

На правах рукописи

Дедкова Валерия Вячеславовна



Совершенствование методики обработки материалов аэрофотосъемки  
с беспилотного воздушного судна  
для трехмерного моделирования территорий

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
Комиссаров Александр Владимирович.

Официальные оппоненты:

Шаповалов Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству», проректор по научной, инновационной деятельности и цифровой трансформации;

Аникеева Ирина Александровна, кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Сигма Метрикс», начальник отдела аэросъемочных работ.

Ведущая организация – Акционерное общество «Урало-Сибирская Гео-Информационная Компания» (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится 22 декабря 2022 г. в 15-00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/dedkova-valeriya-vyacheslavovna/>

Автореферат разослан 1 ноября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.  
Подписано в печать 18.10.2022. Формат 60 × 84 1/16.  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 171.  
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Цифровизация производственной деятельности затронула и область решения геопространственных задач. Пространственное отображение объектов в форме традиционных топографических карт и планов замещается его представлением в трехмерном виде. Для создания трехмерных моделей объектов и территорий, в первую очередь, требуется пространственная основа, которую возможно получить методами современной фотограмметрии, по материалам аэрофотосъемки (АФС) с беспилотных воздушных судов (БВС). Трехмерные модели должны отличаться высокой степенью детальности и позволять выполнять измерения по ним.

Беспилотные воздушные суда становятся распространенным средством проведения аэрофотосъемочных работ. Результаты съемки находят применение в решении широкого круга задач гражданского назначения: трехмерное моделирование объектов и территорий; проектирование и инженерные изыскания в строительной отрасли, инвентаризация и учет земель, картографирование территорий в крупных масштабах; архитектура, кадастр; мониторинг инженерных сооружений и объектов, изучение и реконструкция объектов культурного и археологического наследия и т. д.

Конкуренентоспособность съемки с БВС обеспечивается возможностью выполнения съемочных работ в короткие сроки и требует меньших финансовых и трудовых затрат в сравнении с привлечением пилотируемой авиации. Преимуществом съемки с БВС, в сравнении с космической съемкой, является возможность получения данных с необходимым ограниченным пространственным охватом исследуемой территории.

К проблемам внедрения и уверенного использования БВС в аэрофотосъемке относятся:

- отсутствие детально проработанных технологических и методических решений по выполнению съемки с БВС;

– недостаток стандартизированных подходов в последующей обработке результатов съемки;

– конструкция некоторых БВС, используемых для аэрофотосъемки, выступает ограничительным фактором в выборе полезной нагрузки – цифровых камер, часть из которых относится к съемочному оборудованию любительского класса и не обладает необходимыми метрическими характеристиками для проведения аэрофотосъемочных работ.

Исходя из вышеизложенного, тема диссертационного исследования «Совершенствование методики обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна для трехмерного моделирования территорий» является актуальной и способствует расширению знаний в области дистанционного зондирования и фотограмметрии.

*Степень разработанности темы.* Вопросы разработки технологических и методологических требований к производству аэрофотосъемочных работ, обработки материалов аэрофотосъемки, внедрения современных средств производства в области фотограмметрии и дистанционного зондирования, использования БВС в целях картографирования и моделирования территорий исследованы и представлены в научных трудах Антипова И. Т., Адрова В. Н., Алябьева А. А., Быкова Л. В., Гука А. П., Кадничанского С. А., Карпика А. П., Комиссарова А. В., Костюка А. С., Михайлова А. П., Хлебниковой Т. А., Шаповалова Д. А., Широковой Т. А., Чибуничева А. Г. Решение прикладных задач с применением БВС представлено в трудах зарубежных специалистов: Gruen A., Konecny G., Colomina I., Molina P., Eisenbeiss H., Strecha Ch. и др.

Труды названных ученых легли в основу теоретической и практической базы современной фотограмметрии, научной и производственной деятельности, что сделало возможным развитие цифровых технологий и автоматизацию процессов в области фотограмметрии. По результатам теоретических и практических исследований разработаны инструкции к выполнению фотограмметрических работ. Современное состояние и будущее развитие науки в сфере фотограм-

метрии предполагает исследования, направленные на повышение точности измерений и результатов обработки, расширение теоретической базы, а также сокращение сроков получения готовой продукции.

*Цель и задачи исследования.* Целью исследования является совершенствование методики фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки, производственное применение которой позволит повысить точность и сократить затраты на трехмерное моделирование территорий по материалам аэрофотосъемки с БВС. Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- выполнить анализ литературных и интернет-источников для определения основных сфер применения материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов, сделать обзор применяемых БВС;
- выполнить анализ съемочного оборудования, используемого при аэрофотосъемке с БВС, программного обеспечения для фотограмметрической обработки полученных материалов и предложить их классификацию;
- разработать методику учета искажений в координатах точек на снимках, вызванных влиянием шторно-щелевого затвора и на ее основании разработать решения по усовершенствованию существующей методики фотограмметрической обработки данных, полученных с БВС;
- выполнить экспериментальные исследования предложенной усовершенствованной методики моделирования территорий по материалам, полученным с БВС.

*Объектом исследования* является теория получения изображений при аэрофотосъемке с беспилотных воздушных судов. *Предметом исследования* является методика фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки.

*Научная новизна исследования.* Научная новизна выполненного исследования заключается в следующем:

- в разработке методики учета искажений, вызванных влиянием шторно-щелевого затвора при выполнении аэрофотосъемки с БВС, позволяющей исполь-

зовать более доступные типы цифровых неметрических камер для трехмерного моделирования территории;

– в усовершенствовании методики фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов, которая позволяет повысить точность получаемых материалов.

*Теоретическая и практическая значимость работы.* Теоретическая значимость выполненного исследования заключается в дополнении технологических и методических основ выполнения фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БВС. *Практическая значимость* заключается в том, что разработанные технологические решения и принципы расчета точности технологических операций при обработке материалов с беспилотных воздушных судов позволят расширить область применения дистанционного зондирования и фотограмметрии, а также унифицируют решение производственных задач.

*Методология и методы исследований.* Методологической и теоретической основой работы являются методы вычислительной математики, статистической обработки результатов измерений, приемы математического моделирования, подходы и методы исследований, применяемые в фотограмметрии.

*Положения, выносимые на защиту:*

– усовершенствованная методика фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БВС для трехмерного моделирования территорий, позволяющая повысить точность создаваемой продукции;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований точности фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна, и разработанные на их основе практические рекомендации позволяют получать необходимые материалы для трехмерного моделирования территорий;

– методика исследования цифровых неметрических камер со шторно-щелевыми затворами, позволяющая делать заключение об их пригодности при аэрофотосъемке с различных типов БВС.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Основные положения диссертации соответствуют областям исследования: 2 – Разработка и исследование технических средств и технологий, фиксирующих в виде изображений различные элементы объектов исследований и 3 – Теория, технология и технические средства сгущения по аэрокосмическим снимкам геодезических сетей, создания и обновления топографических, землеустроительных, экологических, кадастровых и иных карт и планов паспорта научной специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

*Степень достоверности и апробация результатов исследования.* Основные результаты докладывались и обсуждались на XIV Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2018 г., Новосибирск); III Национальной научно-практической конференции «Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения» (2019 г., Новосибирск); Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (2020, 2022 гг., Красноярск).

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс при изучении дисциплины «Современные методы и средства фотограмметрии и дистанционного зондирования» в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий».

Диссертация подготовлена по результатам исследований, полученных в рамках выполнения гранта, предоставленного в форме субсидии на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития в рамках подпрограммы «Фундаментальные научные исследования для долгосрочного развития и обеспечения конкурентоспособности общества и государства» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации», проект «Социально-экономическое развитие Азиатской России на основе синергии транспорт-

ной доступности, системных знаний о природно-ресурсном потенциале, расширяющегося пространства межрегиональных взаимодействий», номер соглашения с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-804 (внутренний номер гранта № 13.1902.21.0016).

Диссертационные исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

*Публикации по теме диссертации.* Результаты научных исследований представлены в 8 научных статьях, 3 из которых – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 137 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы, включающего 122 наименования, содержит 17 таблиц, 54 рисунка, 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Во введении* обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов исследований, структура диссертации.

*Первый раздел* диссертации посвящен аналитическому обзору и анализу применения беспилотных воздушных судов в фотограмметрии и трехмерном моделировании. Описаны сферы применения трехмерных моделей, построенных по материалам аэрофотосъемки с БВС, приведена классификация беспилотных



воздушных судов, представлены цифровые камеры, используемые для аэрофотосъемки с БВС, и программное обеспечение для обработки снимков.

Трехмерные модели широко применяются для изучения объектов и их реконструкции, в планировании и проведении мероприятий по защите и сохранению объектов культурного и археологического наследия, для оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и организации работ по их ликвидации с целью минимизации ущерба промышленному предприятию, окружающей среде и жизни человека. Цифровые трехмерные прототипы промышленных объектов позволяют отслеживать их жизненный цикл на всех стадиях, оптимизировать производственные процессы и планировать экономику предприятия. Трехмерные модели городских территорий (рисунок 1) используются в рамках развития концепции «умных» городов и предназначены для совершенствования системы городского управления и развития городских территорий.

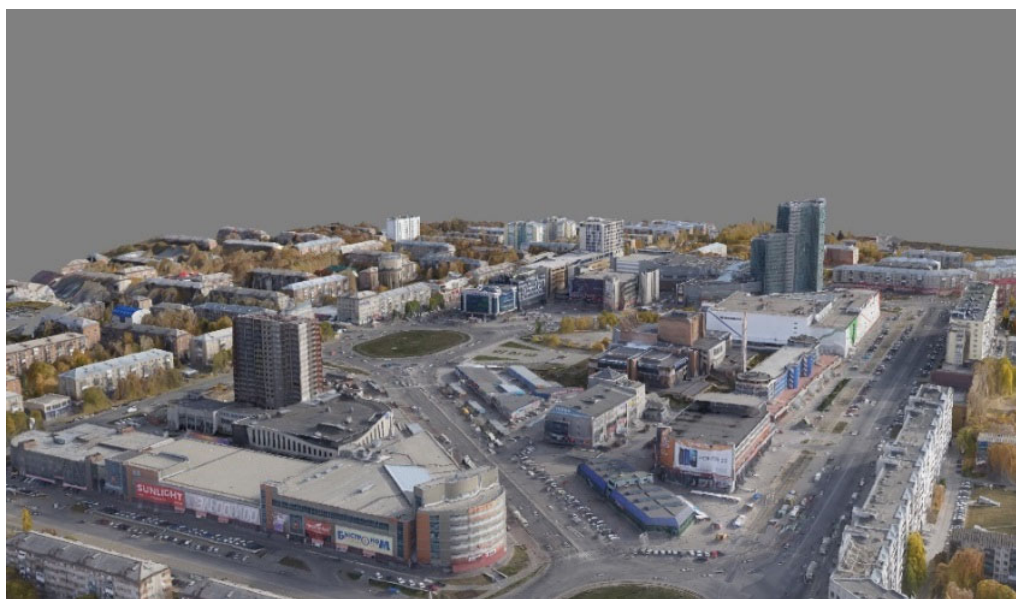


Рисунок 1 – Трехмерная модель городской территории, построенная в Agisoft Metashape

В качестве основы для моделирования используются материалы аэрофотосъемки с БВС различного типа. БВС мультироторного типа применяются для детальной съемки объекта с близкого расстояния, при исследовании линейных объ-

ектов, либо небольшой по площади территории, например, отдельного района города. БВС самолетного или комбинированного типов предназначены, в основном, для аэрофотосъемки территорий со значительным пространственным охватом.

В зависимости от целей и задач летно-съёмочных работ в состав полезной нагрузки беспилотного воздушного судна входят: RGB-фотокамеры со шторно-щелевым или центральным затвором, мультиспектральные камеры, тепловизоры и лидары. Многие модели цифровых камер, представленные в бюджетном сегменте, оснащены шторно-щелевым затвором, где формирование изображения осуществляется построчно. Смещение точек на снимках, вызванное применением шторно-щелевого затвора, приводит к ошибкам в определении координат точек местности и, в целом, снижает качество трехмерного моделирования.

Для фотограмметрической обработки результатов аэрофотосъемки с БВС применяется программное обеспечение (ПО), разработанное как отечественными, так и зарубежными компаниями. Современное ПО позволяет выполнять полный цикл обработки снимков с высокой степенью автоматизации процессов, однако не во всех программах реализована компенсация искажений, вызванных влиянием шторно-щелевых затворов, что требует разработки усовершенствованной методики фотограмметрической обработки снимков, позволяющей устранять такие искажения.

*Во втором разделе* представлено теоретическое и методологическое обоснование усовершенствованной методики фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна.

В состав съёмочного оборудования для аэрофотосъемки с БВС входят цифровые камеры со шторно-щелевыми или электронно-сканирующими затворами. Для исключения негативного влияния работы шторно-щелевого затвора на качество снимков необходимо определять величины искажений и вводить соответствующие поправки, особенно, если на беспилотном воздушном судне отсутствует гиросtabilизированная платформа.

Учет и исправление искажений, вызываемых шторно-щелевыми затворами, можно осуществить тремя способами. Первый способ – технологический, включающий в себя проектирование аэрофотосъемки и выбор съемочного оборудования. В этом случае на этапе проектирования аэрофотосъемочных работ, для уменьшения влияния шторно-щелевого затвора на качество фотограмметрической обработки снимков, необходимо планировать маршруты в двух направлениях, например, «запад-восток» и «север-юг». Вторым способом компенсации влияния шторно-щелевого затвора является программный учет усредненных искажений. Так, например, в цифровой фотограмметрической системе PHOTOMOD влияние эффекта шторно-щелевого затвора устраняется за счет составления математической модели искажений цифровой камеры и вычисления систематических ошибок снимков блока. Еще одним вариантом компенсации является расчет модели искажений снимка и внесение соответствующих поправок отдельно для каждого снимка (ПО Agisoft Metashape). Третий способ предусматривает предварительную обработку снимков, в процессе которой снимки приводятся к центральной проекции. Для этого требуется информация как о внешних факторах, влияющих на съемочную камеру в момент формирования снимков, – скорость воздушного судна и ее изменение, угловые элементы внешнего ориентирования (ЭВО) снимков и скорость их изменения, так и о параметрах шторно-щелевых затворов – значения эффективной и фактической выдержек.

Для определения названных параметров проведены экспериментальные исследования. В качестве исследуемой цифровой камеры выбрана камера Sony Alpha 6000 со шторно-щелевым затвором, размещенная на борту БВС самолетного типа Supercam S350.

Эффективная ( $t_{\text{эф}}$ ) и фактическая ( $t_{\text{ф}}$ ) выдержки цифровой камеры Sony Alpha 6000 определялись с помощью специального измерительного стенда с лентами светодиодов, переключение которых происходит по принципу бегущей волны с интервалом времени, значительно меньшим времени работы шторно-

щелевого затвора камеры. В ходе выполненных экспериментальных исследований установлено, что для камеры Sony Alpha 6000  $t_{\text{эф}} = 1/794$  с и  $t_{\text{ф}} = 1/250$  с.

С целью определения динамики изменения скорости воздушного судна в процессе аэрофотосъемки проведен эксперимент, в ходе которого определялась скорость, с которой БВС преодолевало расстояние за время между получением соседних снимков в маршруте. Скорость рассчитывалась, исходя из разницы значений координат центров фотографирования двух соседних снимков и интервала фотографирования. На основе вычислений установлено, что средняя скорость беспилотного воздушного судна самолетного типа  $W_{\text{ср}}$  в ходе проведения аэрофотосъемки составила 23 м/с. Анализ изменения скорости позволил выявить участок съемки с максимальными отклонениями в рассчитанных значениях скорости, достигающих значений до 37 м/с. При этом скачкообразное изменение скорости движения воздушного судна, как правило, обусловлено его заходом на смежный маршрут или спровоцировано влиянием условий внешней среды. После определения маршрута с максимальным отклонением значения скорости БВС проведена фотограмметрическая обработка снимков данного участка аэрофотосъемки в ПО Agisoft Metashape, в котором предусмотрена функция компенсации влияния шторно-щелевого затвора. Всесторонний анализ полученных данных показал, что применение программных алгоритмов компенсации влияния шторно-щелевых затворов позволяет повысить точность определения планового положения опорных точек в среднем на 20 %.

С целью определения изменения элементов внешнего ориентирования снимков в процессе аэрофотосъемки выполнен эксперимент с установкой на БВС бортового самописца, фиксирующего угловые элементы внешнего ориентирования с частотой от 8 до 11 значений в секунду. На основе анализа полученных данных было установлено, что изменение ЭВО происходит линейно. Расчет угловых скоростей по записям самописца позволил выявить, что в 80 % случаев максимальное изменение крена не превышает  $10^\circ$  в секунду.

На основании результатов проведенных экспериментов сгенерированы и обработаны макетные снимки без искажений ( $\alpha, \omega, \kappa, d\alpha, d\omega, d\kappa = 0^\circ, W = 0$  м/с), с искажениями ( $\alpha = 5^\circ, \omega = 5^\circ, \kappa = 0^\circ, d\alpha = 0^\circ, d\omega = 0,04^\circ, d\kappa = 0^\circ, W = 23$  м/с) и с введением поправок за искажения. Анализ результатов выполненной оценки точности позволил установить, что проведение только программной компенсации искажений позволило повысить точность определения планового положения опорных и контрольных точек в среднем на 27 %. Введение поправок за искажения снимков на этапе их предварительной обработки и применение программных алгоритмов компенсации влияния шторно-щелевого затвора позволили повысить точность определения планового положения опорных и контрольных точек в среднем на 36 %. Таким образом, этап предварительной обработки снимков включает в себя ввод поправок в координаты точек снимков для исключения искажений, вызванных влиянием шторно-щелевого затвора, на основе данных лабораторного исследования цифровой камеры и анализа данных с устройств, фиксирующих линейные и угловые перемещения беспилотного воздушного судна. Алгоритм предварительной обработки снимков представлен на рисунке 2.

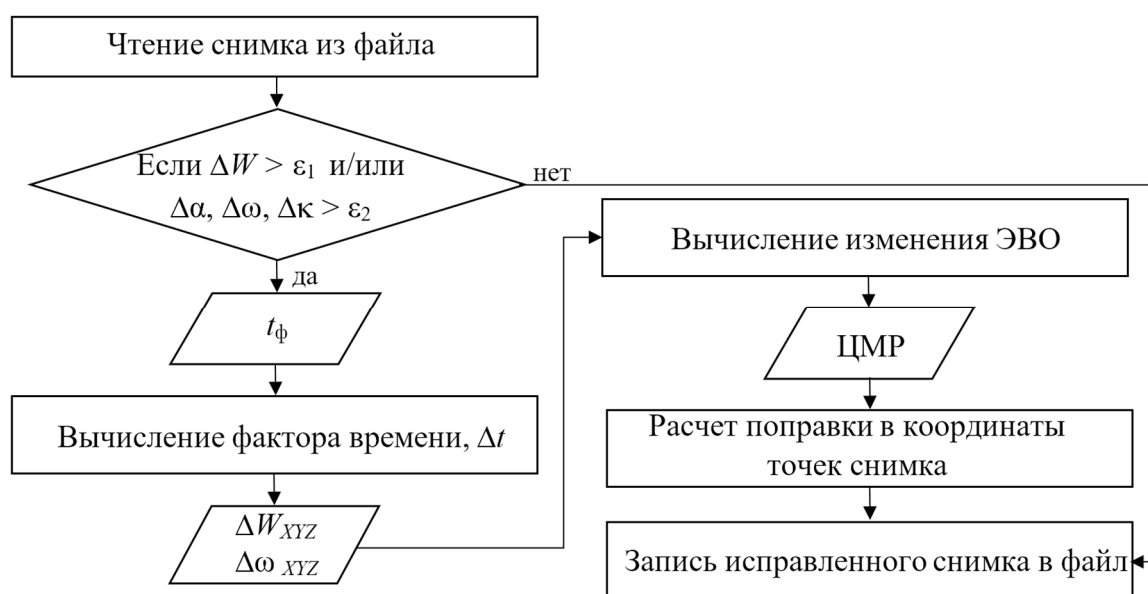


Рисунок 2 – Алгоритм предварительной обработки снимков, полученных с помощью цифровой камеры со шторно-щелевым затвором

На основании теоретических и экспериментальных исследований была усовершенствована методика фотограмметрической обработки снимков, полученных с беспилотных воздушных судов с помощью цифровой камеры со шторно-щелевым затвором. Схема методики приведена на рисунке 3, где цветом выделены дополненные или измененные этапы методики.



Рисунок 3 – Схема усовершенствованной методики обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов для трехмерного моделирования территорий

В соответствии с данной методикой на этапе составления рабочего проекта аэрофотосъемки необходимо проводить лабораторное исследование цифровой

неметрической камеры со шторно-щелевым затвором с целью определения ее параметров – фактической выдержки  $t_{\text{ф}}$  и эффективной выдержки  $t_{\text{эф}}$ . На этапе проведения аэрофотосъемки необходимо выполнять фиксацию скорости изменения линейных и угловых перемещений воздушного судна с помощью дополнительного устройства на борту. Для сокращения временных затрат на идентификацию соответствия измерений с бортовой инерциальной системы, бортового ГНСС-приемника и бортового самописца рекомендуется обеспечивать синхронизацию их работы.

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований, целью которых была фотограмметрическая обработка изображений, полученных в результате аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна самолетного типа Supercam S350 с размещенной на борту цифровой неметрической камерой Sony Alpha 6000 со шторно-щелевым затвором. Аэрофотосъемка выполнялась на высоте около 275 м в двух направлениях А и Б (рисунок 4) с размером пикселя на местности около 5 см. Продольное и поперечное перекрытие снимков в маршрутах составляло 80 и 60 % соответственно. Аэрофотосъемка проводилась в ясную погоду, скорость ветра менялась от 6 до 8 м/с в южном направлении.

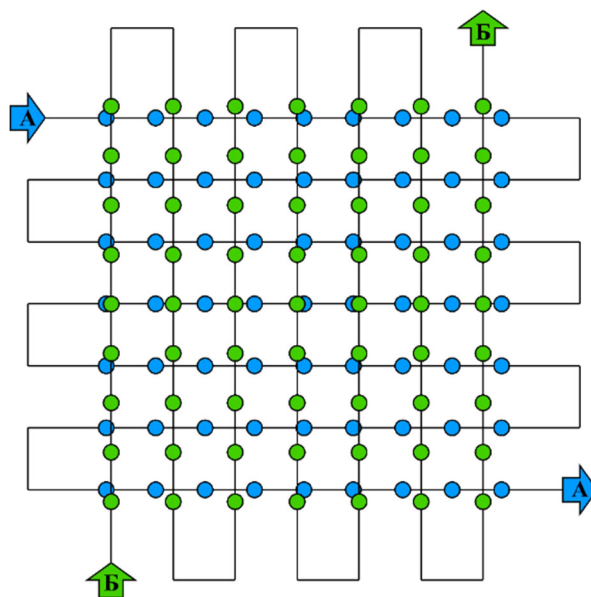


Рисунок 4 – Схема выполнения аэрофотосъемки

Координаты точек планово-высотного обоснования определялись с помощью геодезического приемника Javad Triumph-1M в режиме Real Time Kinematic от постоянно действующей базовой станции (ПДБС) NSKW в сети ПДБС Новосибирской области. Средняя квадратическая погрешность (СКП) определения координат и высот точек составила порядка 0,035 м.

Фотограмметрическая обработка проекта выполнялась в ПО Agisoft Metashape, версия 1.8.4. Выбор программного обеспечения для фотограмметрической обработки был обоснован наличием в нем функции компенсации влияния шторно-щелевого затвора на качество фотограмметрических построений.

Фотограмметрическое сгущение опорной сети выполнялось с использованием координат опорных точек, для контроля построения сети использовались контрольные точки (рисунок 5).

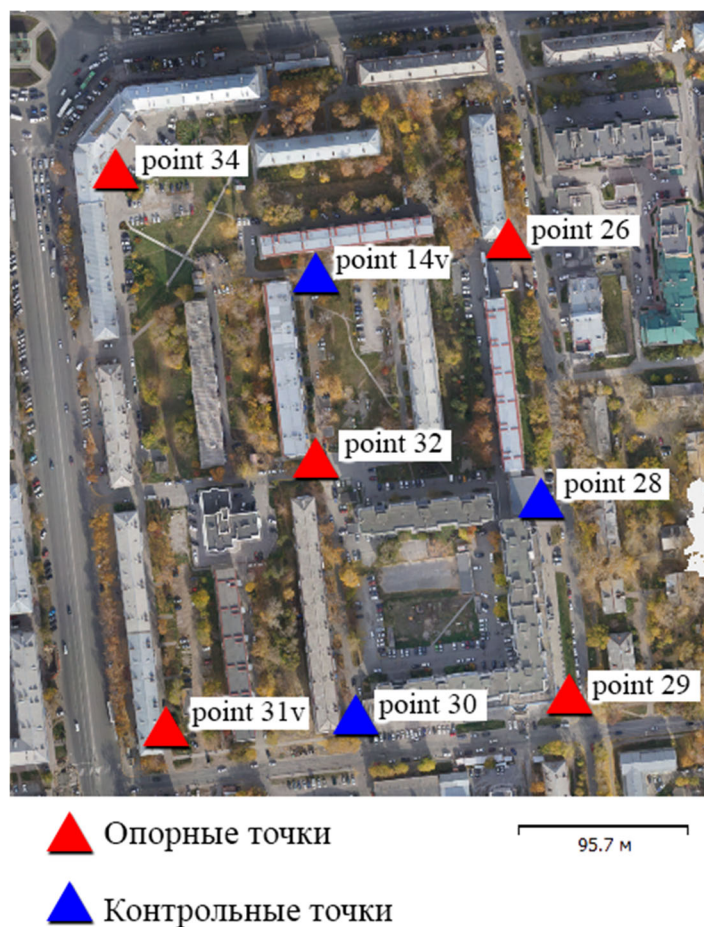


Рисунок 5 – Схема расположения опорных и контрольных точек



Всего было выполнено три эксперимента. В каждом эксперименте проводилось два вида обработки снимков: без активации функции компенсации эффекта шторно-щелевого затвора (Обработка № 1) и с активацией данной функции (Обработка № 2).

В первом эксперименте проводились два вида фотограмметрической обработки блока из 111 снимков, расположенных в маршрутах в двух направлениях АБ, как показано на рисунке 4. Результаты оценки точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции по снимкам первого эксперимента

Вид обработки	Назначение точек	СКП X, м	СКП Y, м	СКП Z, м	СКП XY, м
Эксперимент № 1					
Обработка № 1	Опорные точки	0,059	0,046	0,039	0,075
	Контрольные точки	0,073	0,049	0,079	0,089
Обработка № 2	Опорные точки	0,048	0,034	0,070	0,059
	Контрольные точки	0,071	0,056	0,081	0,091

На рисунке 6 представлена трехмерная модель местности, полученная в результате фотограмметрической обработки снимков в первом эксперименте.



Рисунок 6 – Трехмерная модель территории с текстурой

Из проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- материалы аэрофотосъемки, проводимой в двух направлениях, позволяют осуществлять моделирование городской застройки с достаточной информацией для текстурирования фасадов зданий;
- обработка снимков с компенсацией влияния шторно-щелевого затвора позволяет повысить точность фотограмметрических построений в среднем на 10 %.

Второй и третий эксперименты включали в себя по два вида фотограмметрической обработки снимков, аналогичных первому эксперименту. Во втором эксперименте проводилась обработка блока из 57 снимков, принадлежащих маршрутам аэрофотосъемки в направлении А, а в третьем обрабатывалось 54 снимка, расположенных в маршрутах в направлении Б (рисунок 4). Результаты оценки точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты оценки точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции по снимкам второго и третьего экспериментов

Вид обработки	Назначение точек	СКП X, м	СКП Y, м	СКП Z, м	СКП XY, м
Эксперимент № 2					
Обработка № 1	Опорные точки	0,025	0,035	0,044	0,043
	Контрольные точки	0,079	0,075	0,085	0,109
Обработка № 2	Опорные точки	0,015	0,023	0,066	0,027
	Контрольные точки	0,069	0,063	0,010	0,094
Эксперимент № 3					
Обработка № 1	Опорные точки	0,063	0,063	0,058	0,089
	Контрольные точки	0,095	0,053	0,129	0,109
Обработка № 2	Опорные точки	0,048	0,028	0,041	0,055
	Контрольные точки	0,069	0,075	0,083	0,101

В результате выполнения фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки в одном направлении установлено:

- программное введение поправок в координаты точек снимков за влияние шторно-щелевого затвора позволило повысить точность определения координат

опорных и контрольных точек в среднем на 25 % во втором эксперименте и в среднем на 22 % – в третьем эксперименте;

– для построения текстурированной трехмерной модели территории недостаточно материалов аэрофотосъемки, выполненной только в одном направлении (А или Б), что представлено на рисунке 7.



Рисунок 7 – Трехмерная модель территории, построенная по снимкам аэрофотосъемки в направлении А

Контроль построения цифровых моделей местности осуществлялся путем вычитания поверхностей. Для этого созданы карты разностей поверхностей в программном обеспечении QGIS. В качестве опорной модели принята цифровая модель местности, построенная в результате фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки по перекрестным маршрутам (АБ).

В первом случае проведено вычитание поверхностей опорной цифровой модели местности и модели, полученной в результате фотограмметрической обработки снимков маршрутов в одном направлении А. Во втором случае карта разностей поверхностей создавалась на основе карт высот опорной модели АБ и мо-

дели местности, построенной по снимкам маршрутов, проложенных в направлении Б. На рисунке 8 представлены карты разностей поверхностей.

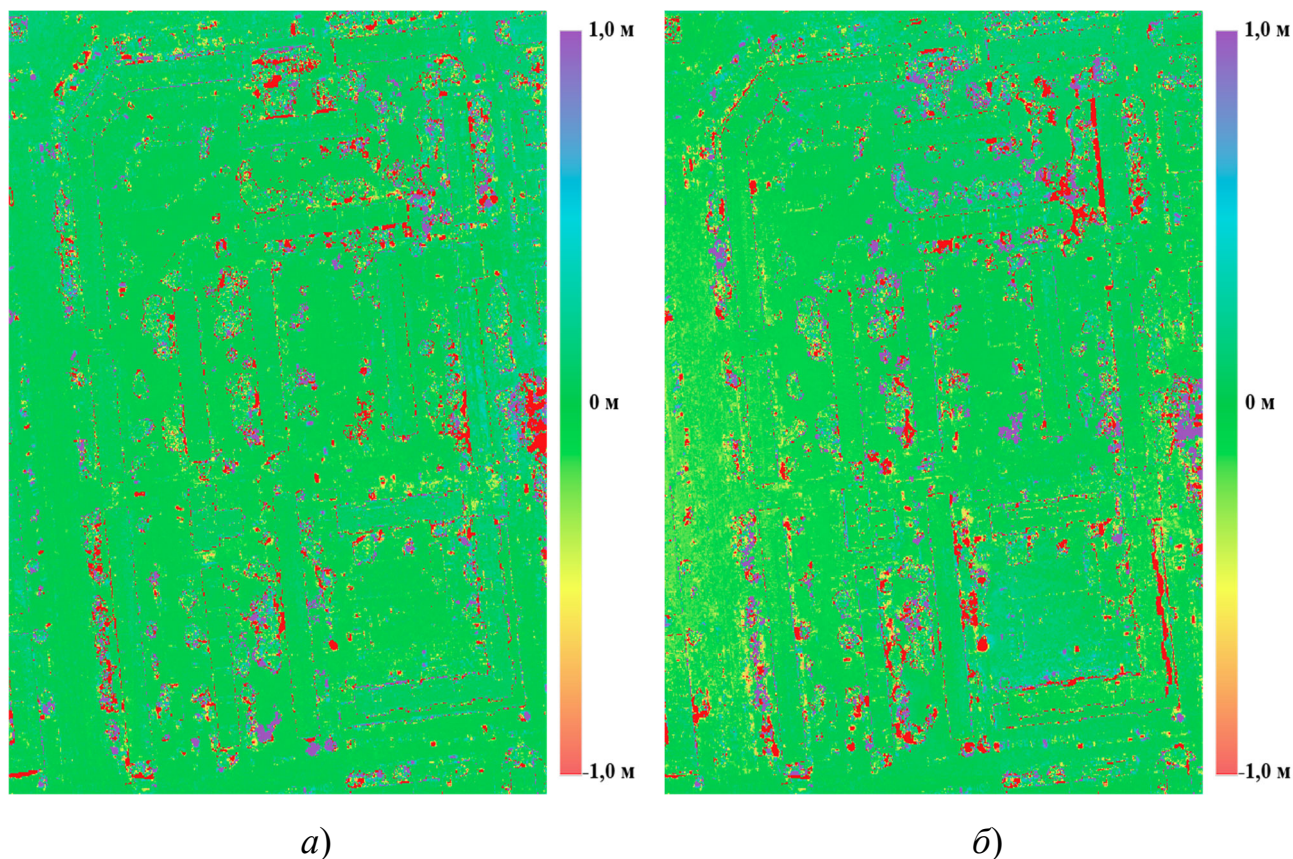


Рисунок 8 – Карта разностей двух поверхностей цифровых моделей местности:

*а) АБ-А; б) АБ-Б*

На основании полученных результатов проведенных исследований установлено:

– появление линейных контуров на разностных изображениях (см. рисунок 8) связано с отличиями в определении местоположения высотных объектов (здания, деревья), погрешность определения планового положения границ объектов для карты разностей АБ-А составляет 17,6 см, для карты разностей АБ-Б – 15,0 см, что соответствует априорной оценке точности построения трехмерных моделей по материалам аэрофотосъемки;

- по снимкам перекрестных маршрутов более надежно восстанавливаются основания высотных объектов, экранированных древесными насаждениями;
- наличие на разностном изображении кластеров со значительными расхождениями высот объектов неправильной формы характерно для древесной растительности и различных динамических объектов (движущийся транспорт, группы перемещающихся людей, изменение положения крон деревьев в результате порывов ветра);
- сопоставление разностных изображений (см. рисунок 8, *а* и рисунок 8, *б*) указывает на различие в отображении динамических объектов, обусловленное временем между съемками в направлениях А и Б.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований достигнута поставленная цель по совершенствованию существующей методики фотограмметрической обработки материалов, полученных с беспилотных воздушных судов для моделирования территорий.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования, заключаются в следующем:

- выполнен анализ литературных и интернет-источников, в ходе которого были определены основные сферы применения материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов, сделан обзор применяемых БВС, что показало широкое использование аэрофотосъемки с БВС для решения задач, связанных с трехмерным моделированием территорий, что позволило сформулировать цели и задачи диссертационного исследования;
- выполненный анализ съемочного оборудования, используемого при аэрофотосъемке с БВС, позволил установить, что в большинстве случаев используются цифровые неметрические камеры со шторно-щелевым или электронно-сканирующим затвором и ряд из известных программных продуктов для фото-

грамметрической обработки материалов аэрофотосъемки БВС не имеет функциональных возможностей выполнения учета искажения ортоскопии, вызываемых особенностями формирования изображений шторно-щелевыми и электронно-сканирующими затворами, что отрицательно влияет на точность получаемых данных при обработке. Кроме этого, в результате анализа предложена классификация съемочного оборудования и программного обеспечения;

– разработана усовершенствованная методика фотограмметрической обработки данных, полученных с БВС с учетом искажений в координатах точек на снимках, вызванных влиянием шторно-щелевого затвора. Применение данной методики позволяет повысить точность получаемой метрической информации аэрофотосъемочными системами, оснащенными шторно-щелевыми и электронно-сканирующими затворами;

– проведены экспериментальные исследования усовершенствованной методики моделирования территорий по материалам, полученным с БВС, показавшие повышение точности при построении трехмерной модели территории по материалам аэрофотосъемки с БВС.

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию в организациях, осуществляющих как аэрофотосъемочные работы, так и обработку полученных материалов в целях сокращения финансовых затрат на приобретение дорогостоящего аэрофотосъемочного оборудования с возможностью использовать более доступные цифровые неметрические камеры со шторно-щелевыми затворами.

Перспективными направлениями дальнейших исследований является более детальное исследование алгоритмов программного обеспечения для фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов, а также исследование современного аэрофотосъемочного оборудования, применяемого для аэрофотосъемки с БВС, в аспекте повышения точности исходных данных и качества итоговой продукции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ  
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Дедкова, В. В. Анализ методов и средств контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов / В. В. Дедкова, А. В. Комиссаров. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 77–84. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-77-84.

2 Комиссаров, А. В. Анализ методик создания макетных снимков для проверки точности фотограмметрических построений / А. В. Комиссаров, В. В. Дедкова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 47–56. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-47-56.

3 Дедкова, В. В. Исследование точности формирования снимка камерами со шторно-щелевым затвором при съемке с беспилотных воздушных судов / В. В. Дедкова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 54–60. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-54-60.

4 Дедкова, В. В. Современные программные продукты для обработки материалов аэросъемок с беспилотных авиационных систем / В. В. Дедкова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 25–31.

5 Арбузов, С. А. Эталонный пространственный тест-объект СГУГиТ для калибровки цифровых неметрических камер / С. А. Арбузов, В. Н. Никитин, В. В. Дедкова. – Текст : непосредственный // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сборник материалов III Национальной научно-практической конференции, 27–29 ноября 2019 г.,

Новосибирск. В 2 ч. Ч. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – С. 41–45. – DOI 10.33764/2687-041X-2020-2-41-45.

6 Дедкова, В. В. Мониторинг технического состояния магистральных трубопроводов методами дистанционного зондирования / В. В. Дедкова, М. М. Шляхова. – Текст : непосредственный // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы VII Международной научной конференции, Красноярск, 29 сентября – 2 октября 2020 года / Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2020. – С. 192–195.

7 Шляхова, М. М. Перспективы применения аэросъемок для контроля состояния защитных сооружений магистральных трубопроводов / М. М. Шляхова, В. В. Дедкова. – Текст : непосредственный // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы VII Международной научной конференции, Красноярск, 29 сентября – 2 октября 2020 года / Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2020. – С. 316–318.

8 Шляхова, М. М. Контроль состояния защитных сооружений магистральных трубопроводов по материалам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна ГЕОСКАН 401 / М. М. Шляхова, В. В. Дедкова. – Текст : непосредственный // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы IX Международной научной конференции, Красноярск, 2022 г. / Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 167–169.