cx + x'fx + y'skew;$$

$$v = cy + y'fy;$$

$$r = \text{sqrt}(x^2 + y^2)$$

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;

$K1, K2, K3$  – коэффициенты радиальной дисторсии;

$P1, P2$  – 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*, полученных с высот фотографирования 600 м и 800 м. (рис. 14).

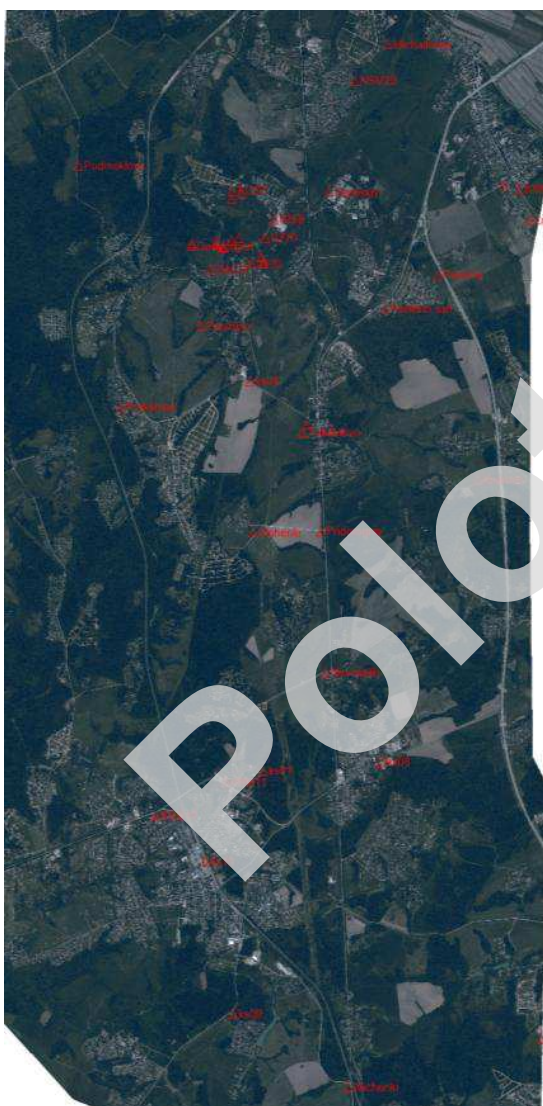


Рис. 12. Участок полигона №2 площадью 200 км<sup>2</sup> для калибровки космического сканерного изображения со спутника

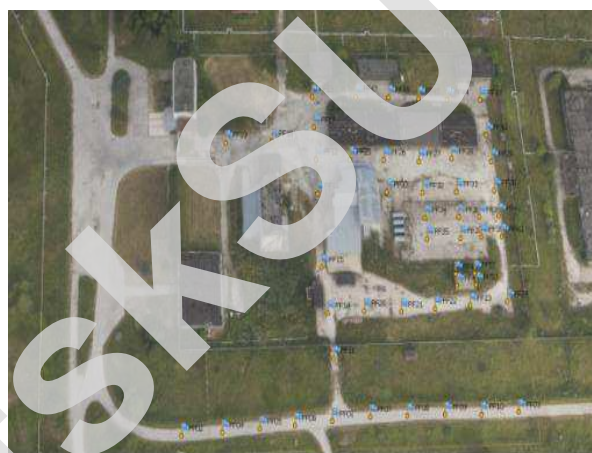


Рис. 13. Участок полигона № 3 площадью 0.3 км<sup>2</sup> с высотными опознаками для калибровки воздушного лазерного сканера



Рис. 14. Участок полигона №4 площадью 1 км<sup>2</sup> с маркированными опознаками для калибровки цифровых камер

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 таблице 2 приведены результаты оценки точности фототриангуляции, выполненной в программе *PhotoScan*.

Из обеих таблиц видно, что наилучшие результаты в плане получаются при применении результатов полевой калибровки на меньшей высоте фотографирования и с меньшим размером пикселя на местности, что вполне естественно.

Таблица 2

**Результаты оценки точности фототриангуляции в PhotoScan**

| Проекты      | Калибровка<br><i>PhotoScan</i> | GSD<br>(см) | Точность              |        |        |                            |        |        |
|--------------|--------------------------------|-------------|-----------------------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|
|              |                                |             | Опорные точки (5 шт.) |        |        | Контрольные точки (44 шт.) |        |        |
|              |                                |             | Mx (м)                | My (м) | Mz (м) | Mx (м)                     | My (м) | Mz (м) |
| 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  |

При этом точность по высоте значительно лучше при большей высоте фотографирования, что противоречит естественным законам точности фототриангуляции. Это объясняется тем, что при высоте фотографирования 600 м. перекрытия между снимками составляли примерно 80%, а при высоте 800 м. соответственно 70%. При 80% перекрытий между снимками базис фотографирования естественно меньше, чем при 70%, а следовательно угол засечки меньше, что приводит к понижению точности фототриангуляции по высоте.

Лабораторная калибровка камеры дает результаты сопоставимые по точности с полевой калибровкой. Поэтому рекомендуется всегда выпол-

нять 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, а также из-за работы шторно-щелевого затвора или вообще задача самокалибровки может не решиться в случае плоскоравнинной местности.

Целесообразно выполнять исследования каждого набора аппаратно-программных средств (БЛА с камерой и 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 / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Министерство гражданской авиации. – М. : Недра, 1982. – 15 с.
3. Михайлов, А.П. Конспект лекций по фотограмметрии / А.П. Михайлов, А.Г. Чибуничев. – 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. : рук. пользователя. – М. : ООО Agisoft, – 116 с.

### **TESTING AREA GEOPOLYGON MIIGAİK FOR RESEARCH, CALIBRATION AND CERTIFICATION OF UNMANNED AERIAL SYSTEMS**

**A. CHIBUNICHEV, V. KURKOV, A. GOVOROV, A. SMIRNOV**

*This article describes the experience of working on the test Geopolygon MIIGAİK testing and certification of aerial systems based on manned and unmanned aerial vehicles. Nowadays, aerial survey technology using aerial systems based on unmanned aerial systems (UAS) becomes more popular. UAS physically can't carry professional aerial cameras. 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, test-field or self-calibration. For investigations we use "Zaoksky Geopoligon" test area*

*as an experimental field provided dense network of target and natural control points. Racurs PHOTOMOD and Agisoft PhotoScan software were 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 systems (UAS), consumer cameras.*

**УДК 528.4**

## **ОПЫТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО УСТАНОВЛЕНИЮ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ 2011 ГОДА**

**В.П. ГОРОБЕЦ, Г.Н. ЕФИМОВ, И.А. СТОЛЯРОВ**

*(Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии  
и инфраструктуры пространственных данных, Россия)*

*Даны общие сведения о государственной геодезической системе координат 2011 года и основные результаты ее практической реализации на территории Российской Федерации. Приведены параметры перехода от систем координат, используемых на территории Российской Федерации в настоящее время, к системе координат 2011 года. Показаны перспективы дальнейшего развития системы координат 2011 года на период до 2020 года.*

**Ключевые слова:** *система координат, государственная геодезическая сеть, геодезическое обеспечение.*

Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 года № 1463 в качестве единой государственной системы координат для использования при осуществлении геодезических и картографических работ установлена геодезическая система координат 2011 года (далее – ГСК-2011).

Целесообразность введения системы координат ГСК-2011, которая является геоцентрической, состояла в повышении эффективности использования спутниковых технологий координатных определений, что в свою очередь должно повысить точность и оперативность решения задач геодезического обеспечения, отвечающего современным требованиям экономики, науки и обороны страны. Кроме того, введение системы координат ГСК-2011 повысит эффективность использования системы ГЛОНАСС и осуществления мониторинга деформаций земной поверхности, что чрезвычайно важно при решении как народнохозяйственных, так и целого ряда научных задач.