

К вопросу о разработке тестового фотограмметрического полигона для калибровки и испытаний аэрофотосъемочных систем и систем лазерного сканирования

© С. В. Староверов, С. С. Нехин, А. Н. Рубенок, О. И. Козлов

Публично-правовая компания «Роскадастр», г. Москва, Россия

Реферат

Обоснована необходимость создания тестового фотограмметрического полигона (ТФП) в условиях массового использования филиалами ППК «Роскадастр» аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов для целей крупномасштабного картографирования и выполнения комплексных кадастровых работ. Приведена краткая историческая справка создания фотограмметрических полигонов в стране.

Для фотограмметрической калибровки аэрофотосъемочных систем и испытания лазерных сканирующих систем разработан проект ТФП, создаваемого ППК «Роскадастр» в рамках полевой геодезической лаборатории. Определен ряд условий для проектирования ТФП, представлены проектные характеристики ТФП в части размеров, характера местности, состава эталонных средств измерений для определения метрических и изобразительных параметров аэрофотокамер, исследования мобильных лазерных сканирующих систем и систем воздушного лазерного сканирования, устанавливаемых на пилотируемых и беспилотных воздушных судах.

Приведен состав оснащаемых аппаратно-программных средств и оборудования: комплексы измерительного ГНСС-оборудования, программное обеспечение проектирования аэрофотосъемки, фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки, воздушного и наземного мобильного лазерного сканирования, программное обеспечение спутниковых геодезических измерений.

Ключевые слова: тестовый фотограмметрический полигон, калибровка, беспилотное воздушное судно, беспилотная аэрофотосъемочная система, опознак, аэрофотосъемка, системы лазерного сканирования

Контакты для связи: Староверов Сергей Вячеславович (staroverovSV@kadastr.ru), Нехин Сергей Степанович (nekhinSS@kadastr.ru), Козлов Олег Игоревич (kozlovOI@kadastr.ru).

Для цитирования: Староверов С. В., Нехин С. С., Рубенок А. Н., Козлов О. И. К вопросу о разработке тестового фотограмметрического полигона для калибровки и испытаний аэрофотосъемочных систем и систем лазерного сканирования // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 75. С. 31–39.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.75.31-39>

Development of a Photogrammetric Test Area for Calibration and Evaluation of Aerial Photography and Laser Scanning Systems

S. V. Staroverov, S. S. Nekhin, A. N. Rubenok, O. I. Kozlov

Public Law Company «Roskadastr», Moscow, Russia

Abstract

The necessity of creating a Test Photogrammetric Polygon (TPP) for large-scale use by the branches of PLC «Roskadastr» in aerial photography with unmanned aerial vehicles (UAVs) is outlined, aimed at supporting high-volume mapping and cadastral work. A brief historical overview of the development of photogrammetric polygons in the country is also provided.

The TPP project has been developed by PLC «Roskadastr» within the framework of the field geodetic laboratory dedicated to the photogrammetric calibration of aerial photography systems and the testing of laser scanning systems. Several design considerations for the TPP are discussed, including its size, terrain characteristics, and the components of reference measuring instruments used to determine the metric and photographic parameters of aerial cameras. Additionally, the study of mobile laser scanning systems and aerial laser scanning systems installed on both manned and unmanned aircraft has been conducted.

The composition of the equipped hardware and software is presented, including GNSS measuring equipment complexes, flight planning software, photogrammetric processing tools for aerial photography and LiDAR survey data, as well as satellite geodetic measurement software.

Keywords: test photogrammetric area, calibration, Unmanned Aerial Vehicle, Unmanned Aircraft System, ground control point, aerial photography, laser scanning systems.

Contacts: Sergey V. Staroverov (staroverovSV@kadastr.ru), Sergey S. Nekhin (nekhinSS@kadastr.ru), Oleg I. Kozlov (kozlovOI@kadastr.ru).

For citation: Staroverov S. V., Nekhin S. S., Rubenok A. N., Kozlov O. I. Development of a photogrammetric test area for calibration and evaluation of aerial photography and laser scanning systems // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 75. P. 31–39.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.75.31-39>

Введение

Публично-правовая компания «Роскадастр» в рамках опытно-конструкторской работы — ОКР «ГЕОЛАБ», предусмотренной федеральным проектом «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России» осуществляет модернизацию полевой геодезической лаборатории, в состав которой должны входить 3 полигона:

- ЭГБ — эталонный гравиметрический базис;
- ЭПП — эталонный пространственный полигон;
- ТФП — тестовый фотограмметрический полигон.

С их помощью будет обеспечиваться возможность:

- калибровки всех видов гравиметров (для определения абсолютных значений ускорения силы тяжести с СКП 2.0–3.0 мкГал и повторяемостью значений 0.1–5.2; для определения относительных значений ускорения силы тяжести с СКП 1–4 мкГал и максимальным перепадом 52 мГал);
- первичной и периодической проверок спутниковой геодезической аппаратуры ГНСС, тахеометров и нивелиров;
- проверки рулеток и измерительных лент;
- фотограмметрической калибровки цифровых аэросъемочных камер с определением элементов внутреннего ориентирования и дисторсии, разрешающей способности цифровых камер, позволяющих получать изображения с размером пикселя на местности до 0.05 м и точностью определения пространственных координат 0.07–0.10 м.

Обоснование необходимости создания ТФП

Необходимость создания ТФП обусловлена требованиями к метрологическому обеспечению беспилотных и пилотируемых аэросъемочных комплексов, оценке качества топографической, картографической, кадастровой продукции, получаемой с применением цифровых аэросъемочных камер и систем воздушного лазерного сканирования в соответствии с требованиями Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», а также реализацией распоряжения Правительства Российской Федерации от 21.06.2023 № 1630-р «Об утверждении Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года и плана мероприятий по ее реализации», необходимость реализации которых подкрепляется следующими обстоятельствами:

— наметившейся тенденцией роста объемов крупномасштабных съемок многочисленных мелких по площади объектов в целях картографирования и кадастра, и как следствие этого переход на использование вместо ограниченного числа пилотируемых съемочных систем более многочисленных беспилотных аэросъемочных систем (БАС);

— ограничением взаимодействия с иностранными предприятиями-изготовителями средств воздушной съемки, вследствие чего отсутствует возможность выполнения периодических калибровок аппаратуры на производственной базе изготовителя;

— переходом от оборудования иностранного производства к отечественному в рамках программы импортозамещения, что требует проведения калибровки и тестирования вновь произведенной аппаратуры;

— более коротким сроком эксплуатации малоформатных средств воздушной съемки по сравнению с традиционным аэросъемочным оборудованием, что требует увеличения количества калибровок аппаратуры.

Эти и некоторые другие факторы (ограниченный парк пилотируемой авиации, редкая сеть аэродромов) требуют многократного увеличения количества (экземпляров) средств воздушной съемки, прежде всего фотокамер, ГНСС-приемников, воздушных сканеров для оснащения БАС, а, следовательно, необходимость планирования и выполнения их первичной и периодической калибровки и исследований.

Согласно федеральному проекту «Стимулирование спроса на беспилотные авиационные системы» с периодом реализации 2024–2030 гг. в обеспечение реализации государственного гражданского заказа на БАС и прямых закупок от производителей на период до 2030 г. для нужд Росреестра и ППК «Роскадастр» должно быть поставлено несколько сот беспилотных авиационных систем.

На российском рынке работы в области картографирования и кадастра являются одними из значимых среди других видов работ, осуществляемых с помощью БАС (топографическое картографирование, кадастровая, контрольная (надзорная) деятельность в области использования земель). Их целью является создание новой конкурентоспособной на внутреннем и глобальном рынках отрасли российской экономики в секторе эксплуатации беспилотных авиационных систем для обеспечения потребителей пространственной информацией и аналитическими сервисами.

Для фотокамер, оснащаемых БАС, должна быть обеспечена возможность выполнения фотограмметрической калибровки фотокамер с целью определения или уточнения элементов внутреннего ориентирования и дисторсии, а также обеспечена возможность реализации методики полевых исследований и оценки программно-аппаратных комплексов (ПАК) ([Кадничанский и др., 2022](#)) в соответствии с ГОСТ Р 70078–2022.

Используемые в составе БАС ГНСС-система и система лазерного сканирования должны быть внесены в реестр средств измерений Росстандарта и проходить поверку в соответствии с Приказом ([Приказ Минпромторга 2020 г. № 2510](#)). Их метрологическое обеспечение осуществляется с использованием государственных рабочих эталонов, выбираемых в строгом соответствии с требованиями Государственной поверочной схемы для координатно-временных средств измерений и необходимым запасом метрологической точности.

Для систем воздушного лазерного сканирования помимо поверок, проводимых установленным для средств измерений порядком, должна быть обеспечена возможность выполнения калибровки с целью определения или уточнения углов выставки и координат положения лидара относительно системы координат инерциального измерительного устройства, коэффициента измерения дальности и иных параметров (в зависимости от системы воздушного лазерного сканирования).

Кроме того, рассматривается необходимость, а также возможность и условия выполнения в рамках функциональных характеристик полигона калибровки наземных мобильных систем лазерного сканирования.

Для метрологического обеспечения комплекса работ по исследованию материалов аэрофотосъемки и лазерного сканирования на ТФП в рамках полевой геодезической лаборатории необходимо использование рабочих эталонов 1-го разряда. Применение рабочих эталонов позволит измерять на местности любые точечные, линейные, площадные и трехмерные тестовые объекты. В частности, с миллиметровой точностью будут определены центры опознаков (тест-объектов) для калибровки наземных мобильных лазерных сканеров. Для точной калибровки они должны быть стабильными, легко идентифицируемыми на скане и иметь точно определенные геометрические параметры (например, центр шара или центр креста).

Историческая справка

Следует отметить, что история создания тестовых фотограмметрических полигонов берет свое начало не в период цифровой аэрофотосъемки, а задолго до него. Применительно к нашей стране это шестидесятые — семидесятые годы прошлого столетия ([Васильев и др., 1974](#); [Гончаров, Глады-](#)

[шев, 1980](#); [Nekhin, 1984](#); [Макаренко и др., 1994](#)). В частности, одними из первых были созданы полигоны в системе Главного управления геодезии и картографии (ГУГК) СССР ([Гончаров, Гладышев, 1980](#); [Nekhin, 1984](#); [Макаренко и др., 1994](#)) — полигон № 10 под г. Элиста и полигон под Новосибирском, основные характеристики которых приведены в таблице. В то время только закладывались теоретические основы вопросов полевой калибровки аэрофотоснимков и определения измерительных и изобразительных свойств аэрофотоаппаратов (АФА) по фотоснимкам испытательного полигона. Полигоны строились на равнинной территории, поэтому не обеспечивали полную калибровку АФА и снимков, т. е. одновременное определение и геометрических искажений и элементов внутреннего ориентирования АФА.

Материалы аэрофотосъемки полигонов использовались для решения следующих задач:

- определения измерительных и изобразительных свойств аэрофотоаппаратов с целью установления их пригодности к различным видам аэрофототопографических и других работ;

- полевой калибровки снимков с целью последующей компенсации систематических искажений аэрофотоизображения при аналитических фотограмметрических построениях;

- испытания по аэрофотоснимкам полигона внедряемых в производство новых фотограмметрических приборов, технологий и программ обработки для ЭВМ.

Опыт создания полигона № 10 и последующей в течение ряда лет его эксплуатации позволили пересмотреть, уточнить и дополнить основные требования, предъявляемые как к данному полигону, так и к вновь проектируемым полигонам, конкретизировать эти требования в отношении размеров полигона, числа и характера размещения на нем маркированных пунктов, точности геодезических определений плановых координат и высот пунктов, их закрепления на местности и маркировки.

С развитием технических средств ГНСС, цифровой аэрофотосъемки и лазерного сканирования, в том числе устанавливаемых на беспилотные воздушные суда, создаются тестовые фотограмметрические полигоны Омским ВИСХАГИ, МИИГАиК, ООО «Геоскан» и др. организациями ([Быков, 2012](#); [Кадничанский и др., 2019](#); [Кадничанский и др., 2022](#); [Голуб и др., 2017](#); [Мицевич, Прус, 2024](#)), основные характеристики которых приведены в таблице.

Особенностью полигона МИИГАиК является значительный (до 70 м) перепад отметок высот контрольных точек, что позволяет его использовать не только для определения коэффициентов дисторсии, но и элементов внутреннего ориентирования камеры.

Характеристики тестовых фотограмметрических полигонов

Название (обозначение) полигона, год создания	Размеры, км	Максимальные превышения, м	Число контрольных точек	Точность определения пл. коорд./высот, м	Вид маркировки, размер знака, м
ГУГК № 10, Элиста, 1974 (Nekhin, 1984 ; Макаренко и др., 1994)	2.0 × 2.4	Равнинный	334	0.025 / 0.003	Мальтийский крест, 2.0 × 2.0 м
Ермолино, 1974 (Васильев и др., 1974)	1.8 × 1.8	Равнинный	160	0.016 / 0.01	Круг диаметром 0.35 м
НИИПГ, НИИГАиК Новосибирск, 1981 (Гончаров, Гладышев, 1980)	1.7 × 1.7 2.0 × 8.0	Равнинный	179 179+31	0.032 / 0.01	Крест в квадрате 1.6 × 1.6 м
Филиал ВИСХАГИ, Омск, 2007 (Быков, 2012)	1.0 × 1.0	Равнинный	441	0.02 / 0.05	Круг диаметром 0.25 м
МИИГАиК, Заокский, 2012 (Кадничанский и др., 2019)	1.0 × 1.0	70 м	46	0.02 / 0.02	Белый круг диаметром 0.32 м или черно-белые квадраты в общем квадрате со стороной 0.5 м
ООО «Геоскан» Путилово, 2017 (Кадничанский и др., 2022)	1.0 × 1.6	Равнинный	30	0.02 / 0.02	Квадрат 0.3 × 0.3 м с 4-мя контрастными треугольниками
ВНИИФТРИ Московская обл., 2017 (Голуб и др., 2017)	Лин. базис до 3 км	Равнинный	Не менее: 7 баз. линий, 20 пунктов	0.01	Кольцевой контрастный круг и черно-белые квадраты в общем квадрате
ЭПП Логойский, Беларусь, 2024 (Мицевич, Прус, 2024)	0.8 × 1.2	37 м	28 маркир., 50 контурн. точек	0.02 / 0.02	Съемные пластины 0.5 × 0.5 м с 4-мя контрастными квадратами

Вопросы проектирования ТФП

При проектировании ТФП в составе полевой геодезической лаборатории Росреестра определен ряд следующих условий:

1. Площадь участка 4–5 км², на котором возможно размещение контрольных точек и тест-объектов для выполнения их съемки с различных высот.

2. Наличие рельефа с перепадом отметок высот до 80–90 м.

3. Наличие расположенного вблизи от полигона аэродрома гражданской авиации или обслуживаемой взлетно-посадочной полосы для базирования воздушных носителей съемочной аппаратуры.

4. Отсутствие ограничений на использование воздушного пространства над полигоном, аэродромом и их окрестностями.

5. Возможность выбора уже имеющихся на территории контурных точек объектов в качестве контрольных.

6. Возможность определения метрических и изобразительных характеристик аэрофотосъемочных систем.

7. Наличие на территории полигона зданий и инфраструктуры, необходимых для использования в качестве тест-объектов при выполнении калибровки воздушных и наземных мобильных систем лазерного сканирования.

8. Возможность закладки вблизи полигона двух геодезических центров для обеспечения функционирования базовых станций с ГНСС-оборудованием;

9. Наличие инфраструктуры для постоянного хранения тест-объектов для оценки изобразительных качеств аэрофотоснимков, а также вспомогательных аксессуаров и инструментов.

В современных условиях вариант фундаментально закладываемых контрольных точек (в виде геодезических пунктов) требует организации для них землеотводов, работ по установке геодезиче-

ских центров, их маркировки, комплекса мероприятий по содержанию сохранности и мониторингу состояния.

При выборе на местности контрольных точек следует исходить из требований их долговременной сохранности, надежного выделения среди окружающей ситуации, возможности точной идентификации центра знака, относительно которого определены его пространственные координаты.

В качестве естественных контуров для контрольных точек ТФП целесообразно проектирование крышек люков подземных коммуникаций

(рис. 1а), углов бетонированных или асфальтированных площадок (рис. 1б), пересечений асфальтированных дорожек (рис. 2а), границ между бетонными плитами (рис. 2б), элементов разметки спортивных площадок (рис. 3а), элементов дорожной разметки (рис. 3б).

Проектируемая точность определения плановых координат и высот контрольных точек 0.015–0.02 м обеспечит выполнение аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования для всех масштабов картографирования и кадастровых работ.



а)



б)

Рис. 1. Контрольные точки ТФП в виде: а) крышек люков подземных коммуникаций, б) углов бетонированных или асфальтированных площадок



а)



б)

Рис. 2. Контрольные точки полигона в виде: а) точек пересечений асфальтированных дорожек и б) границ между бетонными плитами



Рис. 3. Контрольные точки полигона в виде: а) элементов разметки спортивных площадок, б) элементов дорожной разметки

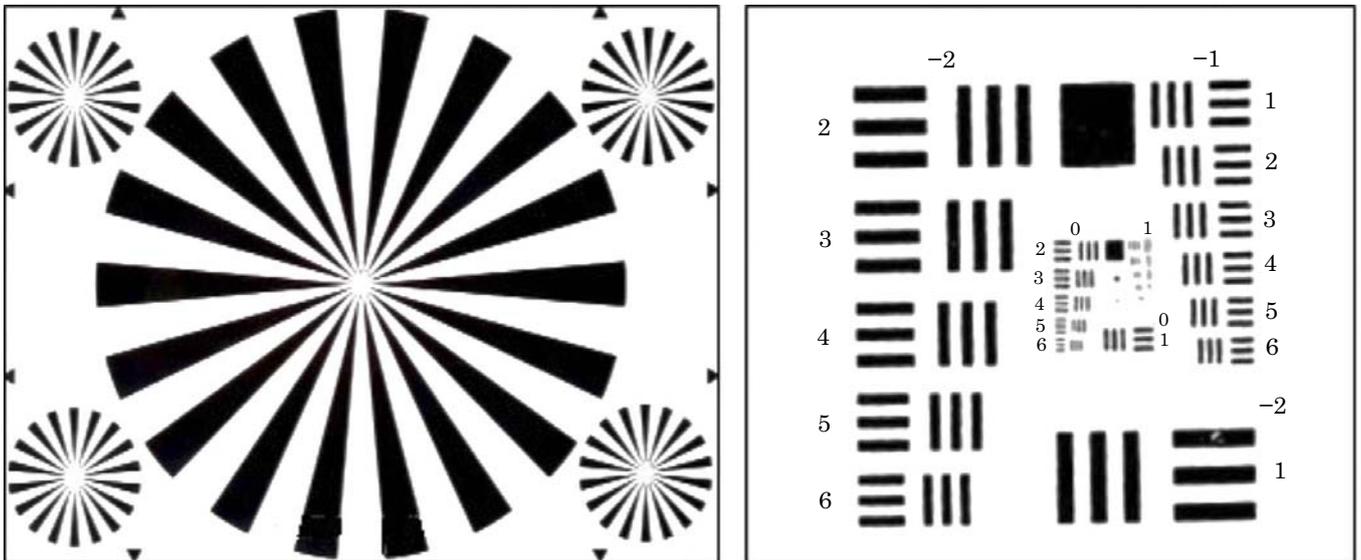


Рис. 4. Тест-объекты для определения изобразительных характеристик съемочных систем

Комплект тест-объектов для определения изобразительных характеристик съемочных систем для ТФП включает в себя радиальные или трех-четырёх-шпальные миры абсолютного контраста (рис. 4), миры с контрастом 0.15 и 0.30.

Для калибровки систем МЛС используются светоотражающие марки (рис. 5).

В качестве камеральных средств обработки в состав ТФП также входят автоматизированные рабочие места (АРМ) оператора, предназначенные для решения определенных задач:

- фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки;
- обработки результатов воздушного лазерного сканирования;
- обработки результатов наземных и бортовых ГНСС-измерений.

Каждый АРМ включает в себя системный блок, источник бесперебойного питания, клавиатуру и мышь. В качестве средств отображения информации АРМ'ы, предназначенные для обработки результатов ГНСС-измерений и воздушного лазерного сканирования, оснащаются двумя мониторами в целях расширения рабочей области экрана, а АРМ фотограмметрической обработки — монитором и стереомонитором.

Программное обеспечение ТФП включает в свой состав:

1. Программный модуль проектирования полетных заданий, подготовки полетов и контроля их выполнения, а также видеомониторинга и привязки отснятого материала (Geoscan Planner, LiGeoreference) (рис. 6).

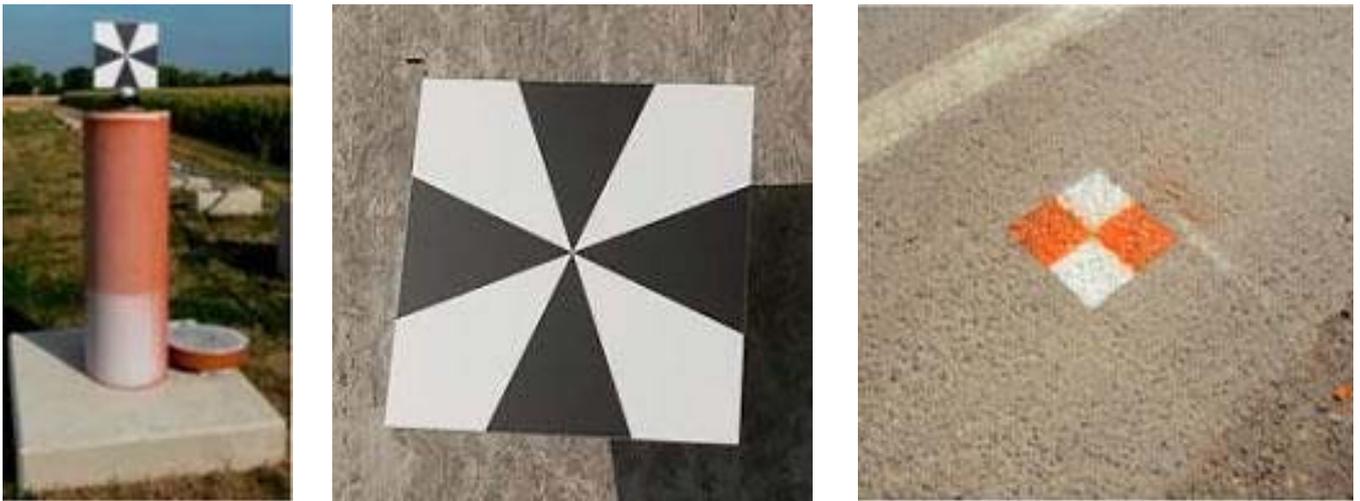


Рис. 5. Марки для калибровки систем МЛС



Рис. 6. Программные модули проектирования

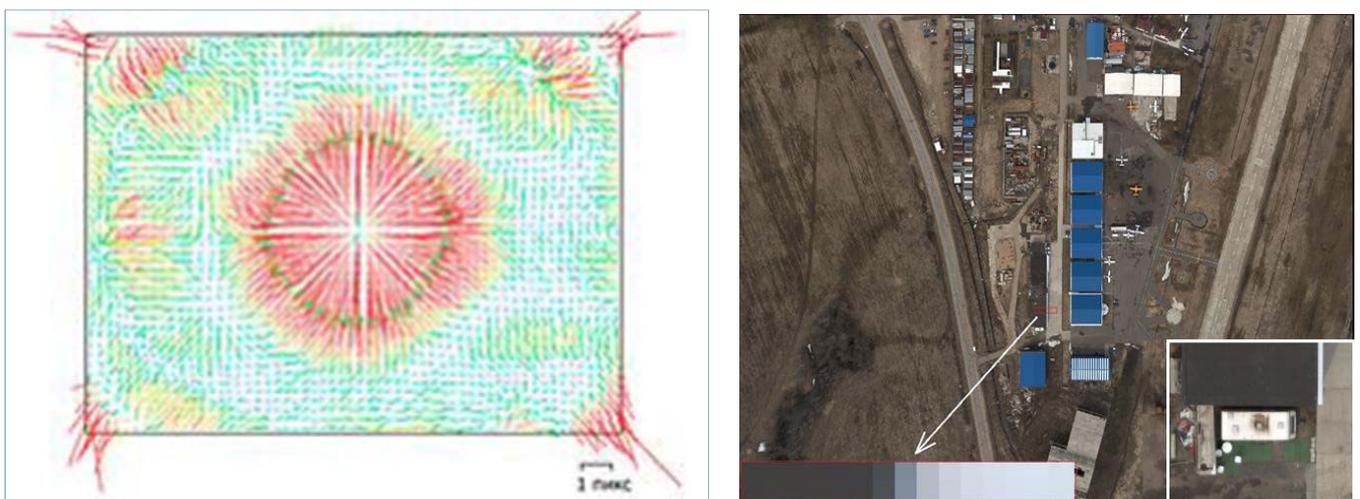


Рис. 7. Программные модули обработки аэрофотоснимков

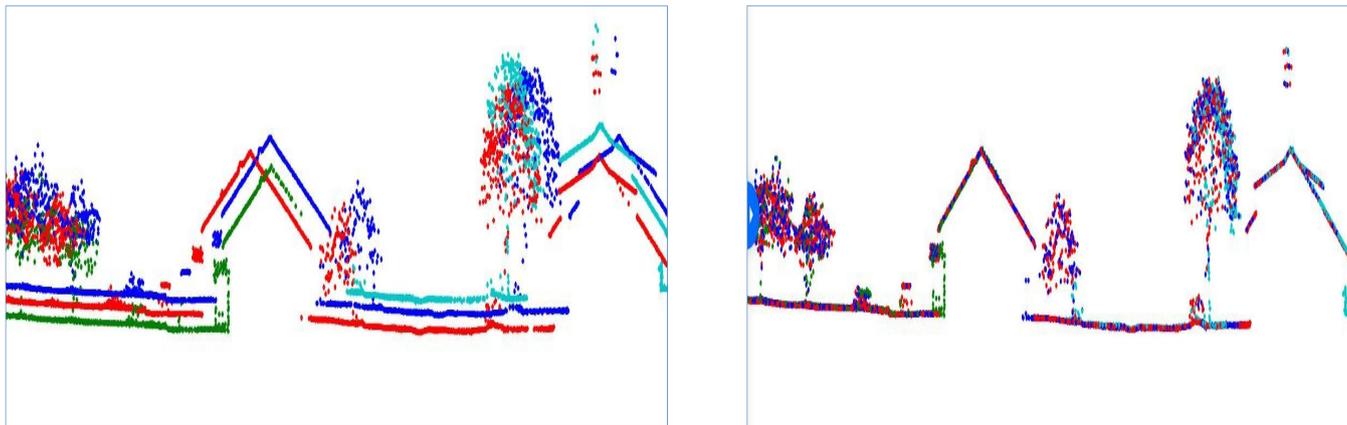


Рис. 8. Программный модуль обработки данных воздушного лазерного сканирования

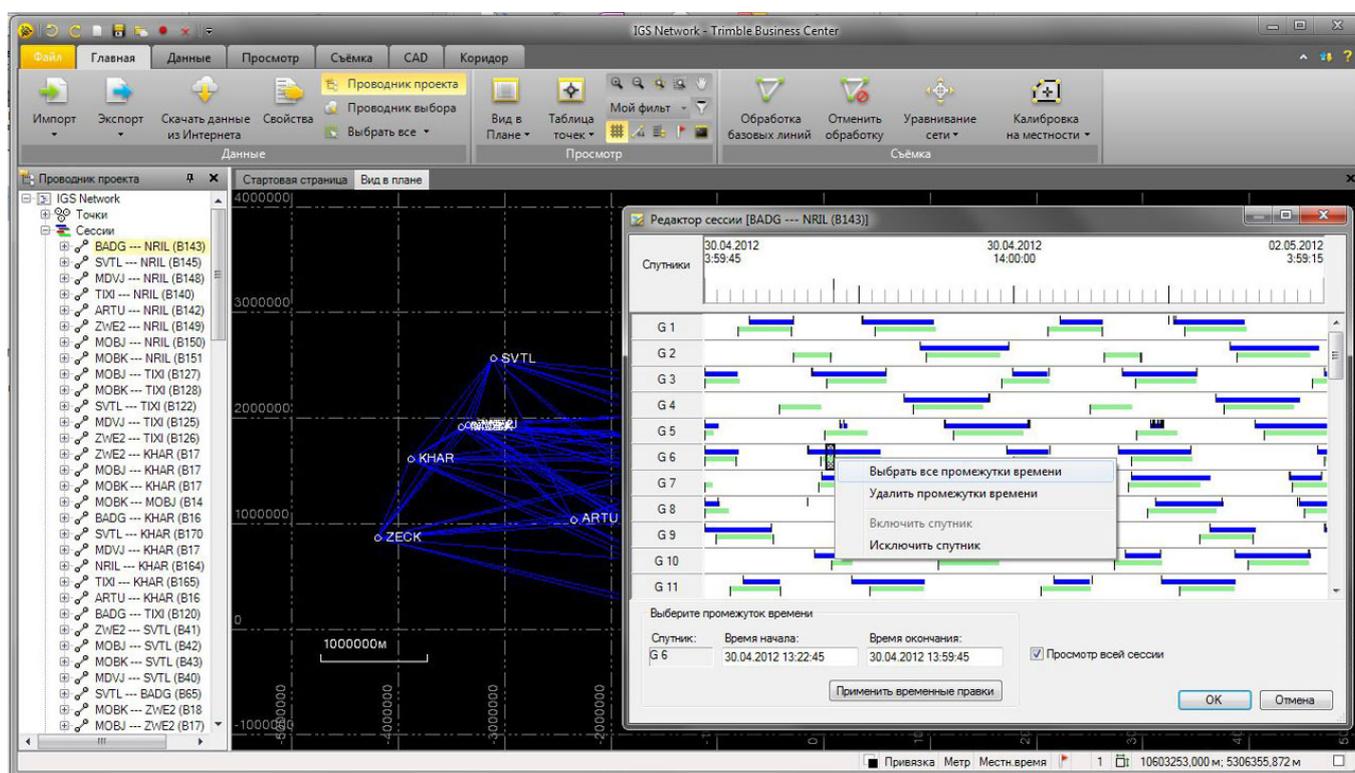


Рис. 9. Программный модуль обработки данных спутниковых геодезических измерений

2. Программное обеспечение для обработки материалов пилотируемой и беспилотной аэрофотосъемки (рис. 7) и данных воздушного лазерного сканирования (ЦФС Фотомод, Agisoft Metashape) (рис. 8).

3. Программное обеспечение для полевой и камеральной обработки спутниковых геодезических измерений с возможностью обработки статических, кинематических и РР-измерений (Topcon Magnet Office) (рис. 9).

Заключение

Создание тестового фотограмметрического полигона обеспечит возможность исследования и фотограмметрической калибровки цифровых аэрофотосъемочных камер, систем лазерного ска-

нирования, в том числе предназначенных для установки на беспилотных воздушных судах, позволит стандартизировать методики полевых исследований и оценки программно-аппаратных комплексов для сбора пространственных данных, полевых испытаний разрабатываемых и эксплуатируемых образцов аэросъемочной техники и средств навигации.

В плане организационно-методических требований ТФП должен быть приближен к территории выполнения производственных работ. Во-первых, калибровочные параметры, получаемые таким образом, будут в большей степени соответствовать реальным условиям эксплуатации аэрофотокамеры, во-вторых, это обеспечит минимальное по времени отвлечение бортового аэросъемочного оборудо-

дования от производственного процесса. В результате калибровки будут определены элементы внутреннего ориентирования камеры и параметры дисторсии объектива, необходимые для последующих фотограмметрических измерений, а дополнительные тест-объекты для систем лазерного сканирования позволят оценить точность построения трехмерных моделей.

Создание и эксплуатация отечественных фотограмметрических полигонов позволит исключить финансовые затраты на выполнение калибровок фирмами-изготовителями бортового аэросъемочного оборудования, а также способствует развитию исследований беспилотных воздушных систем.

Литература

- Быков А. Л. Исследование методика калибровки аэрофотокамер на равнинном испытательном полигоне // Геодезия и картография. 2012. № 6. С. 32–35.
- Васильев Л. Н., Воробейчик Г. В., Антипов И. Т., Пантелева В. С. Калибровка аэрофотоаппаратов по снимкам испытательного полигона // Геодезия и картография. 1974. № 10. С. 40–49.
- Голуб Д. А., Денисенко Д. В., Мазуркевич А. В. Метрологическое обеспечение авиационных измерительных систем геодезического назначения // Геопрофи. 2017. № 4. С. 19–23.
- Гончаров А. П., Гладышев Г. В. Эталонный фотограмметрический полигон. Тр. НИИПГ. 1980. Вып. 5. Применение фотограмметрии в картографических и инженерных работах. С. 107–115.
- Кадничанский С. А., Клестов Д., Курков М. В., Кохановский В. А. Требования к программно-аппаратным комплексам беспилотной аэрофотографической съемки и фотограмметрическая калибровка аэрофотокамер. Доклад на XIII Международной научно-практической конференции «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка», 10–11 февраля 2022 г.
- Кадничанский 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.
- Макаренко Н. Л., Неверов Л. В., Нехин С. С. и др. Плодотворное сотрудничество // Геодезия и картография. 1994. № 11. С. 16–19.
- Мицевич Л. А., Прус Е. А. Опыт создания эталонного метрологического полигона для поверки бортового геодезического оборудования и калибровки аэросъемочного оборудования беспилотных авиационных систем // Доклад на IV Совместной международной научно-технической конференции «Цифровая реальность: космические и пространственные данные, технологии обработки», Минск, 16–19 сентября 2024 г. Материалы конференции 16–19 сентября, 2024. Минск, Республика Беларусь, 2024. С. 79–82.
- Приказ Минпромторга от 31 июля 2020 г. № 2510 «Об утверждении порядка проведения поверки средств измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке».
- Nekhin S. S. Test object photographs for experimental estimation of aerial survey camera and field calibration of photographs // In ISPRS. 1984. Vol. XXV, Part A3b. P. 819–825.