

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, доцент  
Комиссаров Александр Владимирович

Новосибирск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ФОТОГРАММЕТРИИ И ТРЕХМЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ.....	11
1.1 Сферы применения результатов моделирования объектов и территорий.....	11
1.2 Классификация беспилотных воздушных судов .....	18
1.3 Цифровые камеры, используемые для аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов .....	22
1.4 Программное обеспечение, используемое для обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов.....	27
1.5 Выводы по первому разделу .....	32
2 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА .....	33
2.1 Методика обработки снимков с беспилотного воздушного судна для трехмерного моделирования территорий.....	33
2.2 Обоснование выбора съемочной аппаратуры .....	45
2.3 Определение параметров шторно-щелевых затворов .....	51
2.4 Исследование влияния и учет искажений изображений, сформированных цифровой камерой со шторно-щелевым затвором.....	55
2.4.1 Способы уменьшения влияния шторно-щелевого затвора на измерительное качество снимков .....	55
2.4.2 Исследование динамики изменения скорости воздушного судна в процессе аэрофотосъемки .....	57
2.4.3 Исследование изменения элементов внешнего ориентирования в процессе аэрофотосъемки .....	63

2.4.4 Построение и фотограмметрическая обработка макетных снимков .....	67
2.5 Разработка усовершенствованной методики обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов для трехмерного моделирования территорий .....	73
2.6 Выводы по второму разделу .....	76
<b>3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	
<b>УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ .....</b>	<b>78</b>
3.1 Общие положения методики экспериментальных исследований.....	78
3.2 Построение трехмерной модели территории по материалам аэрофотосъемки в двух направлениях АБ и оценка точности фотограмметрических построений .....	83
3.3 Построение трехмерной модели территории по материалам аэрофотосъемки в одном направлении А и оценка точности фотограмметрических построений .....	89
3.4 Построение трехмерной модели территории по материалам аэрофотосъемки в одном направлении Б и оценка точности фотограмметрических построений .....	93
3.6 Контроль построения трехмерных моделей местности .....	97
3.7 Выводы по третьему разделу .....	99
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>100</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>102</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ .....</b>	<b>119</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С ПЕРЕКРЕСТНЫМИ МАРШРУТАМИ (АБ) В ПО AGISOFT METASHAPE .....</b>	<b>126</b>

ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С МАРШРУТАМИ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ (А) В ПО AGISOFT METASHARE .....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С МАРШРУТАМИ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ (Б) В ПО AGISOFT METASHARE .....	134

## ВВЕДЕНИЕ

*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.

Конкурентоспособность 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 фотограмметрии 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 использо-

вать 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 транспортной 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.

# 1 АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ФОТОГРАММЕТРИИ И ТРЕХМЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

## 1.1 Сферы применения результатов моделирования объектов и территорий

Создание фотореалистичных трехмерных цифровых моделей объектов и территорий является актуальным направлением теоретических и прикладных исследований современной фотограмметрии. Трехмерные цифровые модели – это пространственные аналоги реальных объектов местности [78], предназначенные для решения задач в различных отраслях экономики в контексте ее цифровой трансформации [28, 29].

Использование беспилотных воздушных судов (БВС) в аэрофотосъемке позволило расширить возможности трехмерного моделирования, так как беспилотная аэрофотосъемка позволяет получать аэрофотоснимки с разрешением, достаточным для высокодетализированного моделирования. В работах [17, 18, 33, 34, 43–45, 47, 58, 60, 62, 63, 68, 72, 75, 88, 89, 93, 96, 99, 105, 107, 115, 117, 118] описано создание трехмерных моделей по материалам беспилотной аэрофотосъемки для реконструкции, реставрации и учета археологических памятников, исторически значимых архитектурных сооружений и иных объектов культурного и археологического наследия (ОКН, ОАН). Помимо этого, трехмерные модели объектов и территорий могут быть использованы в качестве цифровых двойников территорий и промышленных объектов, в научной и производственной деятельности, в образовательных целях и при развитии туризма.

Применительно к решению подобных задач съемка с БВС в комплексе с неметрическими цифровыми камерами выступает доступной альтернативой более дорогим методам измерения и моделирования, таким как лазерное сканирование и традиционные геодезические съемки. В видимом диапазоне электромагнитного спектра применяются снимки с БВС для решения задач реставрации поверхностей объектов и зданий, например, восстановления деталей фасадов, элемен-

тов декора, внутренних интерьеров. Для выявления разрушительных процессов внутри конструкции на ранних стадиях и при необходимости неинвазивного исследования объектов изучения прибегают к проведению лазерного сканирования или тепловизионной съемки, что позволяет своевременно спланировать и провести восстановительные работы, точнее рассчитать объем финансовых затрат и иных необходимых ресурсов [50, 82, 85, 119].

Трехмерное моделирование позволяет более точно изучить особенности конструкции сооружений, например, в исследовании [93] была обнаружена ранее не встречавшаяся неконцентрическая форма купола церкви, что дало почву для дальнейших исследований и сравнения исторических архитектурных сооружений.

Для вертикальной съемки объектов применяются мультироторные БВС, позволяющие снимать труднодоступные участки объектов с близкого расстояния, что увеличивает детальность получаемых изображений (рисунок 1).



Рисунок 1 – Трехмерная модель объекта культурного наследия [106]

Воссоздание цифровой трехмерной копии объекта возможно при съемке с перекрытием снимков до 85 %. Трехмерное моделирование позволяет строить гипотезы о том, как объект или сооружение выглядело ранее, тем самым создавая базу для дальнейшего исторического и архитектурного анализа. Трехмерное моделирование территорий древних поселений позволяет анализировать особенности архитектурно-планировочных решений, инженерного оборудования территорий, развития инфраструктуры, выявлять технологии строительства, сохранившие эти поселения до наших дней.

При интеграции трехмерных моделей с другими наборами данных, например, архивной информацией об объекте, строительными характеристиками и т. п., возможен переход от простой трехмерной модели к BIM-модели, что является совершенно новой формой реализации технологий современной фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Трехмерное моделирование промышленных объектов и территорий играет важную роль в разработке мероприятий по предупреждению возникновения чрезвычайных ситуаций, оценке рисков и уровня потенциального ущерба для экономики, окружающей среды и жизни населения.

Так, в комплексе с численными методами гидродинамики, по трехмерной модели хвостохранилища горнодобывающего предприятия возможно смоделировать его прорыв и определить зоны распространения потока токсичных отходов, особенно, если есть угроза затопления объектов инфраструктуры не только на территории производственного предприятия, но и объектов гражданского пользования за его пределами [90, 121].

Трехмерное моделирование стока поверхностных вод с учетом особенностей рельефа позволяет решать задачи гражданского строительства, проводя оценку риска наводнений, а также предпринимать необходимые меры в случае возникновения чрезвычайных ситуаций [108]. На территории разрабатываемых рудников [100] по трехмерным моделям, построенным по материалам беспилотной аэро-

фотосъемки, можно проводить не только оценку уровня геологической опасности – идентифицировать неустойчивые склоны, трещины в грунте, оползни и т. п., но и производить разведку полезных ископаемых [104].

Мониторинг состояния гидротехнических сооружений по трехмерным моделям позволяет анализировать текущее состояние сооружений и разрабатывать меры по безопасности их эксплуатации [91].

Обследование трехмерных моделей линий электропередачи (ЛЭП) и территорий их размещения позволяет выявить физическое состояние и нарушения требований в части использования земельных участков, расположенных в границах охранных зон ЛЭП, определить риски и угрозы их функционирования и безопасности эксплуатации [12–14].

Аварии на магистральных нефтепроводах неизбежно сопровождаются утечкой сырья, которое может распространиться не только в зонах размещения трубопровода, но и на прилегающих территориях, что влечет загрязнение почвы и воды и как результат представляет угрозу для жизни и здоровья человека. С целью обеспечения сохранности и целостности трубопроводных конструкций, а также предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с прорывом трубопровода, необходимо проводить мониторинг как самих трубопроводов, так и защитных сооружений. Для этих целей подходят трехмерные модели магистральных нефтепроводов и защитных сооружений [30, 32, 86, 87].

Цифровая трансформация экономики подразумевает переход к цифровым формам ведения производственной деятельности. Одним из инструментов цифровизации является внедрение цифровых двойников (англ. digital twin). Согласно [101], впервые концепция модели цифрового двойника была введена в 2002 г., ее сущность представляет собой динамическую цифровую копию физического объекта, процесса или системы, обеспечивающую мониторинг состояния и производительности в режиме реального времени с целью принятия управленческих решений, планирования и прогнозирования [120].

Так, в промышленности цифровые двойники используются на протяжении всего жизненного цикла продукта – от проектирования до утилизации. Распространение BIM, и, как следствие, цифровых двойников отдельных объектов городской среды, привело к созданию концепции цифрового двойника города, позволяющего реализовать систему цифрового городского управления. Цифровой двойник города, в свою очередь, выступает основой для развития концепции «умных городов» [54, 94].

Отличительная особенность цифровых двойников геопространства от BIM-объектов или цифровых двойников промышленности заключается в том, что последние создаются методами виртуального моделирования, а основой цифровых двойников геопространства выступает информация, полученная средствами фотограмметрии, дистанционного зондирования и геодезии, то есть использованием трехмерных моделей объектов и территорий [40].

Важным отличием цифрового двойника геопространства от трехмерных моделей и ГИС является присутствие динамической информации о состоянии города, обновляемой в режиме реального времени (рисунок 2).



## **Цифровой двойник геопространства**

Трехмерная модель городской территории

Обновляемая информация о транспортной сети

Семантическая информация об объектах инфраструктуры

Метеорологические данные



Рисунок 2 – Цифровой двойник геопространства

В настоящее время в России уже известны успешные примеры создания трехмерных моделей в рамках развития цифрового градостроительства и концепции «умных городов» – это полученные по результатам аэрофотосъемки с БВС трехмерные модели Москвы, Томска, Нижневартовска, Уссурийска, районов Новгородской области, городского округа Махачкала, Тульской области и др. По этим трехмерным моделям решаются задачи управления земельными ресурсами, проектирования новых границ территориальных зон, размещения новых инвестиционных объектов и развития благоустройства территорий, выявления незаконных застроек и иные задачи в рамках цифрового управления городами [24, 57].

Упростить процесс стереофотограмметрических измерений можно путем построения единой трехмерной стереомодели территории. Сегодня реализованы проекты по созданию единых трехмерных стереомоделей муниципальных образований, в том числе крупных городов, на территориях Калининградской и Свердловской областей, Республики Башкортостан, Удмуртской Республики. По единым трехмерным стереомоделям возможно решать задачи градостроительства, проводить инвентаризацию объектов городской инфраструктуры, проводить комплексные кадастровые работы с точностью, установленной требованиями [55], – до 10 см в плане [4, 77].

Следует отметить, что перевод системы традиционного кадастра в его трехмерную форму является актуальной задачей, что подтверждается исследованиями [1–3, 15, 36, 39, 53, 70, 71, 73, 81, 83].

Как и в случае с моделированием объектов археологии, при моделировании городских объектов и территорий основой выступает аэрофотосъемка или воздушное лазерное сканирование с БВС в сочетании с методами наземной фотограмметрии и геодезии [59].

При моделировании городских территорий актуально использование гибридных систем, объединяющих в себе лидар и цифровые надирные и наклонные камеры, которые используют одну и ту же интегрированную систему ГНСС/IMU, например, LeicaCityMapper [94].

Среди достоинств применения БВС для трехмерного моделирования можно выделить следующие:

- снижение финансовых затрат на проведение съемочных работ;
- эффективное планирование натуральных работ после исследования трехмерных моделей;
- возможность выполнения съемки на высотах до 100 м;
- получение информации о труднодоступных участках объектов и неинвазивное изучение;
- получение изображений с высоким разрешением;
- высокая степень детализации получаемых трехмерных моделей;
- экономия времени, затрачиваемого на проведение съемочных работ и постобработки;
- возможность восстановления объекта по его детализированной трехмерной модели в случае его частичного или полного разрушения, аварии или чрезвычайного происшествия.

Слабой стороной использования БВС в аэрофотосъемке является то, что:

- съемка в видимом диапазоне спектра позволяет проводить реставрационные работы только видимых поверхностей;
- их зависимость от погодных условий;
- привлечение дополнительных технических средств, таких как лидары, приводит к удорожанию работ и выходу за рамки выделенного бюджета;
- некоторые сложности, вызываемые особенностями технической эксплуатации БВС, например, вблизи радиовышек возможна потеря сигнала, необходимость подзарядки аккумуляторов либо приобретение запасных и т. д.;
- возможно возникновение проблем при интеграции трехмерных моделей с различными системами ГИС и иными геопространственными платформами из-за разнородности форматов и отсутствия их согласованности на программном уровне;

- большие объемы данных, в связи с чем требуется предусмотреть возможности хранения, особенно если речь идет о периодически или постоянно обновляемых моделях;
- в большинстве случаев обязательно получение разрешения на полет и сертификат внешнего пилота БВС.

## 1.2 Классификация беспилотных воздушных судов

С начала 2000-х гг. беспилотные воздушные суда стали чаще использоваться для решения задач гражданского назначения – съемки объектов с целью получения пространственной информации о территориях и объектах и трехмерного моделирования [95, 97].

С развитием и совершенствованием компонентной базы улучшились и технические характеристики БВС, что положительным образом отразилось на их введении в выполнение аэрофотосъемочных работ.

Это обусловлено рядом следующих факторов:

- появление новых конструкционных материалов в изделиях авиационной отрасли, а также технологий их применения;
- развитие технологий электроники и формирование полной микроэлектронной компонентной базы для радиоэлектронной аппаратуры;
- применение высокоэффективных возобновляемых источников питания;
- развитие глобальных навигационных спутниковых систем;
- развитие вычислительной техники и цифровых технологий обработки сигналов, существенно повышающих качество, скорость и объем обрабатываемых изображений, и их передачи;
- расширение рынка современных цифровых камер и др.

В таблице 1 представлена российская универсальная классификация беспилотных воздушных судов [56].

Таблица 1 – Классификация БВС по взлетной массе и дальности действия

Беспилотное воздушное судно	Взлетная масса, кг	Дальность действия, км
Микро- и миниБВС ближнего радиуса действия	До 5	до 25–40
Легкие БВС малого радиуса действия	5–50	10–70
Легкие БВС среднего радиуса действия	50–100	70–150
Средние БВС	100–300	150–1 000
Среднетяжелые БВС	300–500	300
Тяжелые БВС среднего радиуса действия	500	70–300
Тяжелые БВС большой продолжительности полета	более 1 500	около 1 500
Беспилотные боевые самолеты	более 500	около 1 500

В зависимости от типа конструкции, различают следующие типы БВС:

- БВС вертолетного и мультироторного типов (рисунок 3);
- БВС самолетного типа (рисунок 4);
- БВС гибридного типа, например, конвертопланы (рисунок 5).



Рисунок 3 – БВС мультироторного типа



Рисунок 4 – БВС самолетного типа



Рисунок 5 – БВС гибридного типа

Состав полезной нагрузки беспилотного воздушного судна зависит от целей и задач аэрофотосъемочных работ, поэтому в качестве оборудования используют:

- цифровые RGB-камеры малого и среднего форматов со шторно-щелевым или центральным затвором;
- мультиспектральные камеры;
- тепловизоры;
- газоанализаторы и дозиметры;
- лидары.

Анализ опыта применения БВС для аэрофотосъемки показал, что эффективно используются все три типа беспилотных воздушных судов. Выбор того или иного типа БВС напрямую зависит от решаемой задачи. Современный сегмент рынка беспилотных воздушных судов гражданского назначения динамично развивается. В таблице приложения А представлены отечественные и зарубежные производители БВС и линейки моделей, а также технические характеристики БВС [10, 24, 37, 64, 110, 116, 122]. Как видно из таблицы, для проведения аэрофотосъемочных работ используются мини и легкие БВС малого и среднего радиуса действия. Это обусловлено удобством технической эксплуатации данных судов, а именно:

- в зависимости от типа БВС рабочая бригада может включать от 1–2 до 5 человек;
- не требуется оборудование специализированных взлетно-посадочных полос;
- оперативное проведение аэрофотосъемочных работ;
- БВС самолетного типа и конвертопланы позволяют размещать более качественное съемочное оборудование и предназначены для аэрофотосъемки значительных территорий;
- БВС мультироторного типа чаще используются для аэрофотосъемки линейных сооружений, вертикальной съемки объектов и сооружений либо небольших участков местности.

Максимально допустимая масса полезной нагрузки выступает ограничивающим фактором при выборе съемочного оборудования. Из представленных в таблице приложения А, технические характеристики лишь нескольких судов позволяют установку профессиональной аэрофотокамеры, в то время как на остальные устанавливаются неметрические цифровые камеры.

Беспилотные воздушные судна самолетного типа предназначены для проведения аэрофотосъемочных работ на больших площадях, например, населенных пунктов, с плановой точностью до 10 см, что позволяет получать изображения, являющиеся основой для трехмерного моделирования населенных пунктов, получения

ортофотопланов местности, цифровых моделей местности и фотопанорам города [38, 57].

Скорость полета БВС самолетного типа по ветру и против ветра может существенно отличаться, а отсутствие гиростабилизированной платформы значительно влияет на скорость изменения угловых перемещений воздушного судна, следовательно, и на значения угловых величин элементов внешнего ориентирования снимков, что, в свою очередь, приводит к снижению точности определения координат точек местности на снимках. Повышение точности результатов аэрофотосъемки возможно за счет синхронизации бортового ГНСС-приемника с системой срабатывания затвора [10, 61].

В отличие от БВС самолетного типа, мультироторные БВС обладают большей маневренностью, что позволяет выполнять съемку близко к объектам. На мультироторных БВС, как правило, съемочное оборудование устанавливается на гиростабилизированном подвесе – это необходимо для компенсации наклонов БВС во время полета. Вертикальные взлет и посадка позволяют избежать использования катапультных устройств и парашютных систем, а также специализированных взлетно-посадочных площадок. Подобные воздушные суда применяются для съемки участков местности площадью до 100 га и на небольших высотах, что полностью удовлетворяет потребностям крупномасштабного картографирования. Применение БВС мультироторного типа подходит для решения задач архитектуры, съемки памятников и объектов культурного наследия, археологических изысканий, создания трехмерных моделей объектов [97, 114].

### 1.3 Цифровые камеры, используемые для аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов

Качество результатов аэрофотосъемки зависит от выбора программно-аппаратного комплекса для ее проведения, в который входит беспилотное воздушное судно, съемочное оборудование – цифровые камеры, воздушные лазерные ска-

неры, тепловизоры и их комбинации, бортовой ГНСС-приемник, бортовая инерциальная система (IMU), иная полезная нагрузка в зависимости от комплекта поставки БВС или технического задания на аэрофотосъемочные работы, а также программные средства управления полетом. Используемая аэрофотокамера должна отвечать метрическим требованиям – иметь центральный затвор, постоянные элементы внутреннего ориентирования, жесткую фиксацию фокусировки на бесконечность, определение экспозиции [22].

Профессиональные метрические камеры при их соответствии требованиям [22] имеют большие габариты и массу [66], что исключает их установку на большинство используемых БВС. Также приобретение такой камеры требует значительных финансовых затрат и не оправдывает риски в случае ее потери при использовании в составе аэрофотосъемочной системы БВС. Поэтому в состав аэрофотосъемочной системы включаются цифровые камеры с размером результирующего изображения менее 60 МП и от 60 до 150 МП, что соответствует цифровым камерам малого и среднего форматов. Зачастую подобные цифровые камеры являются неметрическими и не предназначены для выполнения измерений по снимкам, полученных с их помощью [8, 51, 69].

Камеры, используемые для аэрофотосъемки с БВС, представлены в таблице 2.

В технической документации, прилагаемой к цифровым неметрическим камерам, отсутствует информация об элементах внутреннего ориентирования и параметрах дисторсии объектива. Поэтому, для того, чтобы камера могла использоваться для аэрофотосъемки, необходимо прибегать к фотограмметрической калибровке цифровой камеры с целью определения искомых значений. В лабораторных условиях фотограмметрическая калибровка цифровой камеры выполняется на специальных плоских или пространственных тест-объектах [46, 47]. В результате решения обратной фотограмметрической задачи по снимкам пространственного тест-объекта определяют фокусное расстояние, координаты главной точки и параметры дисторсии объектива.

Таблица 2 – Технические характеристики камер, используемых для аэрофотосъемки с БВС

Модель	Размер результирующего изображения, МП	Вес, г	Фокусное расстояние, мм	Тип затвора
Sony Alpha 6000	24,3	344	16–55	Шторно-щелевой
Sony A7R2	42,4	625	Зависит от используемого объектива	Шторно-щелевой
Sony Alpha NEX 5R	16,1	218 (без батареи)	Зависит от используемого объектива	Шторно-щелевой
Sony UMC-R10C	20,4	158	16	Шторно-щелевой
Canon EOS 5DS R	50,6	845 (без батареи)	Зависит от используемого объектива	Шторно-щелевой
Nikon D810	36,0	980	Зависит от используемого объектива	Шторно-щелевой
Sony DSC-RX1RM2	42,4	507	35	Центральный
PhaseOne iXU 1000	100,0	до 2 000	32–150	Центральный
PhaseOne iXM-100	100,0	до 2 000	50–150	Центральный

На рисунках 6 и 7 представлены действующие тест-объекты для фотограмметрической калибровки цифровых камер, созданные в Сибирском государственном университете геосистем и технологий (СГУГиТ) и Московском университете геодезии и картографии (МИИГАиК) [9, 47, 48]. Фотограмметрическую калибровку требуется проводить для всех цифровых аэрофотокамер с периодичностью, указанной изготовителем в технической документации. В случае, когда подобные сведения отсутствуют, периодичность устанавливается владельцем оборудования [22]. Регулярная фотограмметрическая калибровка требуется для цифровых аэрофотокамер, используемых в составе аэрофотосъемочной системы БВС самолетного типа, из-за жесткой посадки которых может возникать нарушение стабильности параметров цифровой камеры.



Рисунок 6 – Пространственный тест-объект СГУГиТ

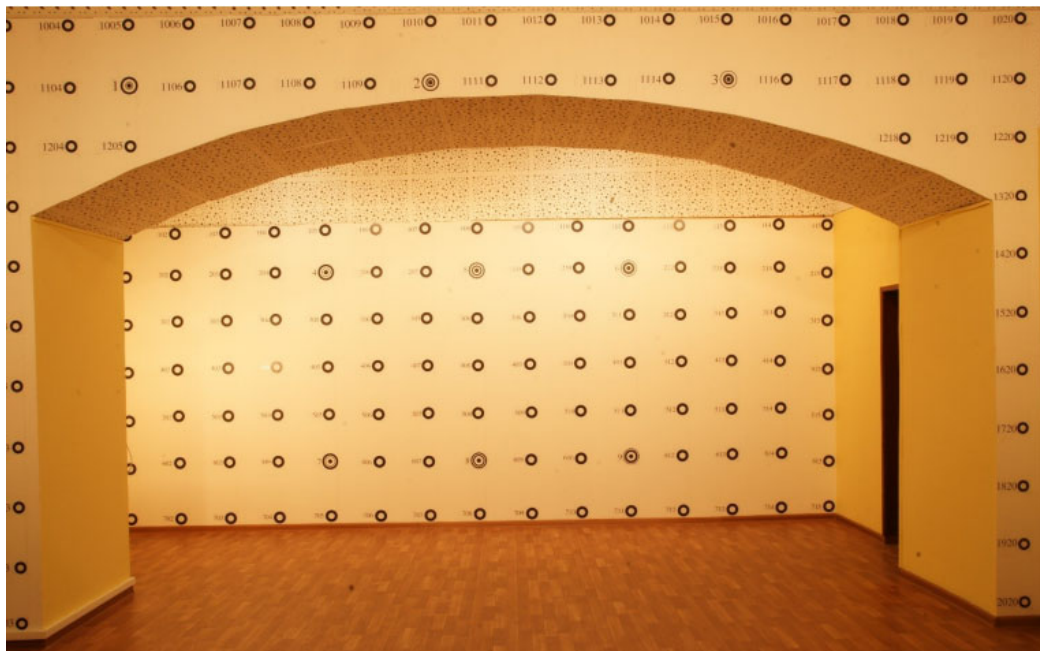


Рисунок 7 – Объемный тест-объект МИИГАиК [48]

Еще одним вариантом установления параметров цифровой камеры является самокалибровка, проводимая средствами фотограмметрического программного обеспечения. Самым надежным вариантом калибровки, но, в то же время, и трудо-

затратным, является полевая фотограмметрическая калибровка цифровой камеры, когда параметры камеры определяются в ходе обработки материалов аэрофотосъемки калибровочного полигона [26, 47, 76].

Важным требованием, предъявляемым к цифровым камерам, используемым в аэрофотосъемке, является наличие у них центрального затвора. Центральный затвор обеспечивает одномоментную регистрацию всех точек снимка с соблюдением центральной проекции. Однако многие модели, представленные в бюджетном сегменте цифровых камер, оснащены шторно-щелевым затвором (англ. rolling shutter), где формирование изображения осуществляется построчно, и каждая строка формируется в различный момент времени из-за перемещения носителя аэрофотокамеры в пространстве.

Смещение точек на снимках, вызванное применением шторно-щелевого затвора, приводит к ошибкам в определении координат точек местности и, в целом, снижает качество результатов фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки. Компенсация влияния шторно-щелевого затвора осуществляется в фотограмметрическом программном обеспечении активацией предназначенной для этого функции либо расчетом и введением поправок в снимки на этапе предварительной камеральной обработки с привлечением иных программных средств [46]. На аппаратном уровне снизить негативное влияние шторно-щелевого затвора на качество материалов аэрофотосъемки можно за счет установки на БВС гиростабилизированной платформы (гироплатформы). Гироплатформа обеспечивает компенсацию углов наклона воздушного судна по крену и тангажу, а также снижает влияние вибраций воздушного судна на съемочное оборудование [22].

В настоящее время цифровые неметрические камеры широко применяются для аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов. Материалы аэрофотосъемки используются для трехмерного моделирования объектов и территорий, создания ортофотопланов для решения задач кадастра, в целях проведения мониторинговых наблюдений, геологических изысканий и в строительстве. Благодаря фотограммет-

рической калибровке таких камер, результаты обработки снимков становятся пригодными для проведения измерений.

#### 1.4 Программное обеспечение, используемое для обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов

Фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки с БВС не имеет принципиальных отличий от обработки снимков, полученных с пилотируемого воздушного судна, и проводится в специализированном программном обеспечении (ПО) или цифровой фотограмметрической системе (ЦФС) [33].

Цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD является одной из первых разработанных в России подобных систем. Ее функциональные возможности позволяют осуществить полный цикл автоматизированной обработки снимков, начиная от их импорта и заканчивая построением цифровых моделей рельефа, ортофотопланов и иной фотограмметрической продукции [79].

В ЦФС PHOTOMOD доступна обработка одиночных снимков, стереопары или блока снимков. Контроль точности обработки осуществляется на каждом этапе, для чего формируется специальный отчет. ЦФС PHOTOMOD поддерживает такие форматы изображений, как TIFF, GeoTiff, BigTIFF, BMP, RSW (растровый формат ПО «Панорама»), IMG (растровый формат Erdas Imagine), JPEG, PNG, GIF, PIX (растровый формат PCI Geomatics). Для обработки аэрофотоснимков с БВС разработчики создали отдельную программу PHOTOMOD UAS на функциональной базе ЦФС PHOTOMOD. В данном ПО обрабатываются только снимки центральной проекции размером до 100 Мбайт. Выходные продукты ПО – ЦМР в виде регулярной сетки высот (DEM) и нерегулярной сети треугольников (TIN) [16]; векторные 3D-объекты – используются в качестве топографической основы для картографирования и в трехмерном моделировании местности; ортофотопланы и метрические трехмерные модели местности [112]. Схема обработки материалов аэрофотосъемки в PHOTOMOD UAS представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Обработка материалов аэрофотосъемки в PHOTOMOD UAS

Agisoft Metashape – программное обеспечение российского разработчика, предназначенное для фотограмметрической обработки снимков в автоматизированном режиме [80]. Обработка снимков в Agisoft Metashape основана на методе SfM (Structure from motion), основная суть которого заключается в определении общих точек на двух и более снимках. При наличии EXIF-информации определяются соответствующие на снимках пиксели. После того, как на нескольких снимках определены соответствующие точки, программа вычисляет их плановые координаты  $X$ ,

$Y$  и высоту  $Z$ . Обязательным условием является достаточное перекрытие снимков. Продольное перекрытие должно составлять не менее 80 %, а поперечное – не менее 60 %. Ухудшение результатов обработки в ПО Agisoft Metashape может быть спровоцировано недостаточным количеством снимков, «слепыми зонами», неравномерным распределением опорных точек на объекте аэрофотосъемки.

В программе реализована функция компенсации влияния шторно-щелевого затвора, позволяющая повысить качество обработки [92]. На рисунке 9 показана трехмерная модель городской территории, построенная средствами ПО Agisoft Metashape.



Рисунок 9 – Трехмерная модель городской территории,  
построенная в Agisoft Metashape

Новой реализацией отечественной программной разработки является ПО КРЕДО ФОТОГРАММЕТРИЯ (август, 2021 г.). Данная программа также предназначена для автоматизированной обработки изображений и получения орто-

фотопланов и цифровых моделей местности, моделей открытых горных выработок и отвалов породы, расчета объемов по массивам точек. Обработка включает в себя импорт изображений и элементов внешнего ориентирования, автоматический поиск и сопоставление связующих точек на изображениях и формирование стереопар, уравнивание сети пространственной фототриангуляции, формирование разреженного массива точек и его редактирование и фильтрацию, формирование плотного массива точек с сохранением их цвета, формирование ортофотоплана. Программа поддерживает различные форматы массивов точек (LAS, LAZ, E57, RPC, в произвольных текстовых форматах) и позволяет выполнять их пересчет в различные системы координат [23, 42]. Реализована функция автоматической векторизации.

Среди зарубежных программных продуктов, предназначенных для фотограмметрической обработки снимков, следует отметить Trimble Inpho UASMaster (США), Context Capture (США), Pix4D Mapper (Швейцария). Швейцарское программное обеспечение Pix4D Mapper разработано для автоматизированной фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БВС и пилотируемых носителей:

- плановых и перспективных RGB-аэрофотоснимков;
- снимков, полученных в нади́р с мультиспектральных камер (Sequoia, Micasense RedEdge, Multispec 4C);
- тепловизионных камер (FLIR Vue Pro, FLIR XT, THERMO MAP).

Результатами обработки материалов выступают массивы точек, ортофотопланы для решения задач геологоразведки, кадастра, архитектуры, строительства и т. д., трехмерные модели зданий и объектов, а также индексные карты для решения задач сельского хозяйства. При обработке аэрофотоснимков, полученных с цифровой камеры со шторно-щелевым затвором, предусмотрена коррекция этого эффекта. Трехмерная модель, созданная в ПО Pix4D Mapper, представлена на рисунке 10 [74].

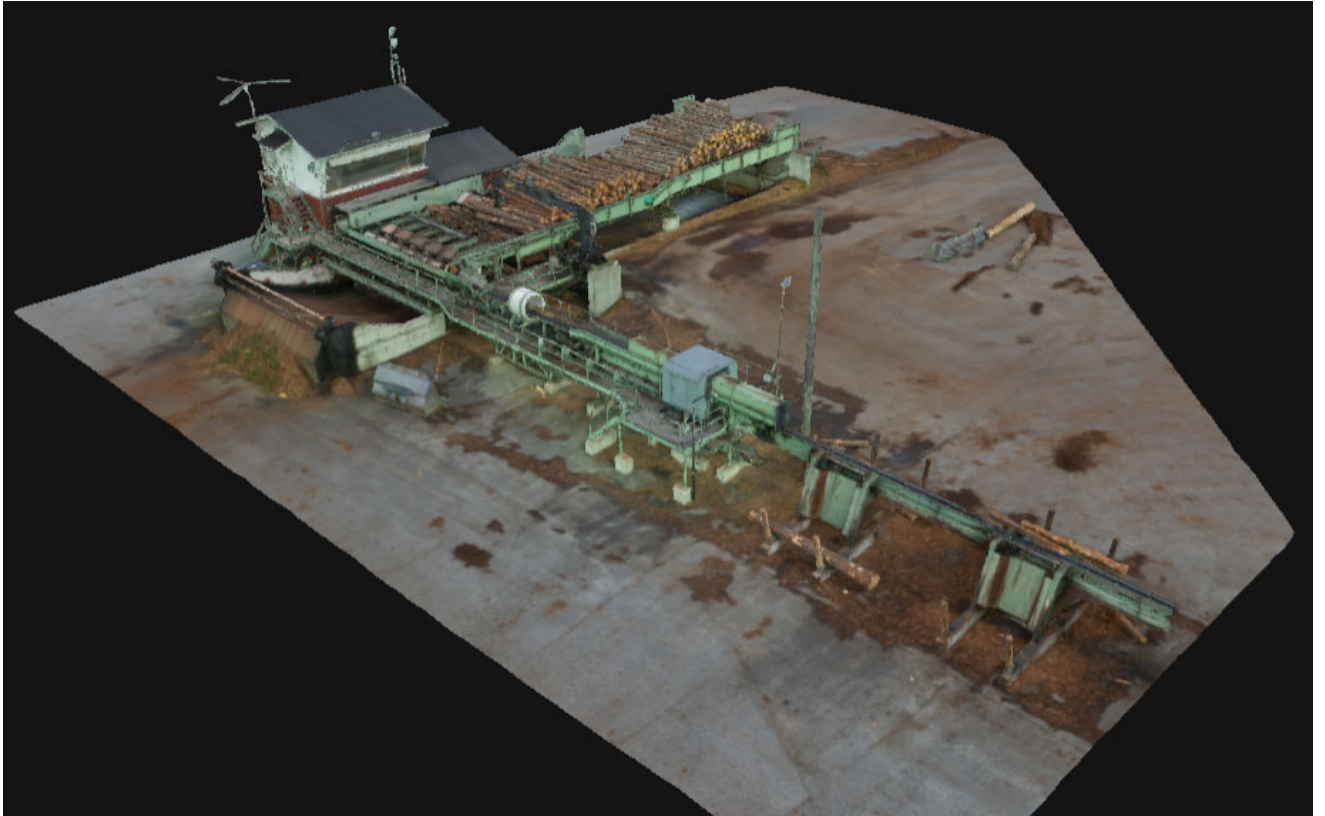


Рисунок 10 – Трехмерная текстурированная модель,  
построенная в Pix4D Mapper [74]

Безусловными преимуществами фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки в современном программном обеспечении являются высокая степень автоматизации процессов, возможность редактирования и контроля точности практически на всех этапах обработки, получение двумерной и трехмерной продукции в одном и том же программном продукте для решения задач различного типа. Скорость обработки изображений и получения итоговых результатов зависят от объема обрабатываемых данных и технических характеристик вычислительной машины, на которой она осуществляется. К недостаткам таких программ можно отнести требование больших вычислительных мощностей компьютера, отсутствие информации о математических алгоритмах, используемых для обработки, однако первое в настоящее время решается за счет внедрения облачных сервисов и распределенной обработки данных. Иногда ограничивающим фактором в выборе программного обеспечения может выступать его цена.

### 1.5 Выводы по первому разделу

В результате исследований установлено, что трехмерное моделирование объектов и территорий по материалам аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов является актуальной научной и производственной задачей. Для получения исходных данных для трехмерного моделирования используются различные типы беспилотных воздушных судов в зависимости от целей аэрофотосъемки и решаемых задач по трехмерным моделям. Определяющими факторами в выборе аэрофотосъемочного оборудования являются технические характеристики БВС, цели и задачи трехмерного моделирования, а также бюджет, отводимый на выполнение работ, что приводит к использованию как метрических, так и неметрических цифровых камер, оснащенных, в том числе, и шторно-щелевыми затворами. Фотограмметрическая обработка результатов аэрофотосъемки с БВС осуществляется в программном обеспечении, разрабатываемом как отечественными, так и зарубежными компаниями. Фотограмметрическая обработка в таких программах проводится с высокой степенью автоматизации процессов и включает полный цикл обработки, однако не во всех программах реализована компенсация искажений, вызванных шторно-щелевыми затворами.

## 2 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

### 2.1 Методика обработки снимков с беспилотного воздушного судна для трехмерного моделирования территорий

Обработка материалов аэрофотосъемки проводится в специализированном программном обеспечении, также называемом цифровой фотограмметрической системой. Современный уровень развития подобных систем позволяет выполнять фотограмметрическую обработку в автоматизированном режиме, а отдельные этапы обработки являются полностью автоматическими, этапы фотограмметрической обработки представлены в виде схемы на рисунке 11.

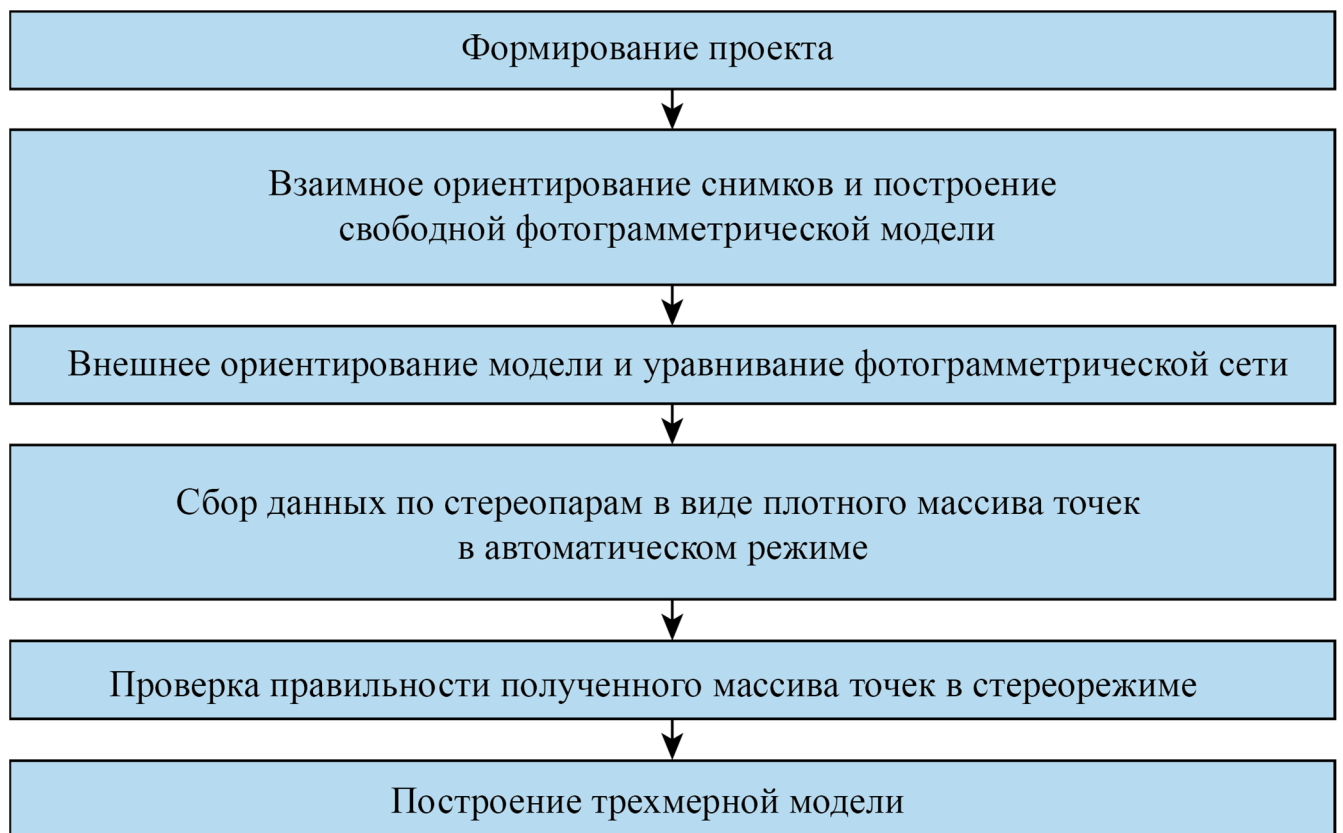


Рисунок 11 – Схема методики фотограмметрической обработки  
аэрофотоснимков

Добавление изображений, каталога координат опорных точек и элементов внешнего ориентирования (ЭВО) осуществляются на этапе формирования проекта. ЦФС работают с такими форматами изображений, как JPG, TIFF, PNG, BMP, JPEG 2000, TARGA, ASF, DNG, PGM, PPM, MPO и др. Каталоги опорных точек и ЭВО загружаются в форматах таких текстовых файлов, как TXT, CSV или в иных поддерживаемых форматах. Также в проект вводится информация о параметрах камеры, с помощью которой были получены изображения. Информация может быть введена оператором вручную, импортирована из отдельного файла или считана программой из метаданных снимков EXIF. Как правило, это информация о типе камеры (аналоговая, цифровая – кадровая, сферическая, «рыбий глаз»), фокусном расстоянии камеры, координатах главной точки, размере пикселя, данных калибровки камеры. В зависимости от используемой ЦФС набор требуемых для заполнения информацией параметров может изменяться. На этом же этапе задается система координат проекта. На рисунке 12 представлены окна выбора системы координат в программном обеспечении Agisoft Metashape.

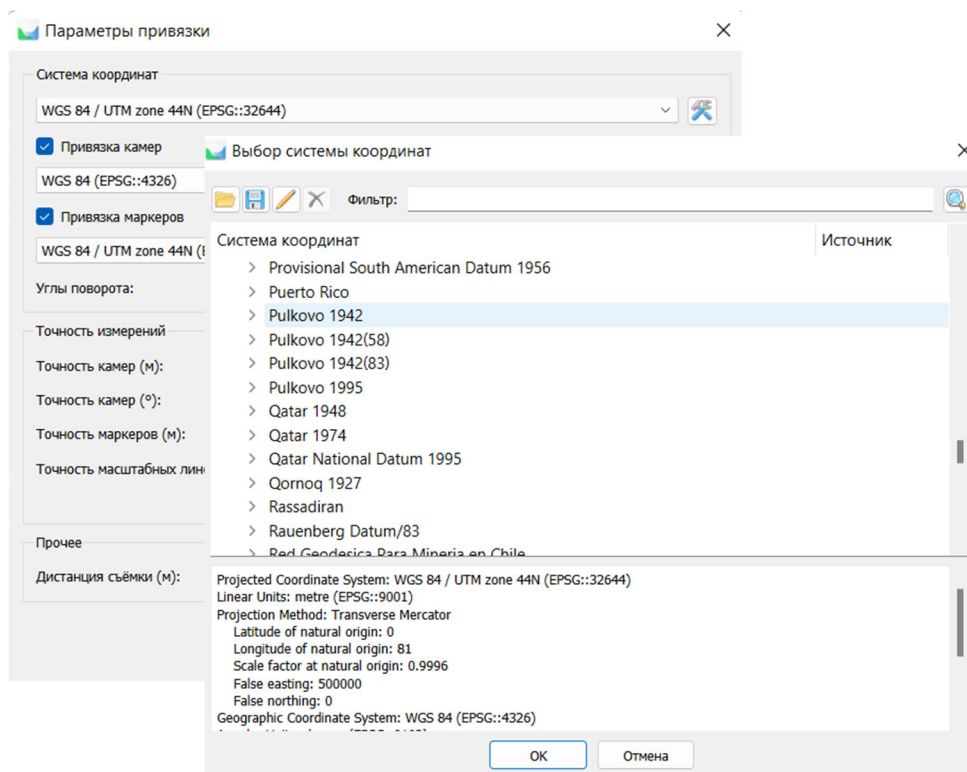


Рисунок 12 – Выбор системы координат проекта в Agisoft Metashape

После того, как проект сформирован, выполняется внутреннее ориентирование снимков. На рисунке 13 представлен процесс присвоения параметров камеры в ЦФС Photomod. В ЦФС возможна обработка как цифровых, так и аналоговых снимков.

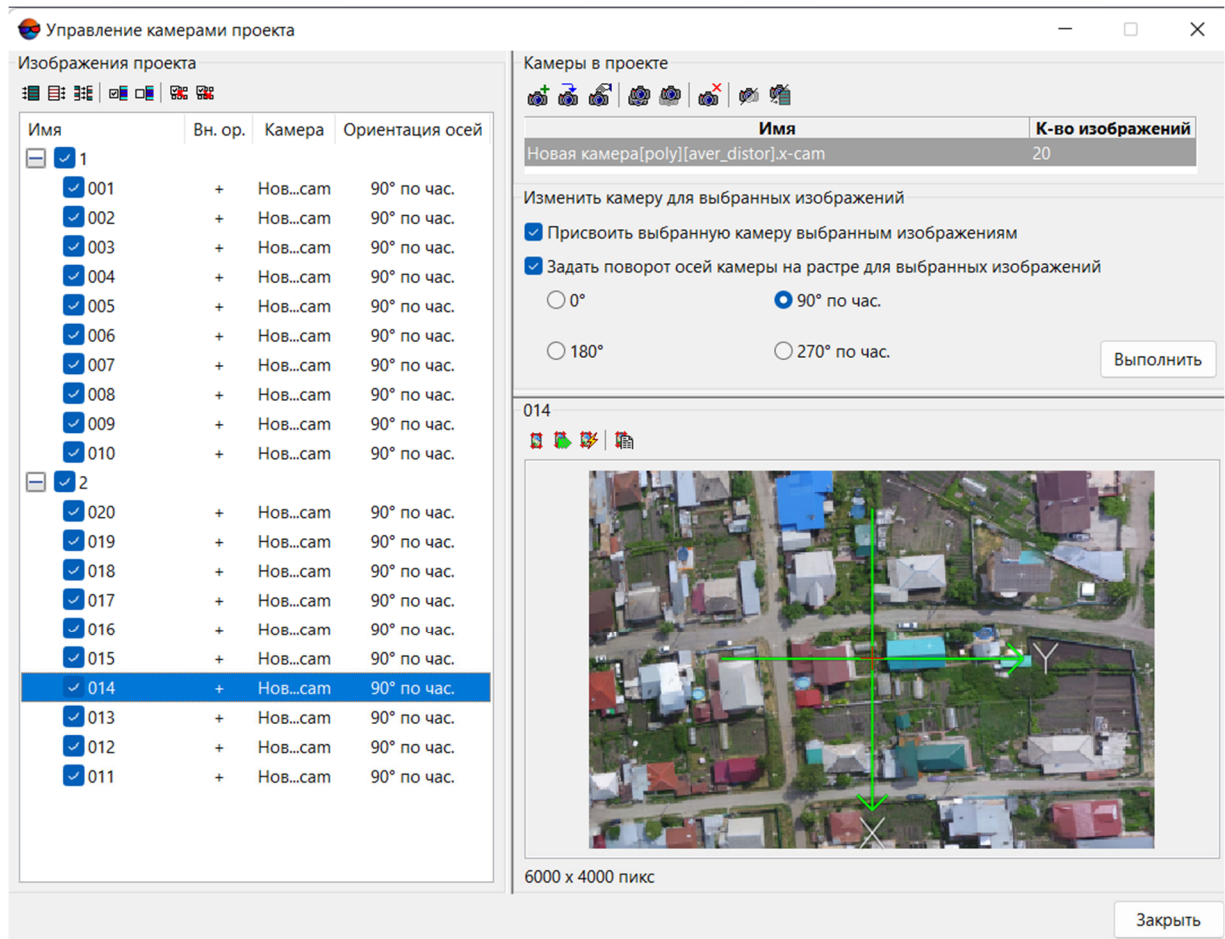


Рисунок 13 – Присвоение параметров камеры в ЦФС Photomod

На этапе внутреннего ориентирования определяется положение центра проекции относительно снимка, что позволяет восстановить по снимку связку лучей, существовавшую в момент фотографирования [25, 45, 49]

$$\begin{aligned} x_{ki} &= a_0 + a_1x_i + a_2y_i \\ y_{ki} &= b_0 + b_1x_i + b_2y_i \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_{ki}, y_{ki}$  – координаты  $i$ -й координатной метки, взятой из паспорта АФА,  $i = 1 - 4$ ;

$a_i, b_i$  – коэффициенты преобразования;

$x, y$  – измеренные координаты координатных меток.

Измерение координат опорных точек может выполняться автоматически или вручную.

Опорные точки представляют собой специально замаркированные знаки на земной поверхности или выбираются из существующих на местности объектов, например, центры люков смотровых колодцев подземных коммуникаций. Координаты опорных точек на местности измеряются геодезическими методами или определяются по существующим топографическим планам.

Измерение координат опорных точек в ЦФС Photomod представлено на рисунке 14. При отсутствии координат опорных точек в ЦФС осуществляется построение и уравнивание свободной фотограмметрической модели.

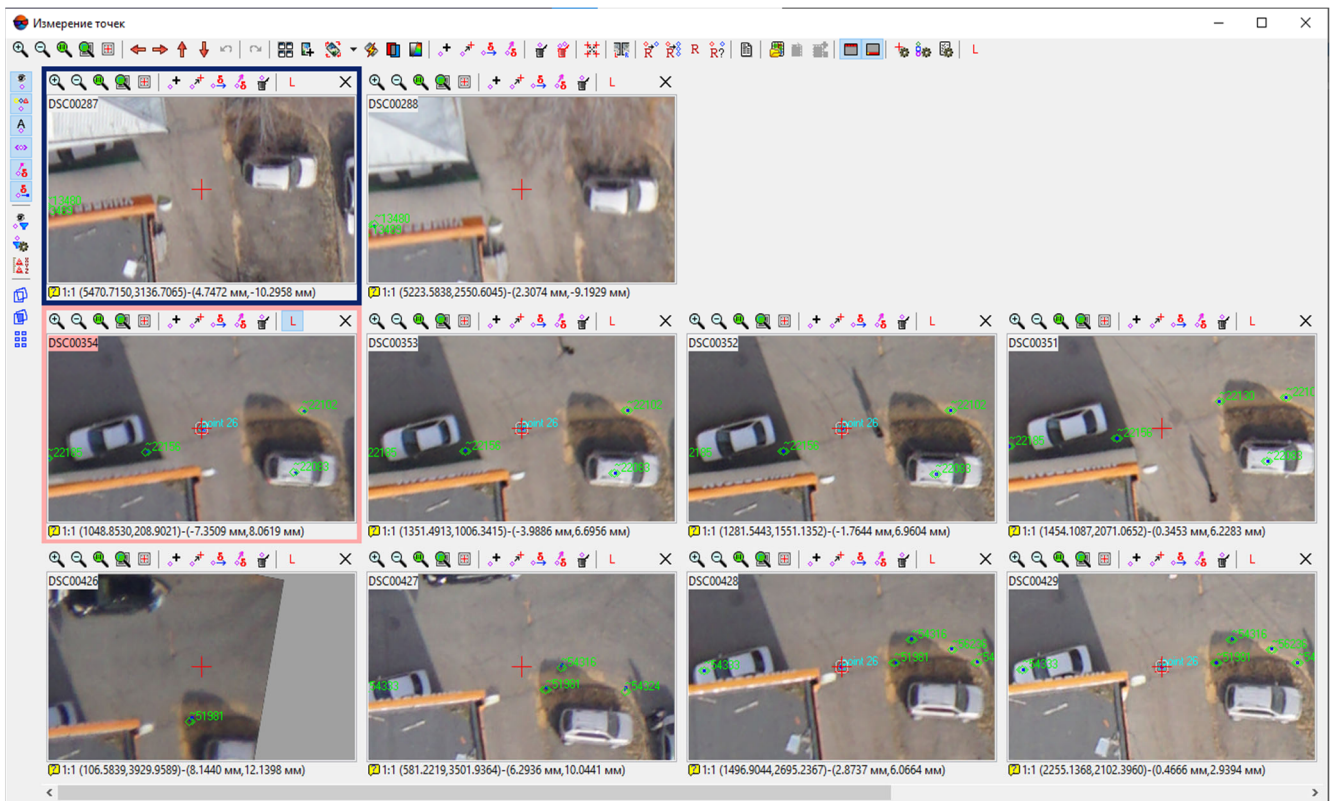


Рисунок 14 – Измерение координат опорных точек в ЦФС Photomod

Этап взаимного ориентирования снимков сопровождается измерением связующих точек, заключающемся в идентификации пикселей, принадлежащих левому снимку стереопары с соответствующими пикселями правого снимка. В ЦФС измерение связующих точек может проводиться как в ручном, так и в полностью автоматическом режиме.

Автоматическое отождествление соответственных точек на снимках реализуется с помощью локальных методов.

К локальным методам отождествления относятся корреляционный метод и метод наименьших квадратов, относящиеся к площадным методам [47]. В ЦФС автоматический поиск и измерение связующих точек часто осуществляются корреляционным методом. Общий принцип корреляционного метода заключается в том, что на одном из снимков стереопары измеряется любая точка, после чего вокруг этой точки формируется фрагмент изображения в виде эталонной матрицы.

Затем данный фрагмент накладывается на второе изображение и эталонная матрица перемещается по второму снимку в пределах области поиска с заданным шагом (один пиксель, 0,5 пикселя и т. д.), при этом происходит сравнение соответствующих яркостей двух снимков.

При совпадении всех яркостей соответственная точка идентифицируется на втором снимке. Для идентичных точек разность яркостей соответствующих пикселей на двух снимках должна равняться нулю, что и будет являться критерием точности процесса идентификации. На практике же в качестве критерия применяется значение коэффициента корреляции  $R$ , менее подверженное влиянию шумов изображения.

Координаты соответственной точки на правом снимке определяются, исходя из положения матрицы, при котором значение  $R$  максимально, соответствует матрице, построенной вокруг идентичной точки на втором снимке стереопары. Коэффициент корреляции принимает значения от 0 до 1.

Компенсация различий в значениях коэффициентов контрастности снимков стереопары происходит путем вычисления  $R$  по нормализованным значениям яркостей каждого пикселя и выражается формулой

$$R = \frac{\sum_1^n [D_1(x_1 y_1)_i - D_1'] [D_2(x_2 y_2)_i - D_2']}{\sqrt{\sum_1^n [D_1(x_1 y_1)_i - D_1']^2 \sum_1^n [D_2(x_2 y_2)_i - D_2']^2}}, \quad (2)$$

где  $D_1, D_2$  – яркости пикселей соответственно первого и второго цифровых снимков

стереопары;  $D_1' = \frac{1}{n} \sum_1^n D_1(x_1, y_1)_i$ ,  $D_2' = \frac{1}{n} \sum_1^n D_2(x_2, y_2)_i$ ;

$i$  – номер пикселя в матрице;

$n$  – количество пикселей в матрице;

$x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  – пиксельные координаты элементов матрицы на первом и втором снимках [47].

Корреляционный метод позволяет получать координаты соответственных точек с субпиксельной точностью.

Метод наименьших квадратов позволяет вычислять величины продольного и поперечного параллаксов за счет минимизации яркости двух изображений под известным условием  $V^T V = \min$ , для чего решается система уравнений вида

$$f_1(x_1, y_1) - f_2(x_2, y_2) = 0, \quad (3)$$

где  $x_2 = x_1 - p$ ,  $y_2 = y_1 - q$ ;

$f_1(x_1, y_1)$  – функция распределения яркостей  $D_1$  в пределах фрагмента изображения с центром в измеряемой точке первого снимка с координатами  $x_1, y_1$ ;

$f_2(x_2, y_2)$  – функция распределения яркостей  $D_2$  в пределах фрагмента изображения с центром в соответствующей точке второго снимка с координатами  $x_2, y_2$ ;

$p$  – продольный параллакс;

$q$  – поперечный параллакс.

После этапов внутреннего и взаимного ориентирования, а также измерения координат опорных точек происходит автоматическое уравнивание сети пространственной фототриангуляции.

В современных ЦФС уравнивание сети пространственной фототриангуляции реализуется с помощью метода связок [7, 35], математической основой которого являются уравнения коллинеарности, составляемые для каждого изображения точки, измеренной на снимке

$$-f \frac{x^*}{z^*} - (x - x_0) = 0, \quad -f \frac{y^*}{z^*} - (y - y_0) = 0, \quad (4)$$

где 
$$\begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix};$$

$x, y$  – координаты изображения точки местности, измеренной на снимке;

$X, Y, Z$  – координаты точки местности в системе координат объекта  $OXYZ$ ;

$X_S, Y_S, Z_S$  – координаты центров проекции снимка в системе координат объекта;

$A$  – матрица преобразования координат, элементы  $a_{ij}$  которой являются функциями угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

В Agisoft Metashape описанные выше этапы выполняются автоматически с помощью функций Выравнивание и Оптимизация, а результат выводится на экран в виде разреженного массива связующих точек, представленного на рисунке 15.

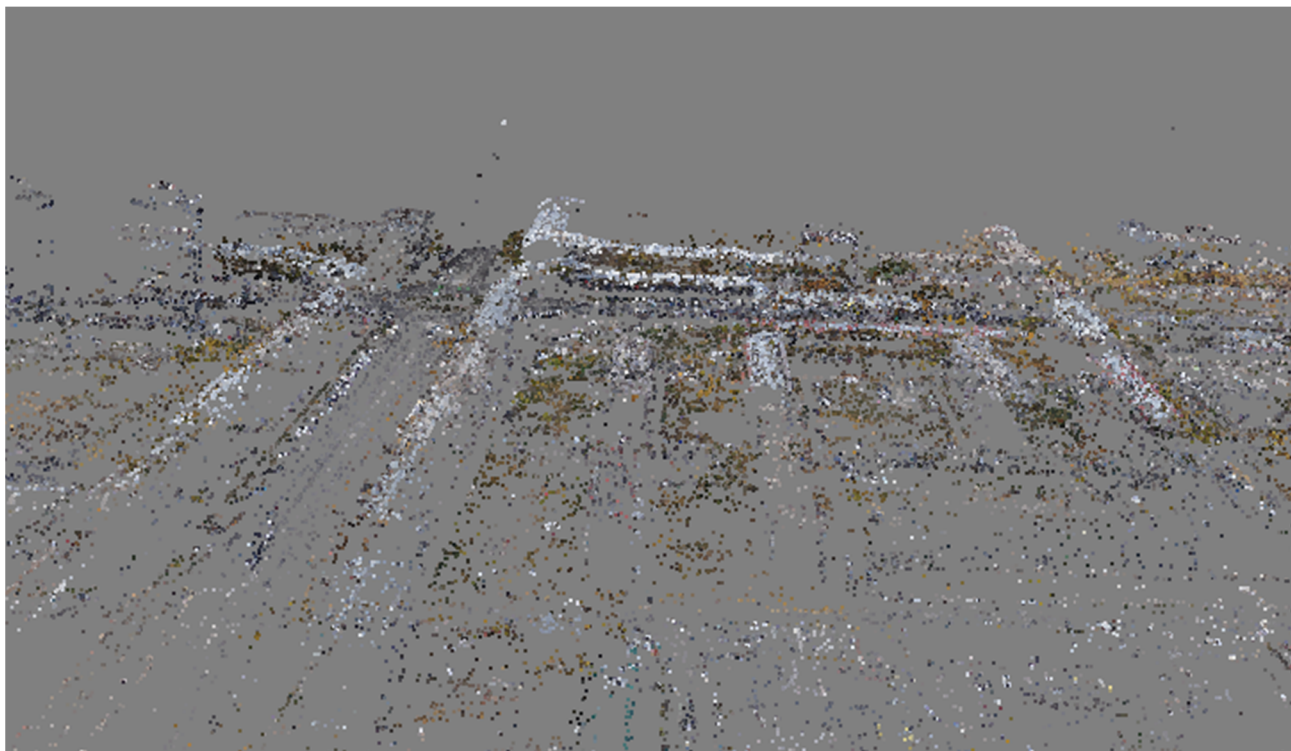


Рисунок 15 – Фрагмент разреженного массива связующих точек  
в Agisoft Metashape

Следующим этапом фотограмметрической обработки снимков в ЦФС является автоматическое построение трехмерной модели в виде плотного массива точек. Как и в случае с измерением связующих точек, на данном этапе используются методы автоматического отождествления соответственных точек, основанные на выделении особых точек снимков и дальнейшем их отождествлении. К особым точкам, как правило, относятся угловые точки либо точки, где резко изменяются характеристики – яркость, цвет, контраст и т. д.

Выделяются особые точки с помощью детекторов, а вычисление их признаков осуществляется дескрипторами. Наилучшие результаты корреляции получаются в случае, когда выделенные точки инвариантны к развороту, сдвигу, изменению яркости и масштаба к точке положения камеры. Для выделения особых точек используются различные детекторы – Моравица, Форстнера, Лапласиан Гауссиана, Дрешлера, Харриса и др.

После выделения особых точек используются площадные алгоритмы отождествления соответственных точек. К алгоритмам, содержащим и детекторы, и дескрипторы, относятся ORB, SURF, SIFT и иные. Алгоритм SIFT является инвариантным к развороту и сдвигу изображения, изменению масштаба, устойчив к шумам и теням [27, 47, 102, 103].

При построении плотного массива точек прибегают к глобальным и полуглобальным методам (рисунок 16). В ЦФС, в большинстве случаев, реализован полуглобальный метод (SGM), сущность которого заключается в поиске для каждого пикселя левого изображения стереопары  $E_1$  соответствующего пикселя на правом изображении  $E_2$ , когда все соответствующие точки находятся вдоль базисных линий.

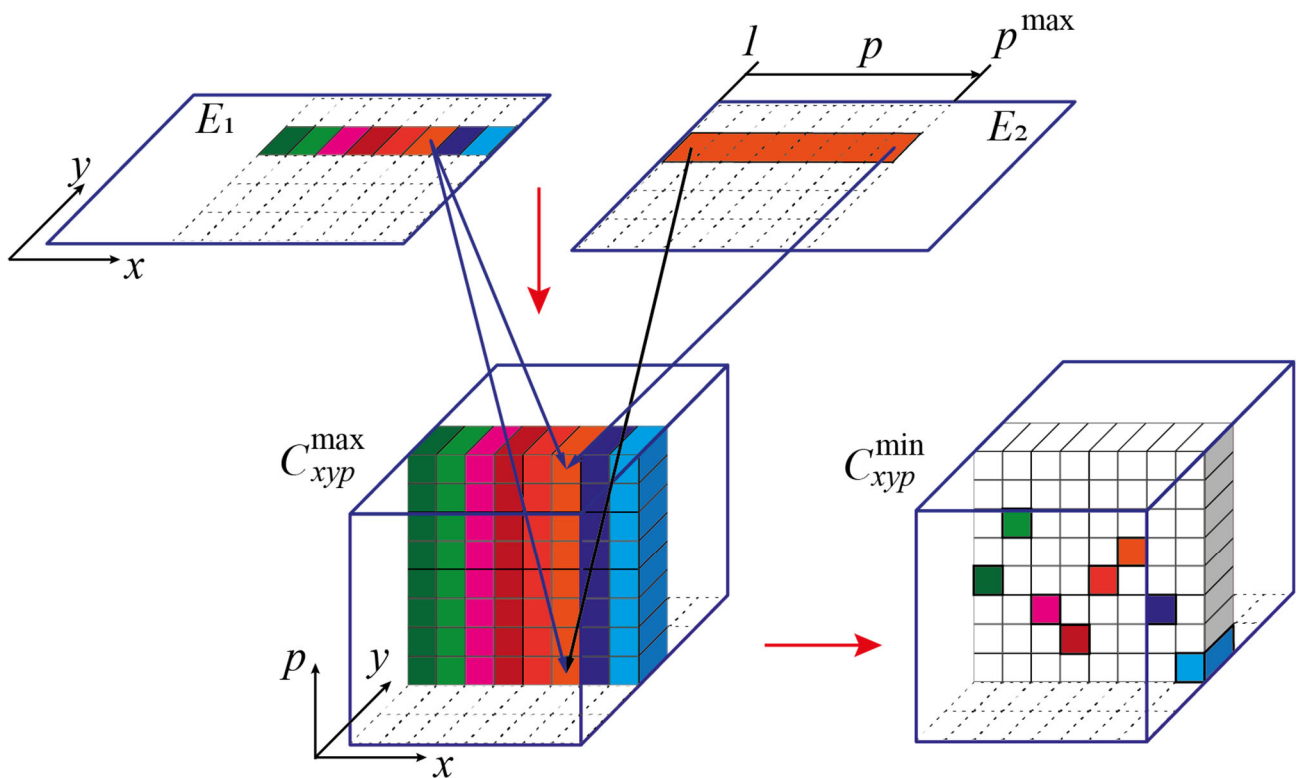


Рисунок 16 – Визуализация полуглобального метода отождествления точек на снимках [47]

Идентификация соответствующих пикселей на двух снимках происходит в пределах возможного изменения продольных параллаксов  $p^{\max}$  путем вычисления

разности соответствующих яркостей пикселей – «стоимости» (англ. cost) отождествления  $C_{xyp}$

$$C_{xyp} = D_{xy}^1 - D_{py}^2, \quad (5)$$

где  $D_{xy}^1$ ,  $D_{py}^2$  – яркости пикселей соответственно первого и второго снимков стереопары;

$p$  – продольный параллакс,  $p = x_1 - x_2$ .

По формуле (5) вычисляется стоимость для каждого пикселя левого снимка с координатами  $x$ ,  $y$  и всех пикселей, лежащих в строке с ординатой  $y$  на правом снимке и в пределах возможных продольных параллаксов  $p = 1 - p^{\max}$ , а результат заносится в соответствующую ячейку куба с координатами  $x$ ,  $y$ ,  $p$ . Таким образом, формируется куб стоимостей отождествления каждого пикселя на левом снимке с возможными пикселями на правом.

В результате анализа стоимостей находят минимальные значения для каждого пикселя. Чем меньше стоимость, тем вероятнее, что пиксели являются идентичными. На дальнейших этапах реализации полуглобального алгоритма проводится анализ параллаксов соседних пикселей в восьми направлениях, при этом стоимость отождествления увеличивается в зависимости от величины разности продольных параллаксов.

Окончательное значение стоимости для каждого пикселя и параллакса вычисляется путем суммирования стоимостей по всем направлениям. На завершающем этапе выполняется анализ финального значения стоимости и для каждого пикселя с координатами  $x$ ,  $y$  находят параллакс  $p$ , для которого стоимость минимальна.

Далее путем решения прямых фотограмметрических засечек для каждого пикселя получают трехмерную модель в виде плотного массива точек, на рисунке 17 приведен пример такой модели.



Рисунок 17 – Трехмерная модель в виде плотного массива точек

Плотный массив точек, как правило, поддается редактированию оператором. Дальнейшим этапом фотограмметрической обработки является построение трехмерной полигональной модели на основе плотного массива точек. В качестве исходной информации для построения трехмерных полигональных моделей могут использоваться как плотные массивы точек, так и разреженный массив связующих точек или карты глубины. Выбор исходных данных для построения трехмерной полигональной модели влияет на качество ее построения и время построения.

Построение текстур для трехмерных моделей также осуществляется в ЦФС.

Если необходимо создать трехмерные модели больших территорий, то формат иерархических тайлов позволяет строить трехмерные модели с высоким разрешением и детализацией. Пример тайловой трехмерной модели показан на рисунке 18.

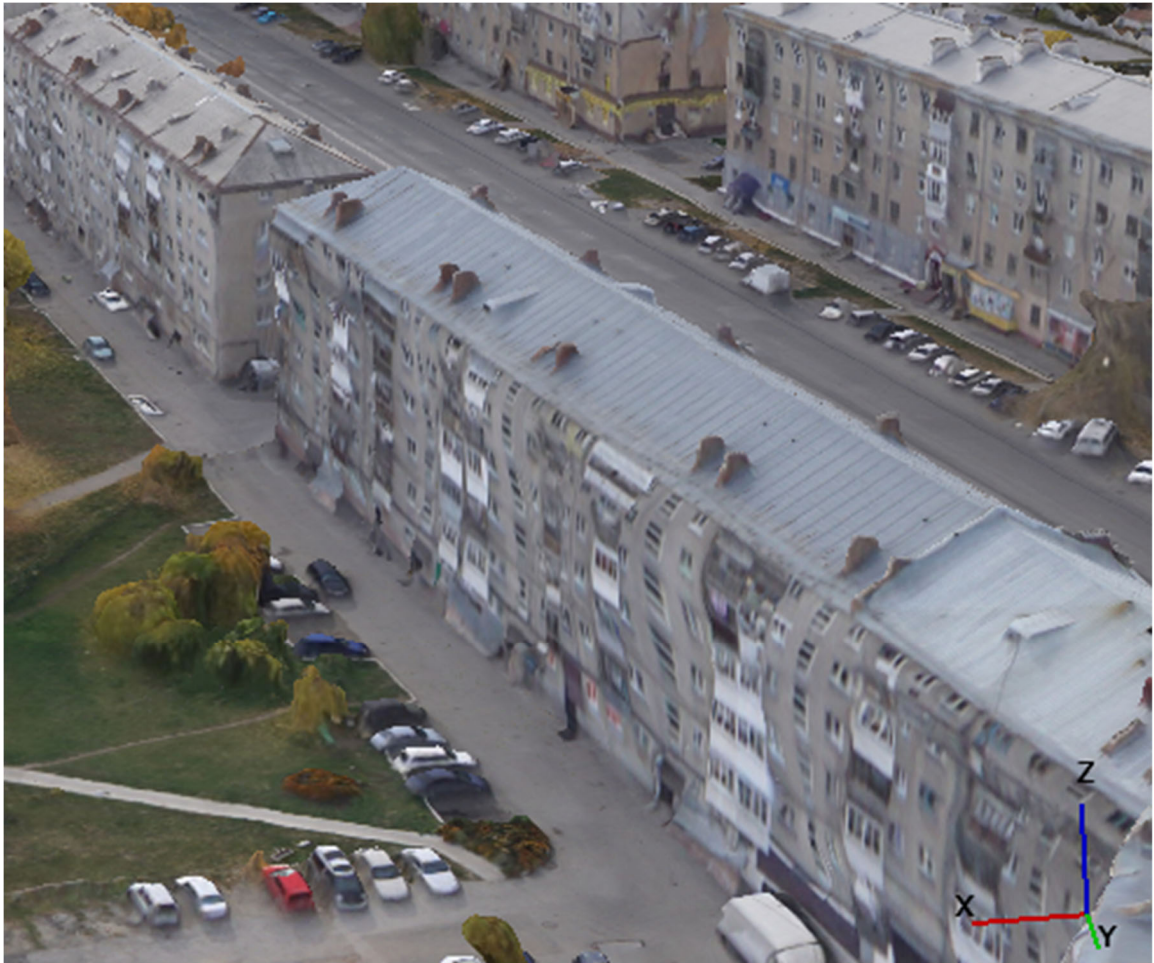


Рисунок 18 – Трехмерная тайловая модель

Высокая степень автоматизации фотограмметрической обработки снимков оставляет минимальным вмешательство оператора в процессы обработки. Контроль и редактирование этапов обработки, в случае, если это предусмотрено в ЦФС, помогают улучшить результаты обработки. Однако, если таких функций не предусмотрено, то повлиять на качество итогового результата возможно лишь загрузкой в проект качественных исходных аэрофотоснимков и измерением координат опорных точек с высокой точностью (желательно в стереорежиме). От фотографического качества аэрофотоснимков зависят и качество автоматического отождествления соответственных точек на снимках, точность уравнивания сети пространственной фототриангуляции, а также детальность построения трехмерной модели.

Для корректного срабатывания алгоритмов фотограмметрической обработки на аэрофотоснимках не должно быть изображений облаков и теней от них, ореолов, дымов. Аэрофотоснимки должны быть правильно экспонированы и обладать удовлетворительной резкостью. На аэрофотоснимках исключено присутствие «смаза», вызываемого линейным сдвигом или угловыми колебаниями воздушного судна в процессе аэрофотосъемки. На всех снимках необходима корректная передача цветов объектов и соблюдение баланса белого цвета. Области перекрытий снимков должны быть визуальны близки по интегральной яркости, контрасту, цветовому тону [19, 22].

## 2.2 Обоснование выбора съемочной аппаратуры

Несмотря на переход к использованию цифровых камер для выполнения аэрофотосъемки, общие требования, ранее предъявляемые к аналоговым аэрофотокамерам, остаются актуальными и включают в себя:

- высокое качество получаемых изображений;
- устойчивость и надежность работы;
- удобство управления и контроля;
- стремление к уменьшению габаритов и веса;
- стоимость [84].

В настоящее время, когда в качестве носителя аэрофотосъемочного оборудования широко используются беспилотные воздушные суда, факторы габаритов, веса и стоимости цифровой камеры могут быть определяющими при выборе съемочного оборудования и проектировании аэрофотосъемки, при этом качество получаемых изображений должно соответствовать типу решаемой задачи и подчиняться действующим регламентирующим документам.

В первом разделе установлено, что для аэрофотосъемки городских территорий в целях их трехмерного моделирования чаще используются беспилотные воздушные суда самолетного типа, что обусловлено их техническими и конструктивными осо-

бенностями. Однако отсутствие в ряде моделей БВС гиросtabilизированной платформы в комплексе с цифровой неметрической камерой может приводить к значительному ухудшению качества аэрофотоизображений. В [5, 6] рассмотрены группы факторов, влияющих на исходное качество снимков, к которым относятся природные условия аэрофотосъемки, технические условия и параметры аэрофотосъемки, технологические параметры первичной обработки снимков.

Согласно [6], к техническим условиям аэрофотосъемки относятся технические особенности камеры, в том числе тип затвора. Затвор в любой аэрофотокамере является одним из самых важных конструктивных элементов, определяющих пригодность и пределы использования ее в аэрофотосъемочных целях.

По типу физической реализации затворы в цифровых камерах бывают механическими, электронными или их комбинацией.

По принципу действия затворы цифровых камер можно разделить на две группы – в первой экспонирование кадра происходит одномоментно, сюда относятся центральные и глобальные затворы, а ко второй группе относятся затворы, с помощью которых формирование кадра происходит построчно – шторно-щелевые и сканирующие затворы, классификация цифровых камер по типу затвора представлена рисунке 19.

К основным качественным показателям затвора цифровой камеры, используемой для аэрофотосъемки, относятся:

- диапазон изменения продолжительности экспонирования и стабильность ее параметров;
- величина и устойчивость оптического коэффициента полезного действия;
- сохранение ортоскопичности изображения;
- надежность и износостойчивость цифровой камеры [20, 84].

Принципиальное отличие электронного затвора от механического заключается в отсутствии подвижных шторок, а экспонирование матрицы происходит за счет ее включения и выключения во время формирования кадра.

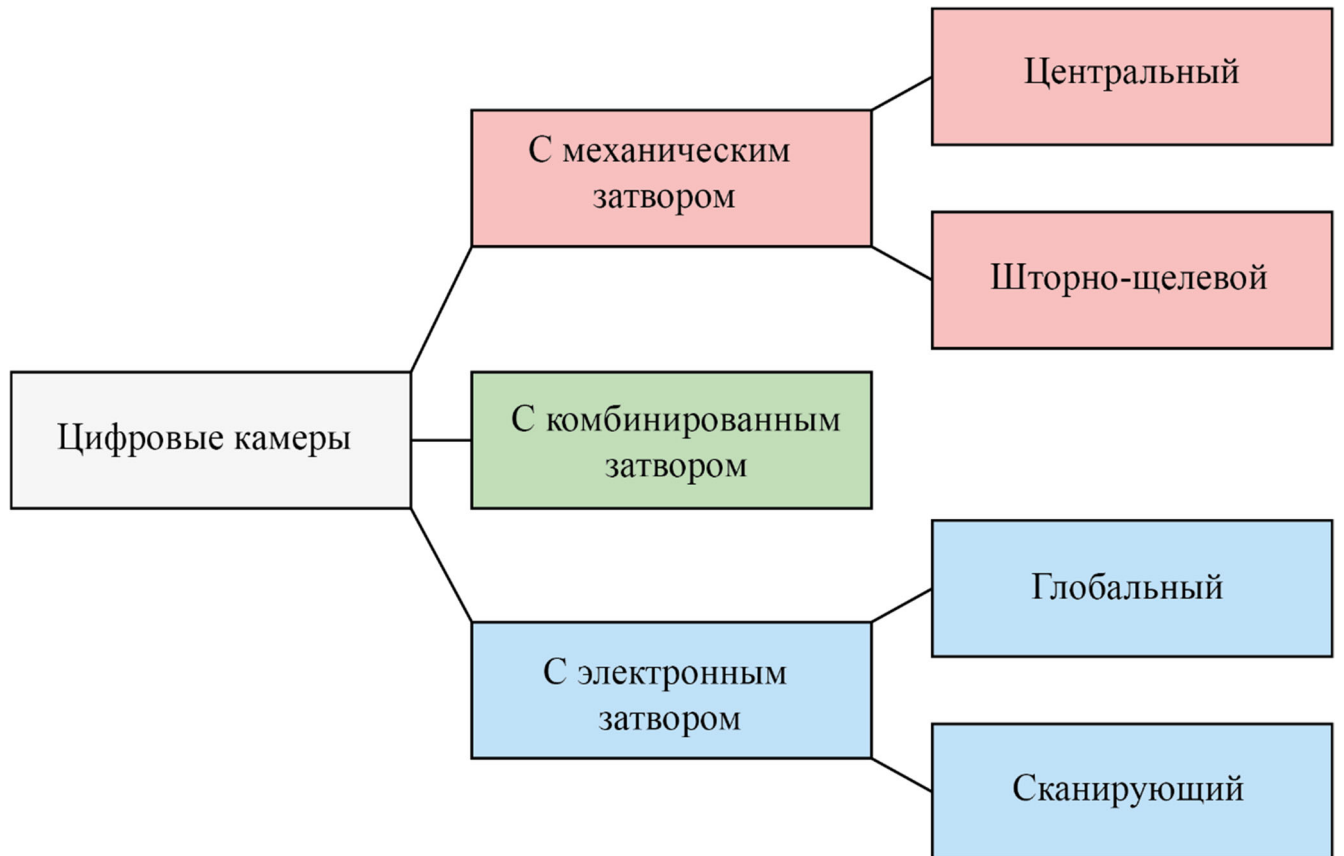


Рисунок 19 – Классификация цифровых камер по типу затворов

Электронный затвор позволяет получать изображения со сверхкороткой выдержкой, согласно [98], в цифровой камере, оснащенной двумя затворами, при срабатывании механического затвора самая короткая выдержка достигает  $1/8\ 000$  с, а электронного –  $1/64\ 000$  с.

Также при фотографировании камерами с электронными затворами увеличивается количество кадров в секунду. Однако на сегодняшний день производство электронных затворов глобального типа технологически сложнее и финансово более затратно, поэтому практически все электронные затворы являются сканирующими.

Для аэрофотосъемки необходимо использовать цифровые камеры с центральным затвором. Центральный затвор обеспечивает одновременное экспонирование матрицы по всему полю кадра без геометрического искажения изображения и из-

менения освещенности по полю изображения, что соответствует требованиями, предъявляемым [22].

При всех преимуществах цифровых камер с центральными затворами есть один весомый недостаток – их стоимость. При аэрофотосъемке с беспилотных воздушных судов иногда случается потеря связи с судном по радиоканалам, происходят непредвиденные столкновения воздушного судна с помехами, что может привести к его аварийной посадке или крушению. Установленное на борту съемочное оборудование может быть повреждено и непригодно для дальнейшего использования. Поэтому организации, занимающиеся аэрофотосъемкой, используют менее дорогие по стоимости цифровые камеры, как правило, оснащенные шторно-щелевыми затворами. Потеря такой камеры, безусловно, причинит ущерб материально-техническому оснащению производственной организации, но он будет не столь весомым, как в случае потери цифровой камеры с центральным затвором.

Например, стоимость цифровой камеры с центральным затвором Sony DSC-RX1RM2 на сайте производителя начинается от 499 990 руб., в то время как цифровая камера со шторно-щелевым затвором Sony Alpha 6000 в российских интернет-магазинах техники стоит от 50 000 руб.

Устройство шторно-щелевого затвора состоит из открывающей и закрывающей шторки, а экспонирование происходит через щель между ними [65].

Экспонирование матрицы в цифровых камерах со шторно-щелевыми затворами происходит не одновременно в пределах поля снимка, а последовательно (построчно) во время перемещения носителя аэрофотосъемочного оборудования со скоростью  $W$ .

На рисунке 20 наглядно представлен процесс формирования изображения шторно-щелевым затвором.

Неодновременное экспонирование точек изображения, изменение линейного и углового положения беспилотного воздушного судна в пространстве, а также

вибрации воздушного судна приводят к искажению геометрии снимка, называемому нарушением ортоскопичности снимка [109, 111]. На рисунке 21 схематично показаны искажения снимка в зависимости от направления движения затвора  $v$  и направления полета  $W$  [65].

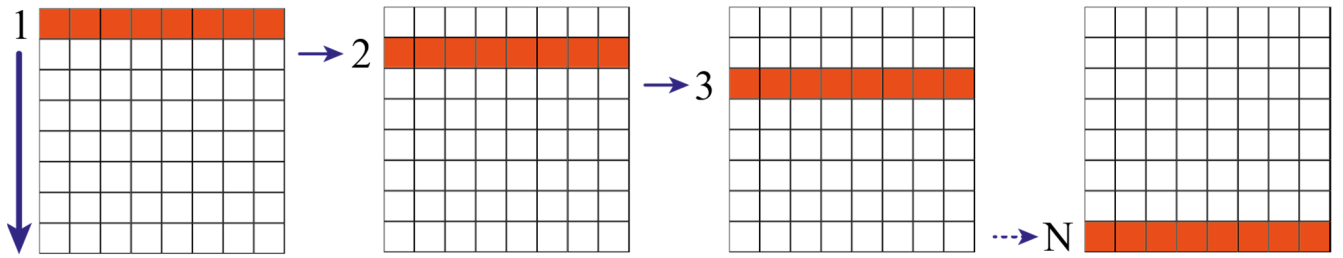


Рисунок 20 – Процесс формирования изображения шторно-щелевым затвором

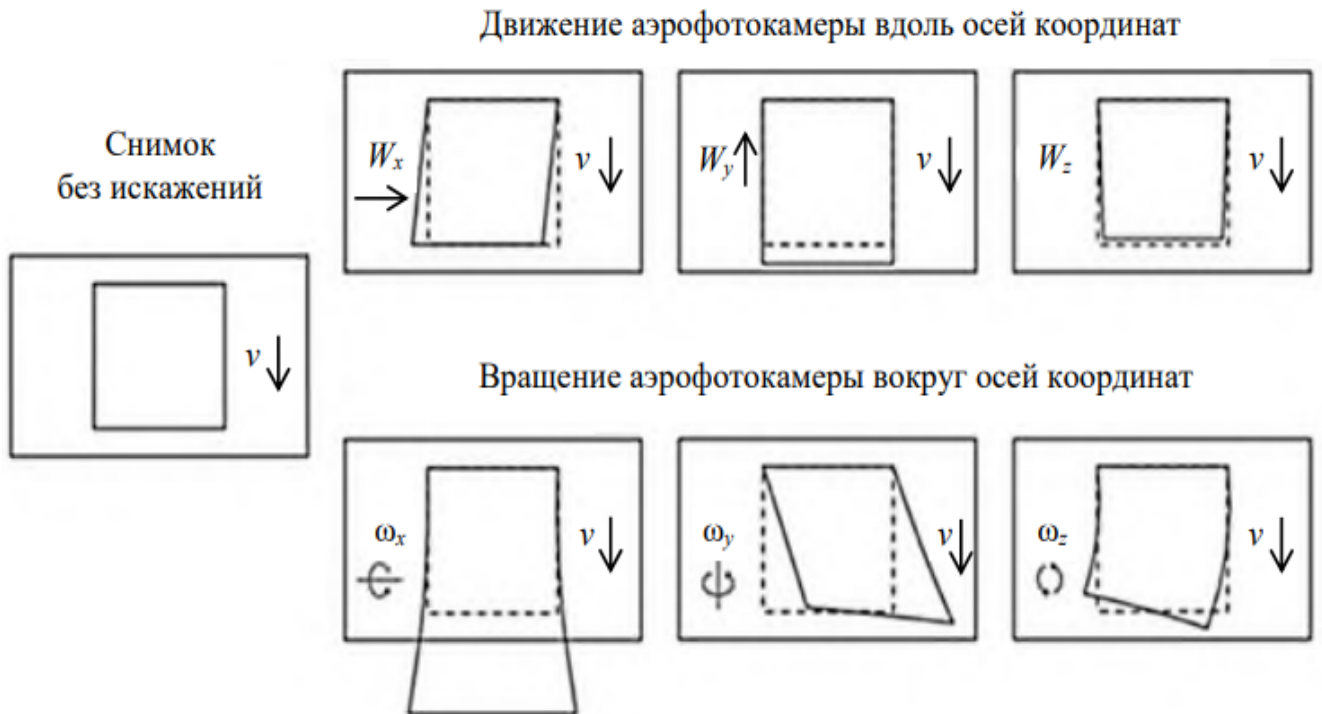


Рисунок 21 – Нарушение ортоскопичности снимка при использовании шторно-щелевого затвора [65]

В результате линейного перемещения носителя аэрофотосъемочного оборудования в момент выдержки и вибраций аэрофотокамеры возникают искажения снимка из-за его сдвига. Под сдвигом изображения понимается смещение оптического изображения при формировании его в плоскости фотограмметрического снимка за время полной выдержки, вызванное поступательным или угловым перемещением съемочной камеры или объекта фотограмметрической съемки [21].

Величина сдвига в значительной степени ухудшает разрешающую способность снимка, а также его измерительные и дешифровочные свойства. Для уменьшения влияния искажений, вызванных шторно-щелевым затвором в ходе движения носителя аппаратуры  $\Delta x$  и ввода соответствующих поправок, следует рассчитывать величины смещений точек на снимке по формуле [11]

$$\Delta x = \frac{fW}{H} \Delta t, \quad (6)$$

где  $f$  – фокусное расстояние камеры, мм;

$W$  – скорость движения носителя, м/с;

$H$  – высота фотографирования, м;

$\Delta t$  – время формирования снимка, с.

При аэрофотосъемке допустимая величина  $\Delta x = 0,05$  мм при масштабе 1 : 10 000 и мельче и  $\Delta x \leq 0,1$  мм при аэрофотосъемке в более крупных масштабах.

Возможные смещения координат точек на снимках по угловым элементам с учетом малости углов вычисляются по формуле

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \frac{xy}{f} \Delta \omega + \left( f + \frac{x^2}{f} \right) \Delta \alpha + y \Delta \kappa \\ \Delta y &= \left( f + \frac{x^2}{f} \right) \Delta \omega - \frac{xy}{f} \Delta \alpha - \Delta \kappa \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $\Delta x, \Delta y$  – величины смещения координат точек на снимке;

$\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa$  – величины изменения угловых элементов внешнего ориентирования за время срабатывания затвора;

$x, y$  – координаты точек на снимке [46–48].

Искажения снимков, вызываемые шторно-щелевым затвором, можно классифицировать как случайные и систематические.

К случайным относятся искажения, вызванные вращением аэрофотокамеры вокруг осей координат, возникающим из-за изменения скорости воздушного судна и высоты фотографирования, к систематическим – искажения, связанные с дисторсией объектива.

Для выявления искажений необходимо проводить исследования по установлению фактического времени формирования кадра камерами со шторно-щелевыми затворами, определению скорости изменения линейных и угловых скоростей воздушного судна для вычисления значений изменения элементов внешнего ориентирования снимков, что позволит исключить или уменьшить искажения, вызванные шторно-щелевыми затворами.

### 2.3 Определение параметров шторно-щелевых затворов

Для вычисления величин искажений, вызываемых шторно-щелевыми затворами необходимо определять параметры затвора – эффективную выдержку  $t_{\text{эф}}$ , фактическую выдержку  $t_{\text{ф}}$ , коэффициент полезного действия.

В цифровых камерах со шторно-щелевым затвором экспонирование происходит по мере перемещения шторки со щелью, следовательно,  $t_{\text{эф}}$  вычисляется по формуле

$$t_{\text{эф}} = \frac{e}{V_{\text{шт}}}, \quad (8)$$

где  $e$  – ширина щели;

$V_{шт}$  – скорость движения шторки.

Фактическая выдержка – это промежуток времени, за который точка матрицы цифровой камеры подвергается непрерывному освещению. Для шторно-щелевого затвора фактическая выдержка вычисляется как сумма продолжительности фазы открытия шторки и эффективной выдержки [11, 65, 67].

Определение названных характеристик возможно с помощью специального измерительного стенда с лентами светодиодов [65], переключение которых происходит по принципу бегущей волны, время переключения которых значительно меньше времени работы шторно-щелевого затвора цифровой камеры (рисунок 22).

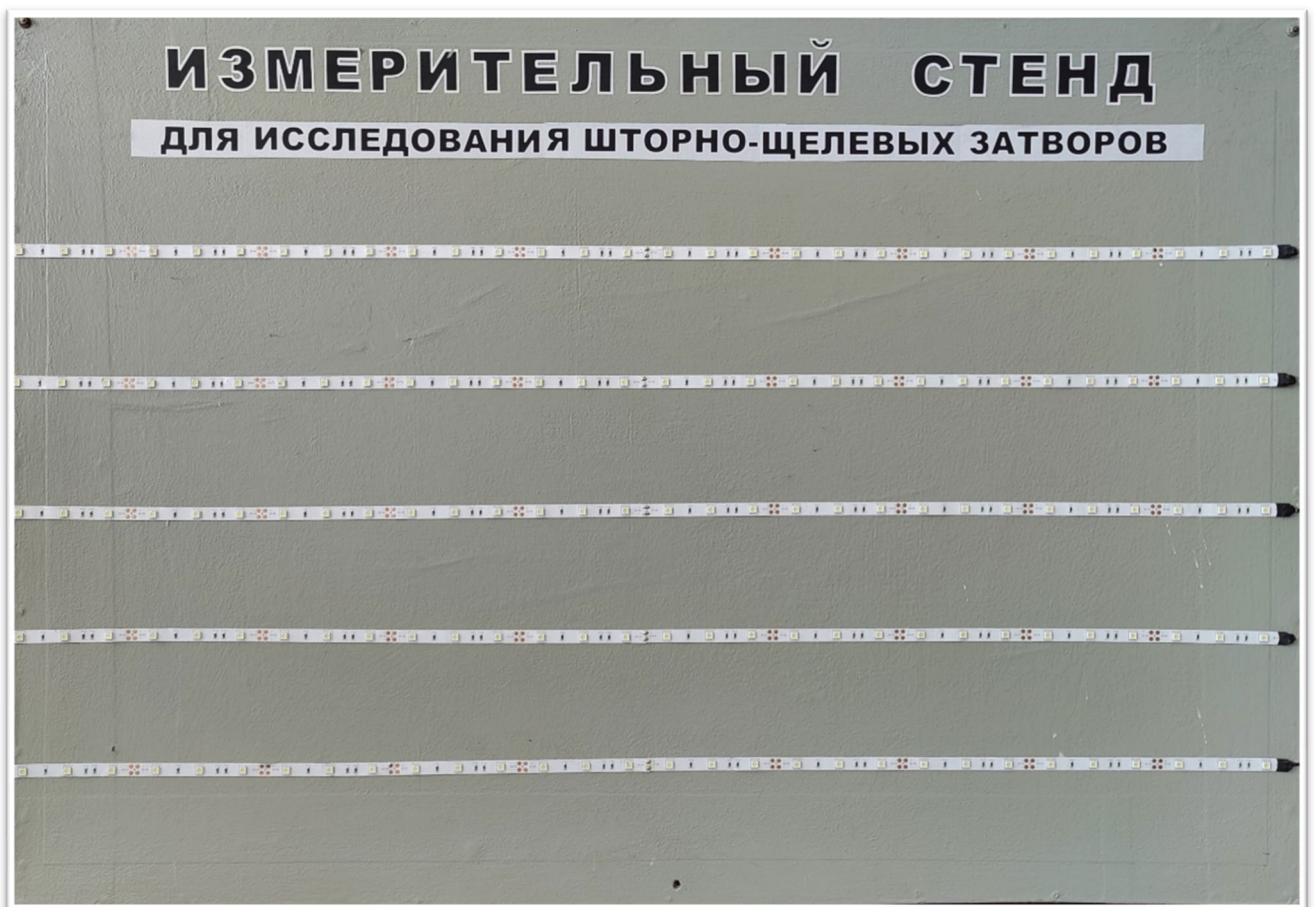


Рисунок 22 – Измерительный стенд для определения параметров шторно-щелевых затворов цифровых камер

В ходе эксперимента определялись параметры цифровой неметрической камеры Sony Alpha 6000 со шторно-щелевым затвором путем фотографирования измерительного стенда. В таблице 3 приведены параметры исследуемой цифровой камеры.

Таблица 3 – Параметры исследуемой цифровой камеры Sony Alpha 6000

Параметр	Значение
Фокусное расстояние $f$ , мм	20
Размер изображения, пиксель	6 000 × 4 000
Размер матрицы, мм	23,5 × 15,6

К необходимым условиям проведения эксперимента относятся условие перпендикулярности оптической оси объектива относительно плоскости стенда и расположение светодиодных лент измерительного стенда вдоль вектора движения шторок с полным перекрытием кадра от края до края.

Учитывая, что фактическая выдержка превышает эффективную, на полученном снимке измерительного стенда наблюдается «волна» из горящих светодиодов (рисунок 23).

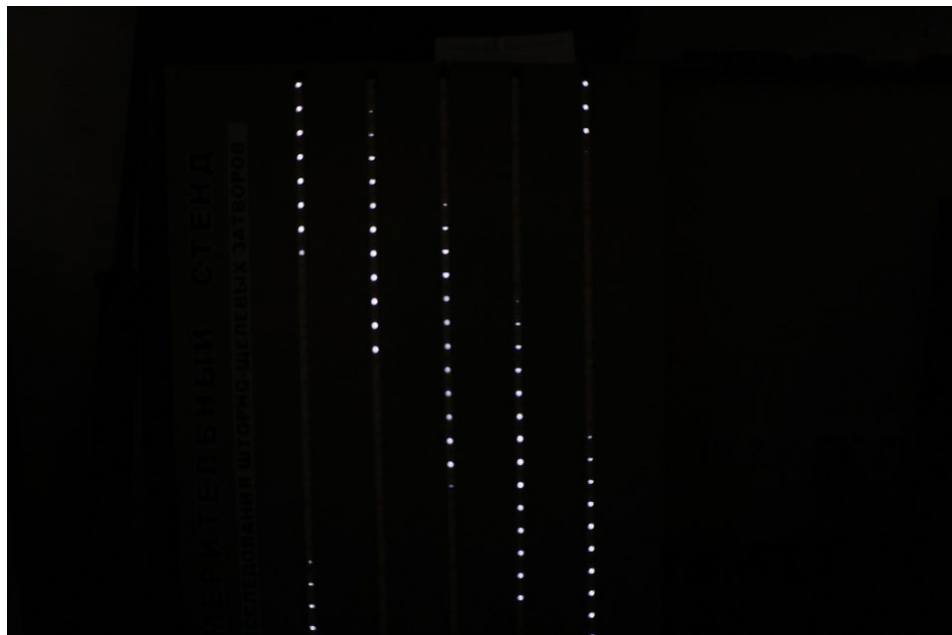


Рисунок 23 – Снимок измерительного стенда, полученный цифровой камерой Sony Alpha 6000 со шторно-щелевым затвором

На рисунке 24 представлена диаграмма работы шторно-щелевого затвора цифровой камеры Sony Alpha 6000.

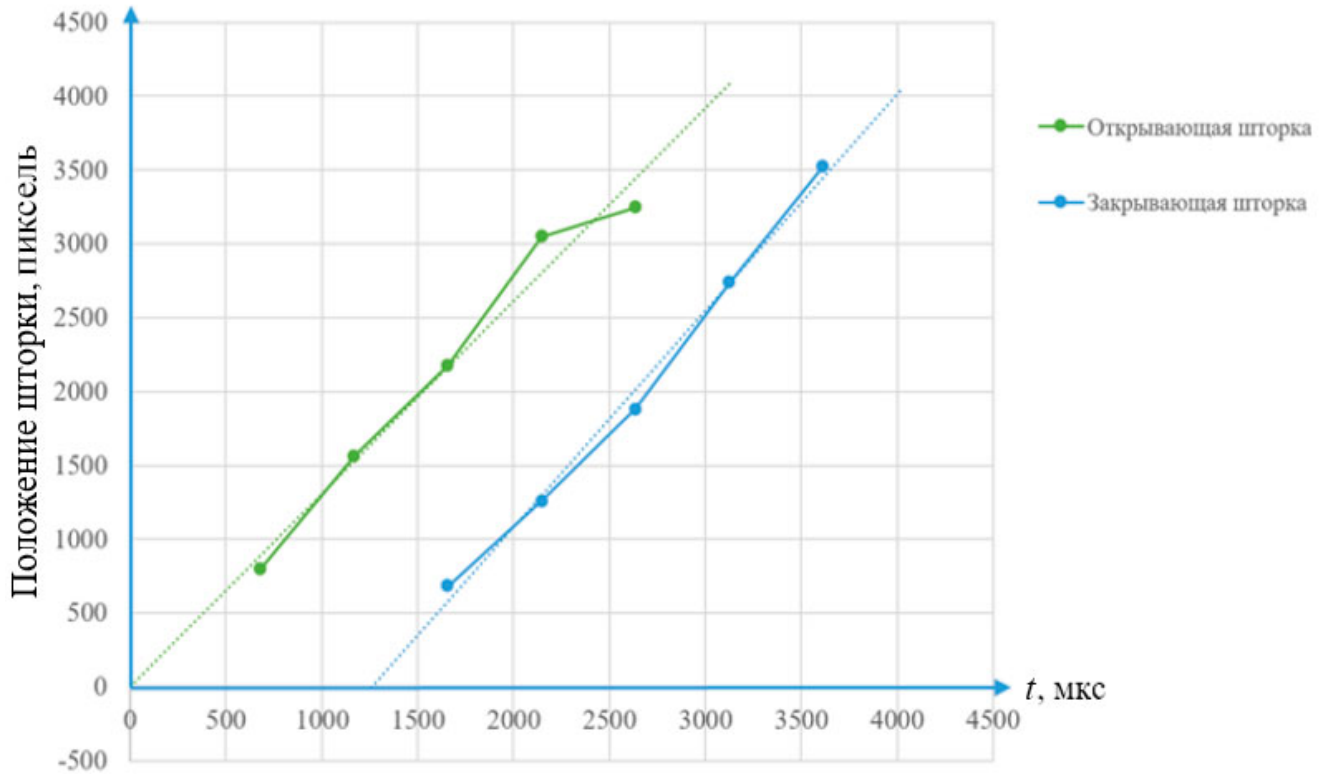


Рисунок 24 – Диаграмма работы шторно-щелевого затвора цифровой камеры Sony Alpha 6000

В таблице 4 приведены результаты по экспериментальному установлению фактической и эффективной выдержек исследуемой камеры.

Таблица 4 – Результаты исследования параметров цифровой камеры Sony Alpha 6000

Выдержка, с			КПД, %
установленная	эффективная	фактическая	
1 : 1 000	1 : 794	1 : 250	31

В ходе проведенного эксперимента установлены величины параметров шторно-щелевого затвора цифровой неметрической камеры Sony Alpha 6000. В совокупности с измерениями линейных и угловых перемещений беспилотного воздушного судна возможно установление величин искажений, вызываемых шторно-щелевыми затворами.

## 2.4 Исследование влияния и учет искажений изображений, сформированных цифровой камерой со шторно-щелевым затвором

### 2.4.1 Способы уменьшения влияния шторно-щелевого затвора на измерительное качество снимков

Учет и исправление искажений, вызываемых шторно-щелевыми затворами, можно осуществить тремя способами.

Первый способ – технологический, включающий в себя проектирование аэрофотосъемки и выбор съемочного оборудования. 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», как показано на рисунке 25.

При этом установка цифровой камеры со шторно-щелевым затвором должна быть осуществлена таким образом, чтобы направление движения шторки осуществлялось поперек направления полета.

Подобный способ проведения аэрофотосъемки позволит компенсировать искажения, вызванные шторно-щелевым затвором. Для плановой аэрофотосъемки полученные таким образом снимки позволят выполнять трехмерное моделирование территорий с достаточной информацией для построения текстур.

Вторым способом компенсации влияния шторно-щелевого затвора является программная компенсация усредненных искажений, реализуемая в фотограммет-

рическом программном обеспечении, например, в ЦФС Photomod компенсация влияния эффекта шторно-щелевого затвора осуществляется за счет вычисления систематических ошибок блока и составления математической модели искажений цифровой камеры. Еще одним вариантом компенсации является расчет модели искажений снимка и внесение соответствующих поправок отдельно для каждого снимка (ПО Agisoft Metashape).

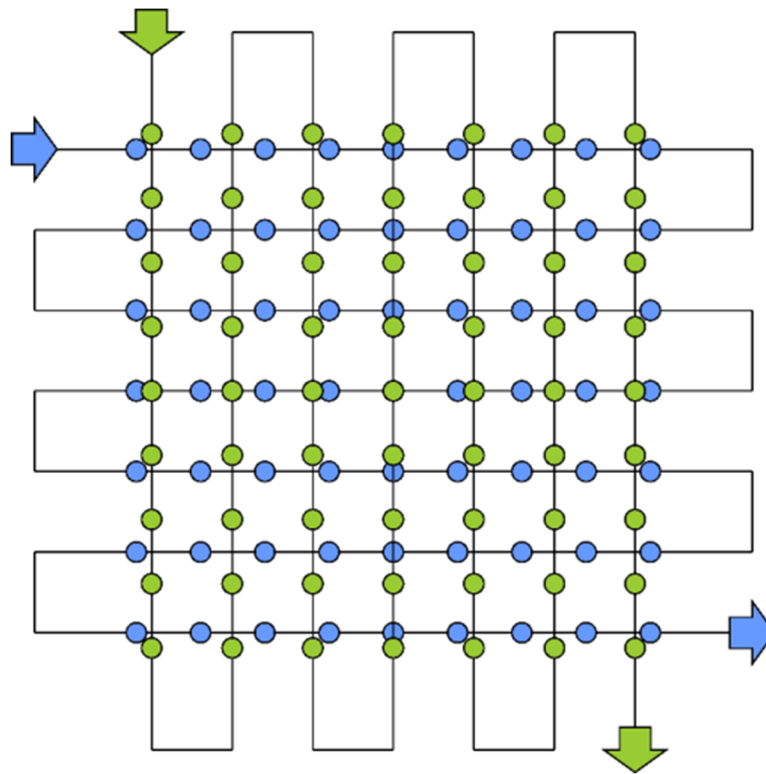


Рисунок 25 – Схема проведения аэрофотосъемки в двух направлениях

Третий способ предусматривает предварительную обработку снимков, в процессе которой снимок приводится к центральной проекции. Для этого требуется информация о внешних факторах, влияющих на аэрофотокамеру в момент формирования снимков, – скорость воздушного судна и ее изменение, угловые элементы внешнего ориентирования и скорость их изменения. Фиксировать данные параметры возможно с помощью специального устройства на борту, называемого бортовым самописцем, который независимо регистрирует величины и скорости изменения угловых перемещений.

## 2.4.2 Исследование динамики изменения скорости воздушного судна в процессе аэрофотосъемки

Целью эксперимента являлось определение динамики изменения скорости движения воздушного судна на основе полетных данных, полученных с бортового ГНСС-приемника. Эксперимент включал в себя определение максимальной скорости воздушного судна, выявление влияния линейного перемещения носителя аэрофотосъемочного оборудования в пространстве, фотограмметрическую обработку выделенного в результате анализа данных участка аэрофотосъемки.

Исходные данные для проведения эксперимента:

- цифровые аэрофотоснимки на территорию Ленинского района г. Новосибирска. Аэрофотосъемка проводилась цифровой камерой Sony Alpha A6000 со шторно-щелевым затвором, установленной на борту беспилотного воздушного судна самолетного типа Supercam S350. Изменение угловой ориентации съемочной камеры в момент формирования изображения шторно-щелевым затвором зачастую зависит от стабильности носителя съемочной аппаратуры, поэтому большой интерес в исследовании вызывают беспилотные воздушные суда самолетного типа, где во многих моделях отсутствует гиростабилизированная платформа и съемочная камера жестко закреплена;
- данные, полученные с бортового ГНСС-приемника;
- каталог опорных точек.

В ходе эксперимента определялась скорость, с которой беспилотное воздушное судно преодолеvalo расстояние за время между получением соседних снимков в маршруте. Скорость рассчитывалась, исходя из разницы значений координат центров фотографирования двух соседних снимков и интервала фотографирования, равного 10 с. Общее количество снимков в маршрутах исследуемой аэрофотосъемки составило 3 444.

На основе вычислений средняя скорость беспилотного воздушного судна самолетного типа  $W_{\text{ср}}$  в ходе проведения аэрофотосъемки составила 23 м/с. Анализ

расчета скорости позволил выявить участок съемки с максимальными отклонениями в рассчитанных значениях скорости, достигающих значений до 37 м/с (рисунок 26).



Рисунок 26 – Участок аэрофотосъемки с максимальным отклонением скорости воздушного судна

Скачкообразное изменение скорости движения воздушного судна, как правило, обусловлено его заходом на смежный маршрут или спровоцировано влиянием условий внешней среды.

Ввиду того, что исследуемый участок маршрута был прямым, изменение скорости, очевидно, связано с резким порывом ветра.

Результаты вычисления изменения скорости беспилотного воздушного судна Supercam S350 на исследуемом участке аэрофотосъемки показаны на рисунке 27.

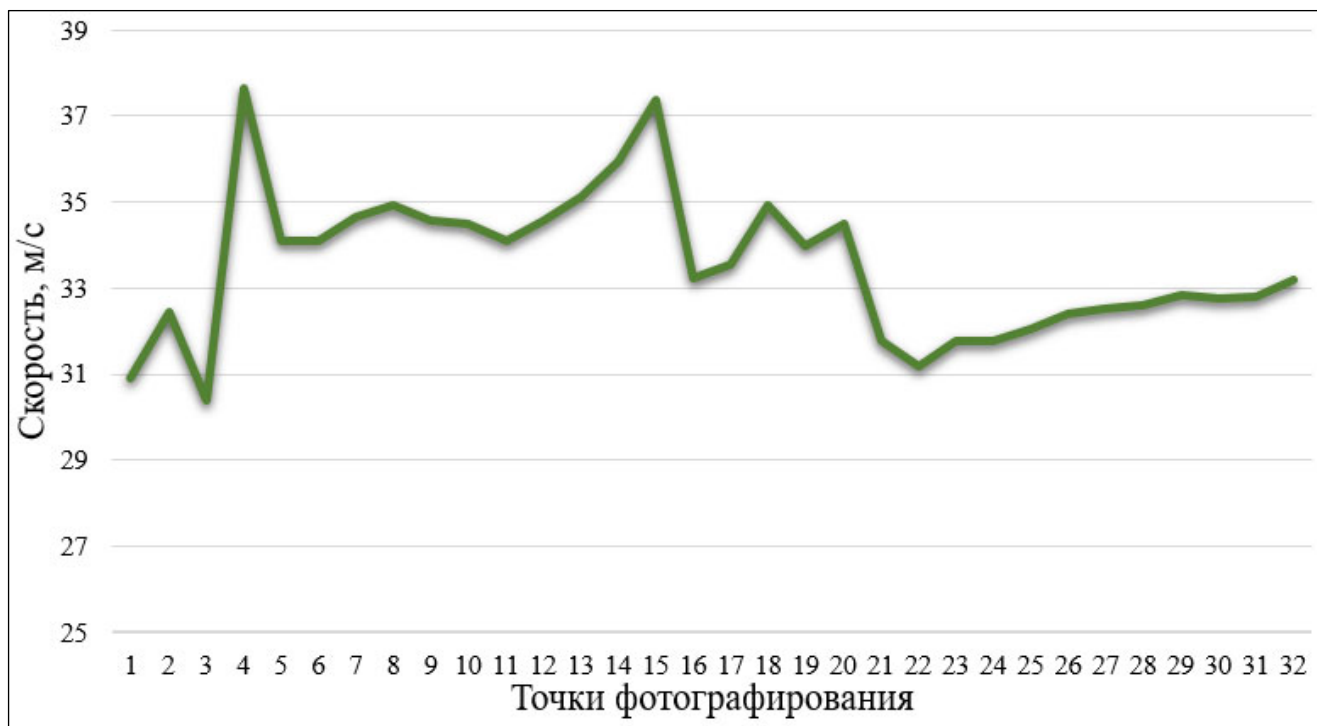


Рисунок 27 – Изменение скорости летательного аппарата в процессе аэрофотосъемки на исследуемом участке

Резкий перепад скорости при движении воздушного судна влияет на геометрию формирования изображения, вызывая искажения, связанные с линейными и угловыми перемещениями воздушного судна. Наличие подобных искажений на снимках приводит к накоплению ошибок при их фотограмметрической обработке.

В таблице 5 приведены значения линейных искажений при движении воздушного судна с крейсерской скоростью – 23 м/с и максимальной скорости 37 м/с, рассчитанной по полетным данным. Относительно поверхности Земли средняя высота аэрофотосъемки на данном участке составила 275 м. Размер одного пикселя на местности  $\approx 5$  см.

Таблица 5 – Расчет линейных искажений снимка, вызванных изменением скорости воздушного судна

Параметр	Значение	
$f$ , мм	20	
$\Delta t$ , с	1/250	
Размер пикселя, мкм	4	
$W$ , м/с	23	37
$H$ , м	275	
$\Delta x$ , мкм	6,7	10,8
$\Delta x$ , пикс	1,7	2,7

При разрешении съемки, равном 5 см, размер линейных искажений будет достигать 14 см, подобное искажение снижает точность фотограмметрических измерений по снимкам.

Далее была проведена фотограмметрическая обработка данного участка аэрофотосъемки в ПО Agisoft Metashape. Обработка проводилась с целью проверки функции компенсации влияния шторно-щелевого затвора. Интерфейс активации данной функции показан на рисунке 28.

Всего было выполнено три варианта обработки, в ходе каждой обработки выполнялась самокалибровка камеры. Первая обработка проводилась без компенсации эффекта шторно-щелевого затвора, две последующие с компенсацией. В данном ПО компенсация влияния шторно-щелевого затвора осуществляется с учетом

угловых вращений аэрофотокамеры и без их учета. В обработке были задействованы шесть опорных и четыре контрольные точки.

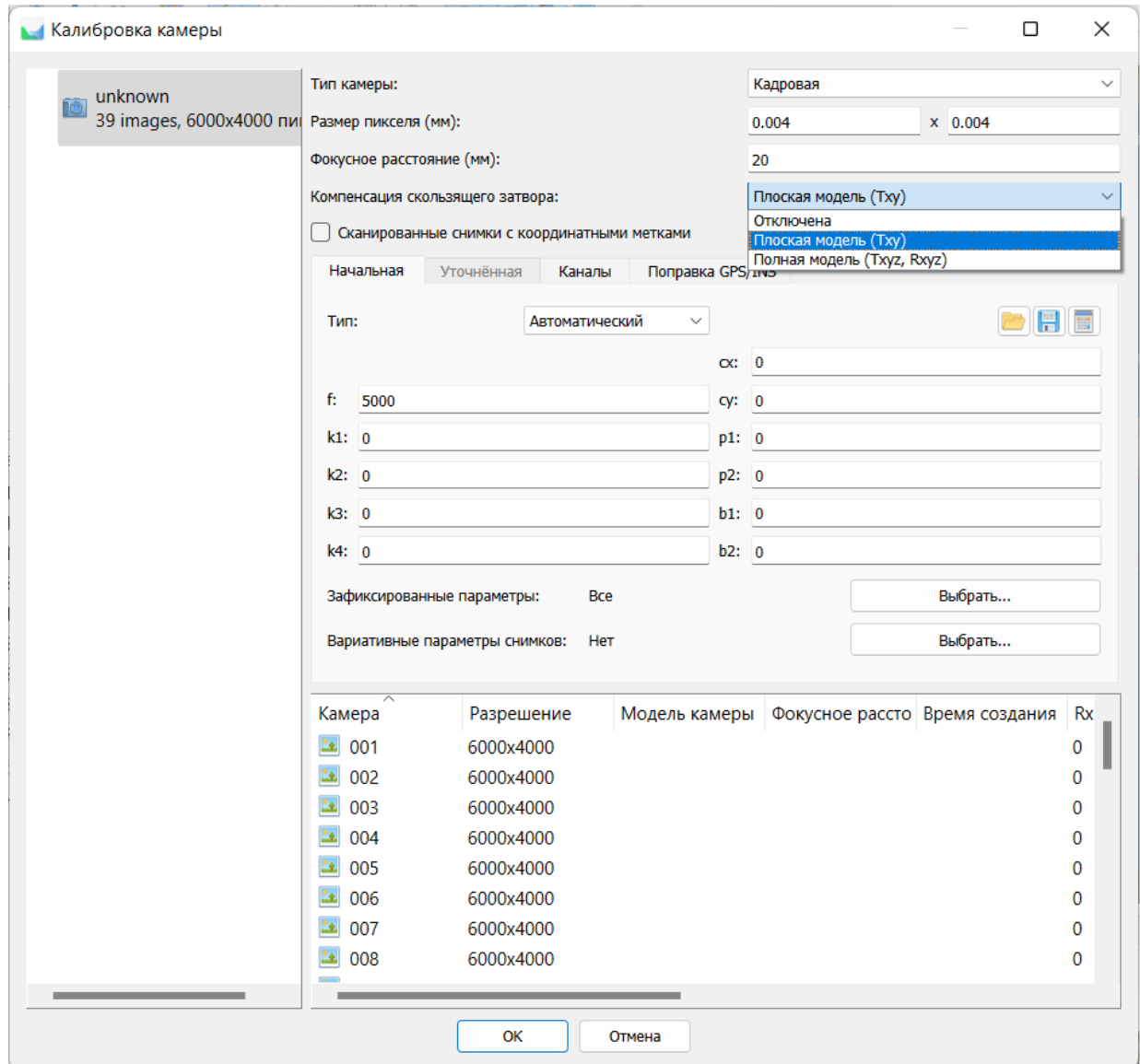


Рисунок 28 – Интерфейс активации функции шторно-щелевого затвора в программном обеспечении

Схема расположения опорных и контрольных точек показана на рисунке 29.

В таблице 6 приведены значения оценки точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции исследуемого участка аэрофотосъемки.



Рисунок 29 – Схема расположения опорных и контрольных точек участка аэрофотосъемки

Анализ данных позволил установить, что применение программных алгоритмов компенсации влияния шторно-щелевых затворов влияет на точность уравнивания сети пространственной фототриангуляции. Применение двух моделей компенсации показывает повышение точности определения планового положения координат опорных точек в среднем на 20 %.

Таблица 6 – Оценка точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции

Алгоритм обработки	Точки	СКП X, м	СКП Y, м	СКП Z, м	СКП XY, м
Без компенсации влияния шторно-щелевого затвора	Опорные	0,09	0,17	0,13	0,20
	Контрольные	0,14	0,76	0,98	0,78
Компенсация влияния шторно-щелевого затвора без учета угловых вращений аэрофотокамеры	Опорные	0,11	0,03	0,10	0,12
	Контрольные	0,17	0,97	0,85	0,98
Компенсация влияния шторно-щелевого затвора с учетом угловых вращений аэрофотокамеры	Опорные	0,07	0,03	0,09	0,07
	Контрольные	0,16	0,81	0,90	0,82

#### 2.4.3 Исследование изменения элементов внешнего ориентирования в процессе аэрофотосъемки

Целью эксперимента являлось определение характеристики изменения элементов внешнего ориентирования в процессе выполнения аэрофотосъемки по измерениям, полученным с бортового самописца, изображенного на рисунке 30. Влияние линейного перемещения носителя и угловые колебания приводят к искажению центральной проекции, следовательно, к ошибкам в измеренных координатах точек на снимках при их фотограмметрической обработке.

Использование аэрофотокамер со шторно-щелевыми затворами при съемке с беспилотных воздушных судов требует определения линейных и угловых скоростей в момент срабатывания затвора. Наиболее подходящим инструментом для этих целей является бортовой самописец [31].

В основе его работы лежит использование микроэлектромеханических систем (МЭМС-датчиков – гироскопов и акселерометров), позволяющих записывать угловые перемещения БВС.

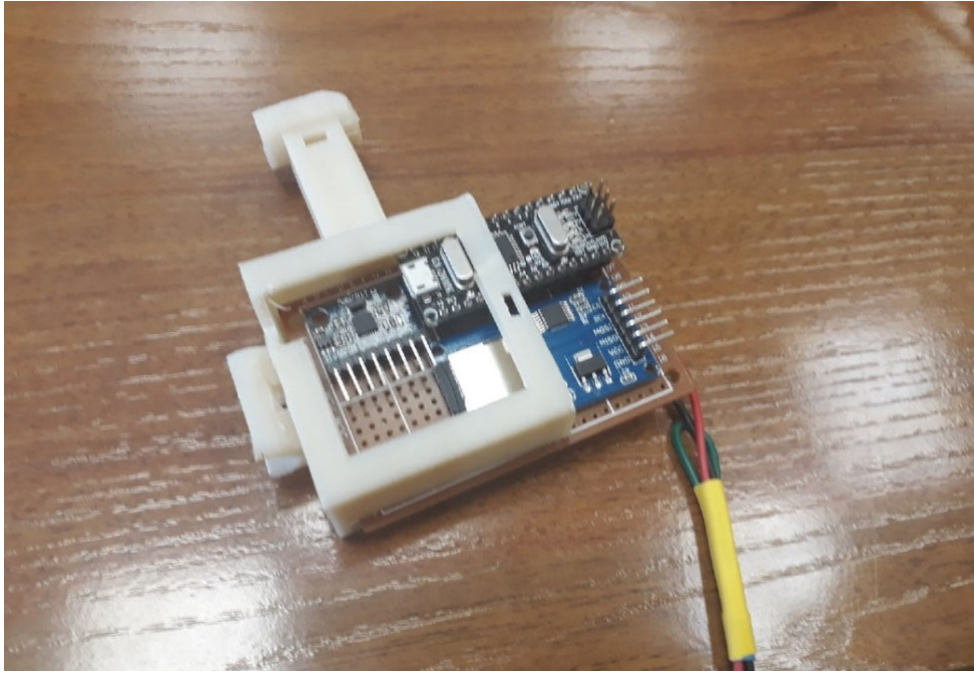


Рисунок 30 – Бортовой самописец

Исходные данные для проведения эксперимента:

- файл с набором измерений, полученных с бортового самописца;
- данные бортовой инерциальной системы (IMU).

Для проведения эксперимента на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГУГиТ была изготовлена рабочая модель бортового самописца, проведена аэрофотосъемка территории Советского района города Новосибирска. Аэрофотоснимки получены цифровой камерой Sony Alpha A6000, установленной на борту беспилотного воздушного судна самолетного типа Supercam S350. Выдержка – 1/1 000 с. Элементы внешнего ориентирования фиксировались бортовым самописцем с дискретностью 10 Гц. Высота полета составляла 260 м.

В ходе эксперимента определялись изменения угловых значений элементов внешнего ориентирования. Бортовой самописец позволял зафиксировать элементы внешнего ориентирования в процессе аэрофотосъемки. С помощью IMU фиксировались точки фотографирования и элементы внешнего ориентирования с частотой один снимок в секунду, бортовой самописец за это время фиксировал от 8 до 11 уг-

ловых значений. Таким образом, был получен файл с более чем 50 тысячами измерений.

Первым этапом обработки измерений было построение графиков изменения углов крена, тангажа и рысканья для определения маршрутов и выделения их прямолинейных частей. После определения экспериментального отрезка маршрута рассчитывались средние значения углов за 1 с для проведения корреляционного анализа с целью нахождения соответственных участков по данным бортового самописца и бортовой инерциальной системы. С коэффициентом корреляции 0,9 была определена точка маршрута. Затем был выбран участок съемки продолжительностью 10 с и построен график изменения угловых значений крена и тангажа БВС для каждой секунды, где ось абсцисс – номер измерения, а ось ординат – значения углов в градусах (рисунки 31, 32).

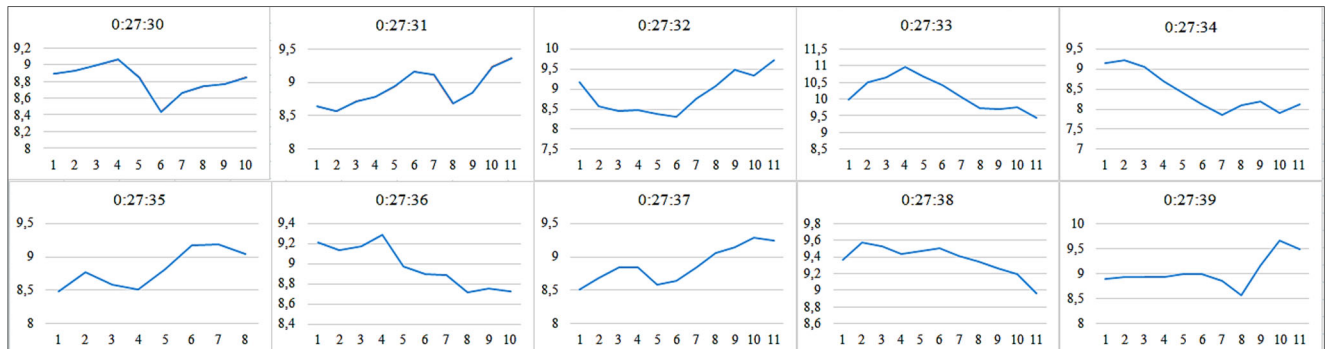


Рисунок 31 – Изменение значений угла крена за 10 с

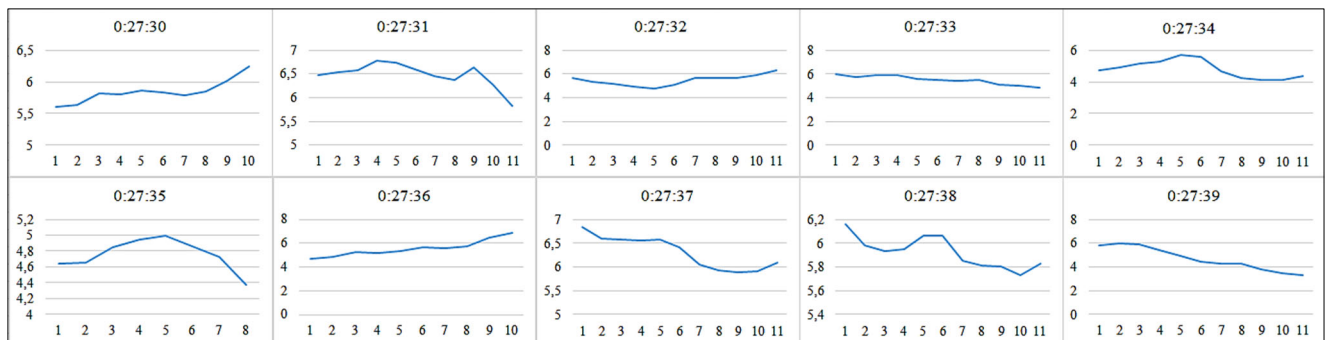


Рисунок 32 – Изменение значений угла тангажа за 10 с

Как видно из рисунков 31 и 32, изменение значений происходило поступательно, без резких перепадов. В таблице 7 приведены изменения углов за 1 с.

Таблица 7 – Изменение значений угловых величин за 1 с

Время	$\Delta$ крен, °	$\Delta$ тангаж, °
0:27:30	–	–
0:27:31	–0,21	0,22
0:27:32	–0,19	–0,17
0:27:33	0,29	–0,34
0:27:34	–0,30	–0,13
0:27:35	0,35	0,25
0:27:36	0,16	0,30
0:27:37	–0,20	–0,07
0:27:38	0,13	0,07
0:27:39	–0,06	0,01

В основном, резкие изменения угловых значений были вызваны порывами ветра или заходом беспилотного воздушного судна на маршрут.

В результате анализа данных, полученных в ходе проведения эксперимента, установлено, что изменение элементов внешнего ориентирования происходит линейно. Расчет угловых скоростей по всем записям самописца позволил выявить, что в 80 % случаев максимальное изменение угла по крену не превышает  $10^\circ$  в секунду.

При фактической выдержке цифровой камеры, равной  $1/250$  с, изменение угловой величины в момент формирования снимка составляет  $0,04^\circ$ .

Следующим шагом было вычисление возможных смещений по формуле (7).

Величины смещения точек на снимке, вызванные изменением угловых элементов внешнего ориентирования снимка за  $1/250$ ,  $1/300$ ,  $1/500$  с для цифровой камеры Sony Alpha A6000, приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Величины смещений  $\Delta x$  и  $\Delta y$ 

Параметры цифровой камеры Sony Alpha A6000			
$f$ , мм	20		
$\Delta t$ , с	1/250	1/300	1/500
$\Delta x$ , мм	0,031	0,026	0,021
$\Delta x$ , пиксель	7,791	6,492	5,303
$\Delta y$ , мм	0,008	0,004	0,003
$\Delta y$ , пиксель	2,053	1,093	0,778

Из таблицы 8 видно, что без учета погрешностей, вызванных изменением угловых элементов внешнего ориентирования за время формирования снимка, получаемые изображения имеют существенные искажения.

#### 2.4.4 Построение и фотограмметрическая обработка макетных снимков

Целью эксперимента являлось построение нескольких наборов цифровых макетных снимков. В первом случае было осуществлено моделирование идеального случая плановой аэрофотосъемки, в которой отсутствуют искажения, вызванные изменением линейных и угловых величин снимка.

Исходные данные для эксперимента:

- эталонный ортофотоплан для моделирования съемки;
- цифровые макетные снимки.

Макетный снимок – эталонный цифровой снимок, сгенерированный в программе Im\_Shutter (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669829), предназначенной для моделирования макетных снимков, в зависимости от параметров аэрофотосъемки и съемочной аппаратуры [41, 52].

Для проведения эксперимента снимок создавался по параметрам реальной цифровой камеры Sony Alpha A6000 со шторно-щелевым затвором на основе фрагмента эталонного ортофотоплана с сеткой контрольных крестов, нанесенных через

20 м, участка аэрофотосъемки Ленинского района, размер кадра  $6\,000 \times 4\,000$  пикселей, фокусное расстояние 20 мм (5 000 пикселей), и координатами главной точки  $x_0 = 3\,000$  пикселей и  $y_0 = 2\,000$  пикселей, представлен на рисунке 33.



Рисунок 33 – Цифровой макетный снимок

Для проведения эксперимента выполнено моделирование аэрофотосъемки, включающей четыре маршрута в продольном направлении, общее количество снимков составило 40. На рисунке 34 представлена схема блока снимков в ПО Agisoft Metashape.

Ввиду отсутствия искажения макетных снимков, вызванного линейным и угловым перемещением воздушного судна в пространстве, фотограмметрическая обработка с компенсацией влияния шторно-щелевого затвора не проводилась.

Результаты уравнивания сети пространственной фототриангуляции представлены в таблице 9.

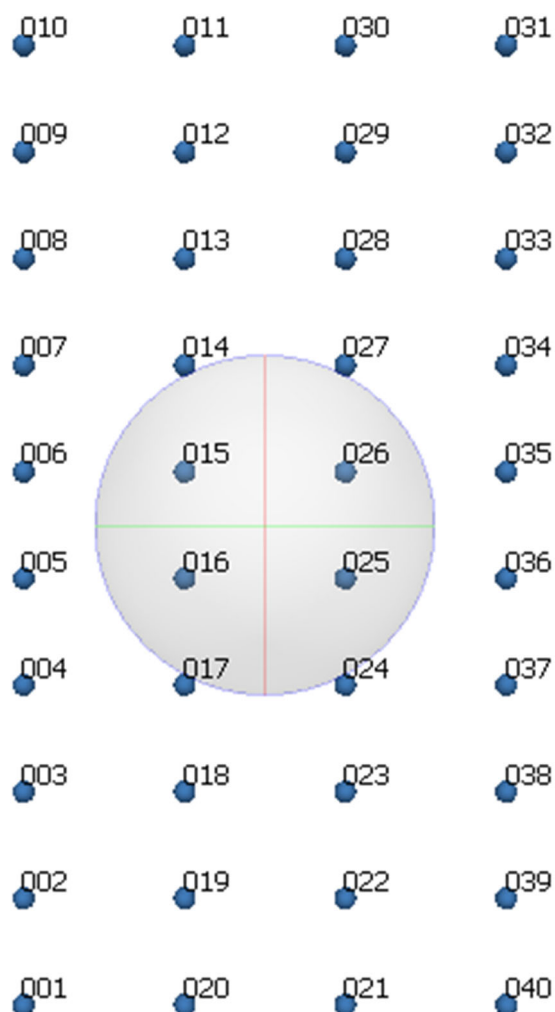


Рисунок 34 – Схема расположения снимков в маршрутах аэрофотосъемки

Таблица 9 – Результаты уравнивания сети пространственной фототриангуляции, полученные в ходе фотограмметрической обработки макетных снимков без искажений

Алгоритм обработки	Точки	СКП X, м	СКП Y, м	СКП Z, м	СКП XY, м
Без компенсации влияния шторно-щелевого затвора	Опорные	0,0020	0,0012	0,0007	0,0023
	Контрольные	0,0074	0,0089	0,0040	0,0115

На рисунке 35 представлен ортофотоплан, полученный в результате обработки макетных аэрофотоснимков.



Рисунок 35 – Ортофотоплан, полученный в результате обработки цифровых макетных снимков

Во втором случае моделирование цифровых макетных снимков проводилось для случая плановой аэрофотосъемки по параметрам цифровой неметрической камеры Sony Alpha A6000, приведенном в описании первого случая, при моделиро-

вании которого задавались элементы внешнего ориентирования для каждого снимка  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\omega = 5^\circ$ ,  $\kappa = 0$ , и приращения углов  $d\alpha = 0$ ,  $d\omega = 0,04^\circ$ ,  $d\kappa = 0$ , значения взяты из результатов обработки данных бортового самописца из 2.4.2, скорость движения воздушного судна составила 23 м/с по данным эксперимента, приведенного в 2.4.3.

Исходные данные для эксперимента:

- эталонный ортофотоплан для моделирования съемки;
- цифровые макетные снимки, один из которых представлен на рисунке 36.



Рисунок 36 – Цифровой макетный снимок с искажениями

Результаты обработки приведены в таблице 10.

Анализ результатов эксперимента позволил установить, что применение программных алгоритмов компенсации влияния шторно-щелевых затворов влияет

на точность уравнивания сети пространственной фототриангуляции. Применение двух моделей компенсации показывает повышение точности определения планового положения координат опорных и контрольных точек в среднем на 27 %.

Таблица 10 – Результаты уравнивания сети пространственной фототриангуляции, полученные в ходе фотограмметрической обработки макетных снимков с искажениями

Алгоритм обработки	Точки	СКП X, м	СКП Y, м	СКП Z, м	СКП XY, м
Без компенсации влияния шторно-щелевого затвора	Опорные	1,90	2,37	1,76	3,04
	Контрольные	7,96	7,39	20,92	10,86
Компенсация влияния шторно-щелевого затвора без учета угловых вращений аэрофотокамеры	Опорные	1,69	0,29	0,96	1,72
	Контрольные	8,21	9,88	24,89	12,85
Компенсация влияния шторно-щелевого затвора с учетом угловых вращений аэрофотокамеры	Опорные	0,26	0,10	0,15	0,28
	Контрольные	4,46	10,75	21,85	11,64

На следующем этапе эксперимента были смоделированы снимки с учетом поправок за приращение угловых элементов внешнего ориентирования и скорости движения носителя, результаты обработки которых представлены в таблице 11.

Анализ результатов эксперимента из таблицы 11 показал, что использование предварительной компенсации и программных алгоритмов компенсации влияния шторно-щелевых затворов также влияет на точность уравнивания сети пространственной фототриангуляции. Применение двух моделей компенсации показывает повышение точности определения планового положения координат опорных и контрольных точек в среднем на 36 %.

Таблица 11 – Результаты уравнивания сети пространственной фототриангуляции, полученные в ходе фотограмметрической обработки макетных снимков с учетом поправок за приращение угловых элементов внешнего ориентирования и скорости движения носителя

Алгоритм обработки	Точки	СКП X, м	СКП Y, м	СКП Z, м	СКП XY, м
Без компенсации влияния шторно-щелевого затвора	Опорные	0,43	0,66	0,25	0,79
	Контрольные	0,40	2,21	3,73	2,24
Компенсация влияния шторно-щелевого затвора без учета угловых вращений аэрофотокамеры	Опорные	0,09	0,12	0,03	0,15
	Контрольные	0,23	4,33	1,04	4,33
Компенсация влияния шторно-щелевого затвора с учетом угловых вращений аэрофотокамеры	Опорные	0,07	0,20	0,03	0,21
	Контрольные	0,11	0,32	0,26	0,34

## 2.5 Разработка усовершенствованной методики обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов для трехмерного моделирования территорий

На основании теоретических и экспериментальных исследований была разработана усовершенствованная методика обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов для трехмерного моделирования территорий, схема представлена на рисунке 37.



Рисунок 37 – Схема усовершенствованной методики обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов для трехмерного моделирования территорий

Предлагается данную методику применять, когда исходные данные в виде цифровых снимков получены с неметрической цифровой камеры со шторно-щелевым затвором, а в качестве носителя аэрофотосъемочного оборудования использовалось беспилотное воздушное судно без гиростабилизированной платформы.

Согласно усовершенствованной методике, на этапе составления рабочего проекта аэрофотосъемки необходимо проводить лабораторное исследование цифровой неметрической камеры с целью определения параметров цифровой камеры фактической выдержки  $t_f$ , эффективной выдержки  $t_{эф}$  для цифровых неметрических камер со шторно-щелевым затвором.

На этапе проведения аэрофотосъемки необходимо выполнять фиксацию скорости изменения линейных и угловых перемещений воздушного судна в пространстве с помощью дополнительного устройства на борту.

Желательна синхронизация данных между бортовой инерциальной системой, бортовым ГНСС-приемником и бортовым самописцем. Это позволит в значительной степени сократить временные затраты на идентификацию соответствия измерений с трех устройств.

К дополнительным рекомендациям по выполнению аэрофотосъемки с БВС относятся:

- для площадной аэрофотосъемки (более четырех маршрутов) до 25 км<sup>2</sup> следует устанавливать минимум две базовые станции, при этом на каждые следующие 15 км<sup>2</sup> добавлять по одной базовой станции;

- для маршрутной – до 12 км устанавливать минимум две базовые станции, на каждые последующие 8 км добавлять по одной базовой станции.

Этап предварительной обработки включает в себя ввод поправок в снимки с искажениями, вызванные влиянием шторно-щелевого затвора на основе данных лабораторного исследования цифровой камеры и анализа данных с фиксирующих, линейные и угловые перемещения беспилотного воздушного судна, устройств. Алгоритм предварительной обработки снимка представлен на рисунке 38.

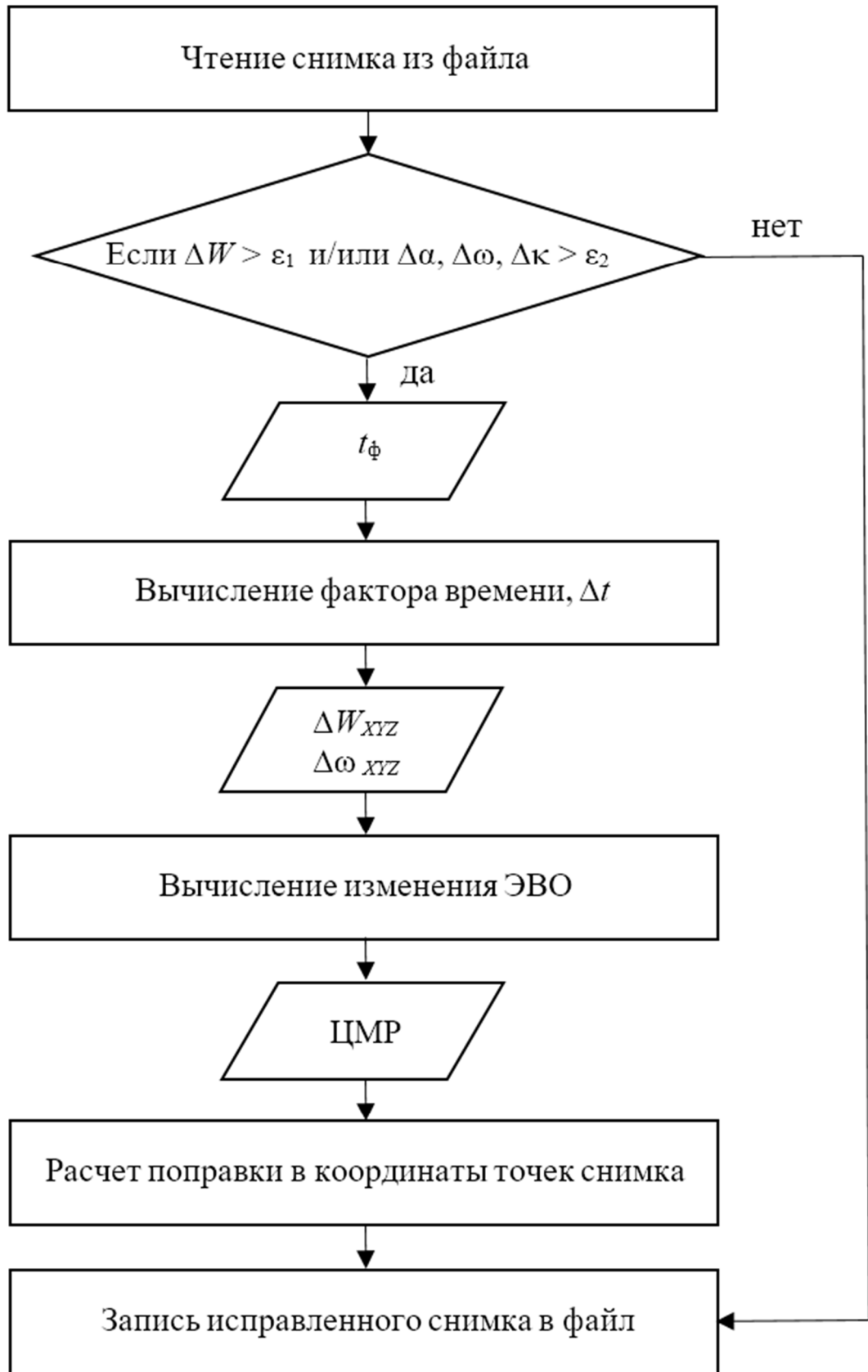


Рисунок 38 – Алгоритм предварительной обработки снимков, полученных с помощью цифровой камеры со шторно-щелевым затвором

## 2.6 Выводы по второму разделу

На основании результатов выполненных экспериментов была разработана усовершенствованная методика фотограмметрической обработки снимков для трехмерного моделирования территорий, включающая в себя:

- лабораторное исследование параметров цифровой неметрической камеры со шторно-щелевым затвором на этапе составления рабочего проекта планово-высотного обоснования и аэрофотосъемки с БВС;
- установку на беспилотное воздушное судно бортового самописца для фиксации изменения угловых величин элементов внешнего ориентирования снимков в процессе аэрофотосъемки;
- предварительную обработку цифровых снимков для введения поправок в искаженные снимки.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ

#### 3.1 Общие положения методики экспериментальных исследований

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований, целью которых была фотограмметрическая обработка изображений, полученных в результате аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна самолетного типа с размещенной на борту цифровой неметрической камерой со шторно-щелевым затвором.

Исследование включало в себя следующие этапы:

- расчет параметров аэрофотосъемки;
- подготовку плано-высотного обоснования и измерение координат и высот точек на местности;
- выполнение плановой аэрофотосъемки в двух направлениях;
- составление проекта фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки;
- построение фотограмметрических моделей;
- оценку точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции;
- построение трехмерных моделей территории;
- оценку точности полученных моделей по контрольным измерениям.

Исходные данные для проведения экспериментов в виде цифровых снимков получены цифровой неметрической камерой Sony Alpha 6000, установленной на беспилотном воздушном судне Supercam S350. Геодезические измерения координат и высот опорных точек на местности проводились геодезическим приемником Javad Triumph-1M.

Фотограмметрическая обработка проекта выполнялась в ПО Agisoft Metashape, версия 1.8.4 (сборка 14671). Контроль построения трехмерных моделей осуществлялся с помощью программы QGIS.

Беспилотное воздушное судно Supercam S350 (рисунок 39) относится к БВС самолетного типа, размах крыла БВС составляет 3,2 м, а время полета достигает 4,5 часов. Предназначено для выполнения аэрофотосъемочных работ и видеомониторинга. Предусмотрена возможность установки полезной нагрузки в виде цифровых фото- и видеокамер, тепловизоров, мультиспектральных камер, лидаров и т. д. [116].

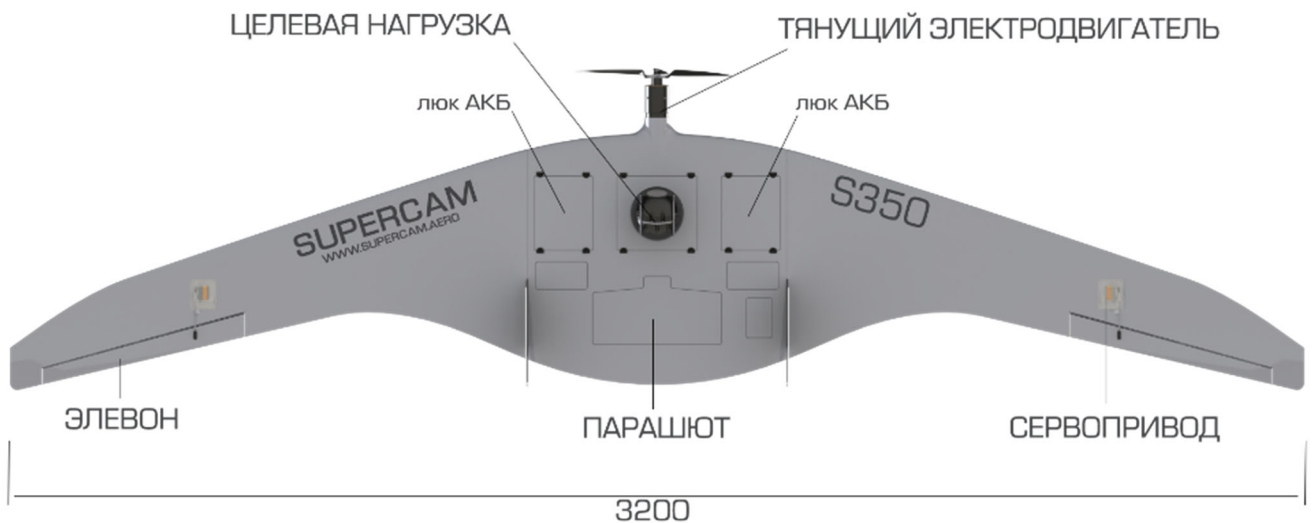


Рисунок 39 – Беспилотное воздушное судно самолетного типа  
Supercam S350 [116]

Цифровая неметрическая камера Sony Alpha 6000 со шторно-щелевым затвором представлена на рисунке 40, а технические характеристики цифровой неметрической камеры приведены в таблицах 2, 3.



Рисунок 40 – Цифровая камера Sony Alpha 6000

Координаты точек планово-высотного обоснования определялись с помощью геодезического приемника Javad Triumph-1M. При выполнении работ данным геодезическим приемником отслеживались сигналы спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS.

Съемка выполнялась в режиме Real Time Kinematic от постоянно действующей базовой станции (ПДБС) NSKW в сети ПДБС Новосибирской области. СКП определения координат и высот точек составила порядка 0,035 м. В качестве опознаков использовались центры люков смотровых колодцев (рисунок 41) и углы бордюрных камней.

Исходя из технических характеристик аэрофотосъемочного оборудования были вычислены параметры аэрофотосъемки. Аэрофотосъемка выполнялась на высоте около 275 м в двух направлениях с размером пикселя на местности около 5 см, как показано на рисунке 42.



Рисунок 41 – Центр люка смотрового колодца в качестве опознака на местности

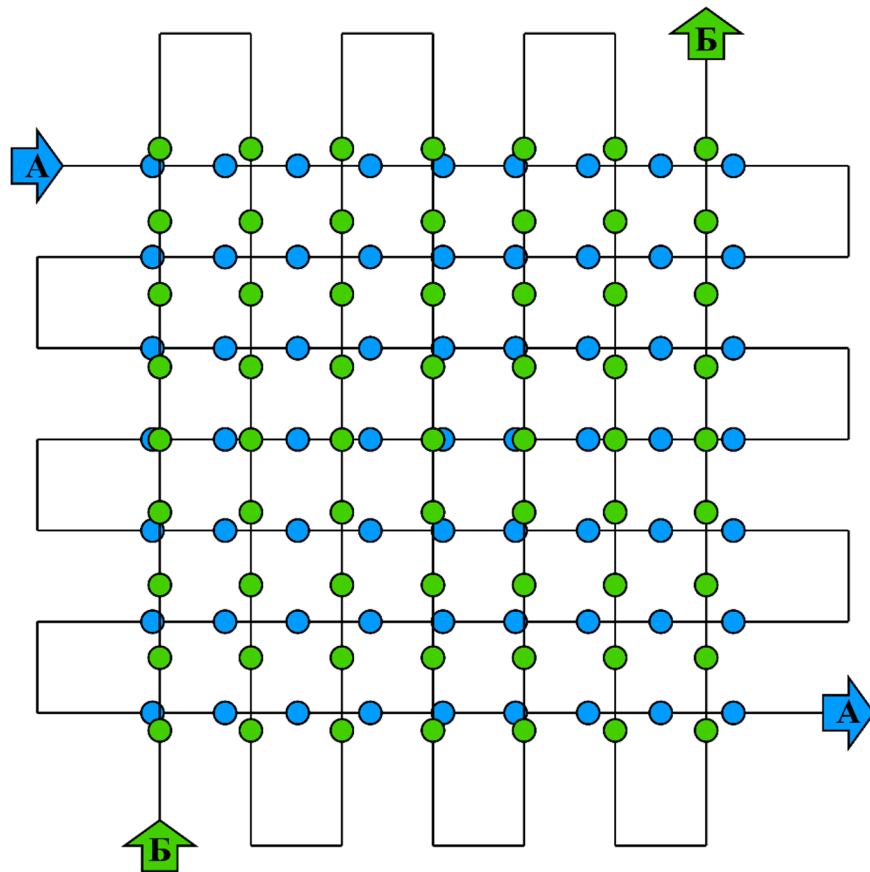


Рисунок 42 – Схема выполнения аэрофотосъемки

Продольное и поперечное перекрытие снимков в маршрутах составило 80 и 60 % соответственно. Аэрофотосъемка проводилась в ясную погоду, скорость ветра менялась от 6 до 8 м/с в южном направлении.

В экспериментах проводилась фотограмметрическая обработка участка аэрофотосъемки площадью 0,10 км<sup>2</sup>. Общее количество снимков составило 111.

Фотограмметрическое сгущение опорной сети выполнялось с использованием опорных точек, для контроля использовались, соответственно, контрольные точки.

Качество уравнивания сети пространственной фототриангуляции оценивалось по остаточным расхождениям фотограмметрических и геодезических координат на опорных и контрольных точках.

Выбор программного обеспечения для фотограмметрической обработки обоснован наличием функции компенсации влияния шторно-щелевого затвора на качество фотограмметрических построений.

Всего было выполнено три эксперимента, включающих шесть обработок. В каждом эксперименте проводилось две обработки – первая осуществлялась без активации функции компенсации эффекта шторно-щелевого затвора, вторая – с активацией данной функции.

Последовательность фотограмметрической обработки включала в себя:

- создание и настройку проекта – загрузку снимков, элементов внешнего ориентирования в системе координат WGS-84, координат и высот опорных и контрольных точек в системе координат WGS-84 / UTM зона 44N.
- выравнивание снимков с высокой точностью и оптимизацию;
- построение плотного массива точек с высокой точностью;
- построение трехмерной модели;
- построение цифровой модели местности.

### 3.2 Построение трехмерной модели территории по материалам аэрофотосъемки в двух направлениях АБ и оценка точности фотограмметрических построений

В данном эксперименте проводилась фотограмметрическая обработка 111 снимков, расположенных в 10 маршрутах – шесть маршрутов в направлении А и четыре маршрута в направлении Б, что представлено в виде схемы на рисунке 42.

На местности было определено пять опорных и три контрольные точки. Схема расположения опорных и контрольных точек представлена рисунке 43.

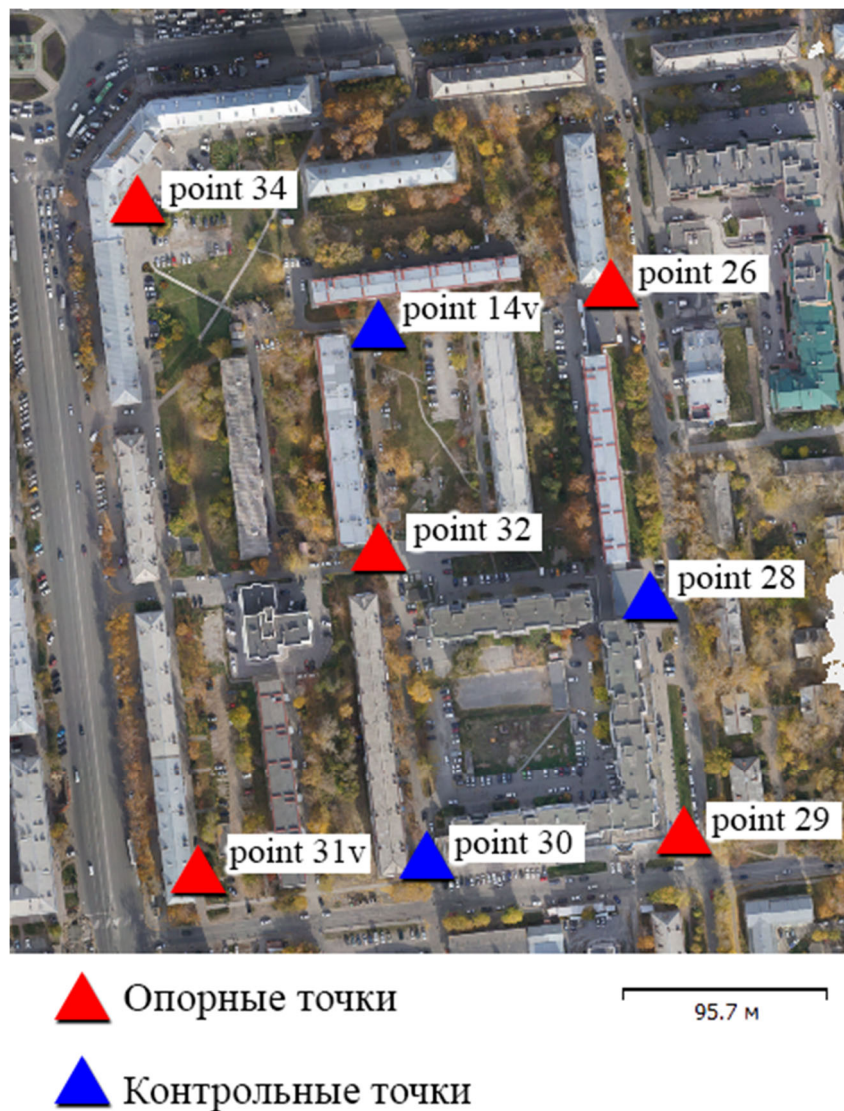


Рисунок 43 – Схема расположения опорных и контрольных точек

На этапе выравнивания в программе осуществляется отождествление соответственных точек на снимках, после чего происходит уравнивание сети пространственной фототриангуляции методом связок.

При выборе высокой точности в обработке участвуют изображения исходного размера, что позволяет получить более достоверное положение камеры для вычисления и уточнения элементов внешнего ориентирования.

Результат выравнивания представлен в виде разреженного массива точек (рисунок 44).

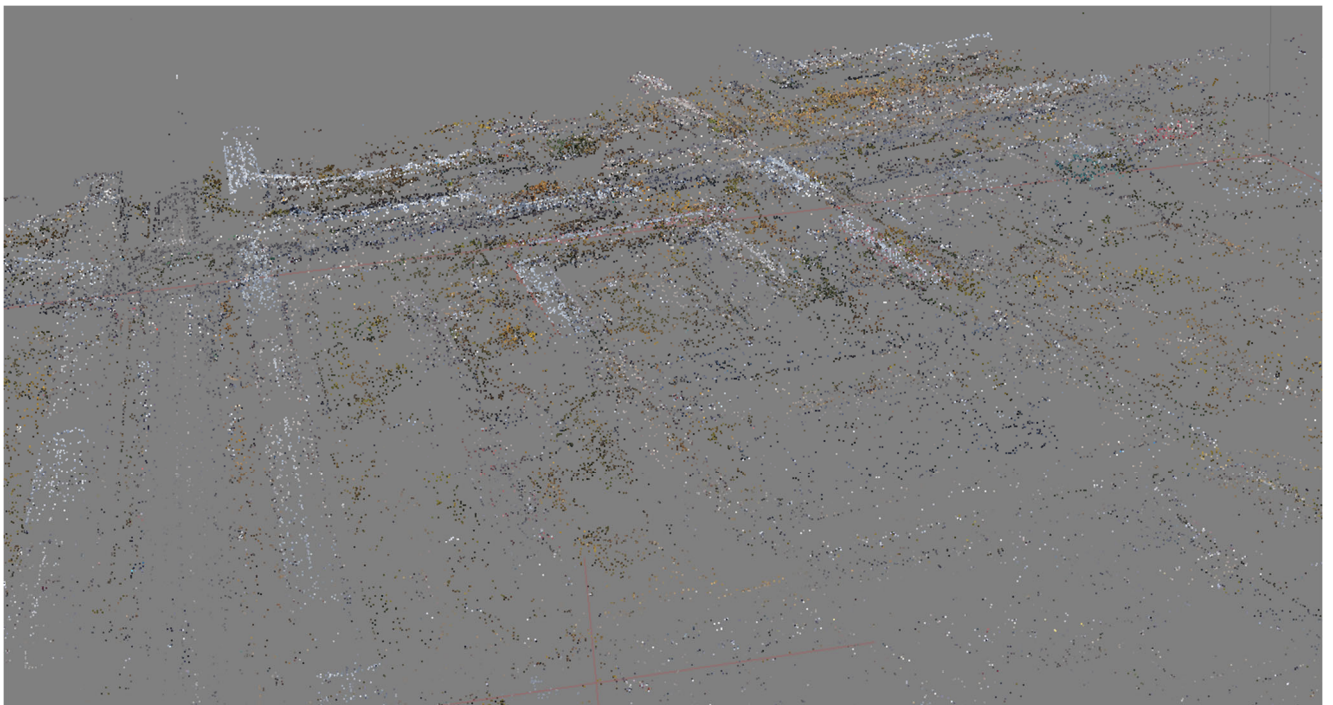


Рисунок 44 – Разреженный массив точек, полученный в результате фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки

В таблице 12 приведена оценка точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции в результате обработки без учета компенсации влияния шторно-щелевого затвора на качество фотограмметрических построений.

Дальнейшим этапом обработки являлось построение плотного массива точек.

Таблица 12 – Оценка точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции по опорным и контрольным точкам по результатам обработки без компенсации шторного-щелевого затвора (маршруты в направлении АБ)

Точка	X, м	Y, м	Z, м	X <sub>расч</sub> , м	Y <sub>расч</sub> , м	Z <sub>расч</sub> , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
Опорные точки									
point 26	20060,039	94281,339	107,487	20059,982	94281,306	107,454	-0,057	-0,033	-0,033
point 29	20091,921	94026,290	107,443	20091,859	94026,368	107,477	-0,062	0,078	0,034
point 30	19974,377	94015,737	104,989	19974,358	94015,716	105,000	-0,019	-0,021	0,011
point 32	19950,575	94159,139	104,421	19950,581	94159,144	104,367	0,006	0,005	-0,054
point 34	19836,692	94319,500	101,933	19836,706	94319,525	101,884	0,014	0,025	-0,049
point 31 v	19 866,757	94009,835	102,276	19866,860	94009,886	102,274	0,103	0,051	-0,002
СКП							0,075		0,039
Контрольные точки									
point 28	20076,732	94136,592	107,533	20076,657	94136,597	107,461	-0,075	0,005	-0,072
point 30	19974,377	94015,737	104,989	19974,358	94015,716	105,000	-0,019	-0,021	0,011
point 14v	19949,441	94264,844	104,632	19949,540	94264,761	104,517	0,099	-0,083	-0,115
СКП							0,089		0,079

Построение плотного массива точек выполнялось с высокой точностью, с применением параметра мягкой фильтрации карт глубины. Данный параметр рекомендован, если область обработки содержит плохо текстурированные поверхности. Результат построения плотного массива точек моделируемой территории представлен на рисунке 45.



Рисунок 45 – Плотный массив точек моделируемой территории

На следующем этапе осуществлялось построение трехмерной модели территории. В программе Agisoft Metashape реализована возможность построения трехмерных моделей на основе разреженного массива точек, карт глубин или плотного массива точек. Для получения трехмерной модели высокого качества в качестве исходных данных необходимо использовать плотное облако точек.

На рисунках 46, 47 представлены результаты построения трехмерной модели без текстурирования и с применением текстур.

Далее проводилась вторая фотограмметрическая обработка по параметрам, аналогичным первой, однако в ходе настройки параметров проекта была активиро-

вана функция компенсации влияния шторно-щелевого затвора. В таблице 13 приведены результаты оценки точности фотограмметрических построений.

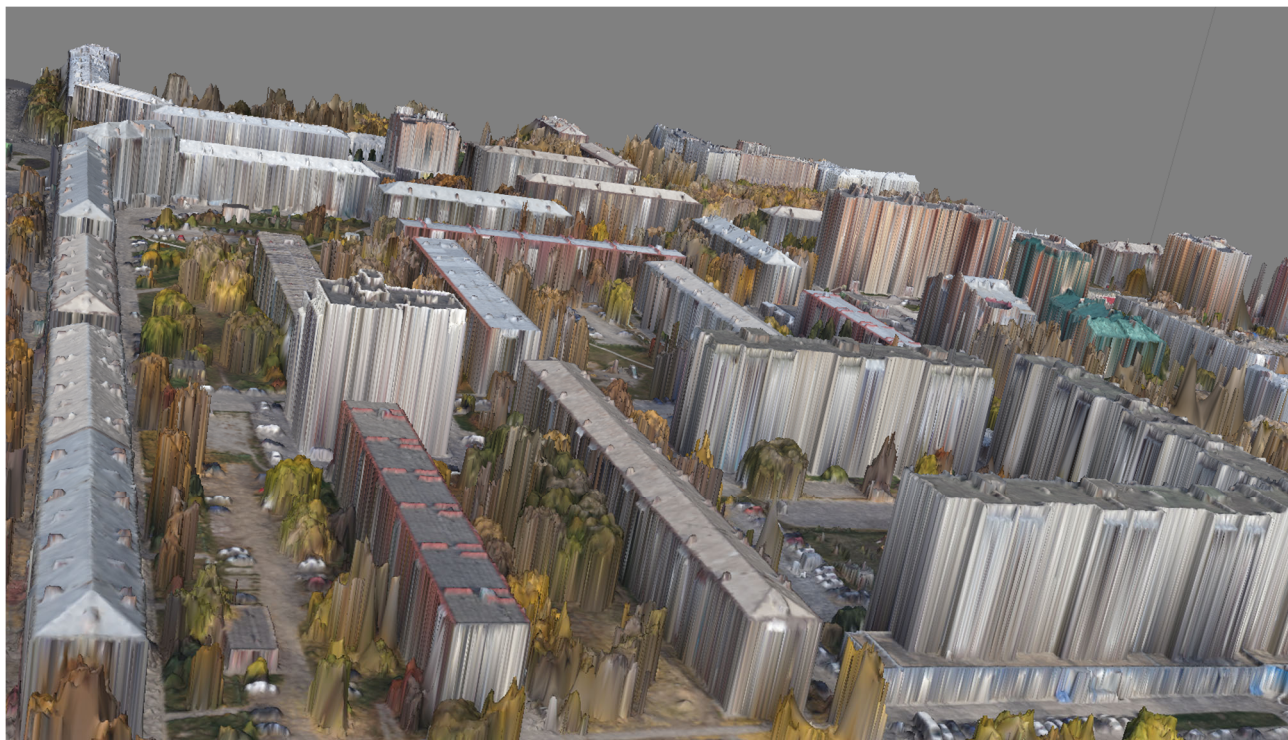


Рисунок 46 – Нетекстурированная трехмерная модель территории



Рисунок 47 – Трехмерная модель территории с текстурой

Таблица 13 – Оценка точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции по опорным и контрольным точкам по результатам обработки с компенсацией штормого-щелевого затвора (маршруты в направлении АБ)

Точка	X, м	Y, м	Z, м	X <sub>расч</sub> , м	Y <sub>расч</sub> , м	Z <sub>расч</sub> , м	ΔX, м	ΔY, м	ΔZ, м
Опорные точки									
point 26	20060,039	94281,339	107,487	20059,947	94281,345	107,486	-0,092	0,006	-0,001
point 29	20091,921	94026,290	107,443	20091,931	94026,291	107,488	0,010	0,001	0,045
point 32	19950,575	94159,139	104,421	19950,576	94159,182	104,277	0,001	0,043	-0,144
point 34	19836,692	94319,500	101,933	19836,737	94319,474	101,959	0,045	-0,026	0,026
point 31 v	19866,757	94009,835	102,276	19866,804	94009,900	102,275	0,047	0,065	-0,001
СКП							0,059		0,070
Контрольные точки									
point 28	20076,732	94136,592	107,533	20076,663	94136,637	107,495	-0,069	0,045	-0,038
point 30	19974,377	94015,737	104,989	19974,346	94015,679	104,958	-0,058	0,029	-0,031
point 14v	19949,441	94264,844	104,632	19949,531	94264,786	104,496	0,090	-0,058	-0,136
СКП							0,091		0,081

Аэрофотосъемка, проводимая в двух направлениях, позволяет осуществлять моделирование городской застройки с достаточной информацией для текстурирования фасадов зданий. Фотограмметрическая обработка с компенсацией влияния шторно-щелевого затвора позволила повысить точность фотограмметрических построений в среднем на 10 %. Отчет о фотограмметрической обработке представлен в приложении Б.

### 3.3 Построение трехмерной модели территории по материалам аэрофотосъемки в одном направлении А и оценка точности фотограмметрических построений

В данном эксперименте проводилась фотограмметрическая обработка снимков, расположенных в маршрутах аэрофотосъемки в направлении А, что схематично представлено на рисунке 48. В обработке участвовало 57 снимков. Настройки проекта идентичны экспериментам в 3.2.

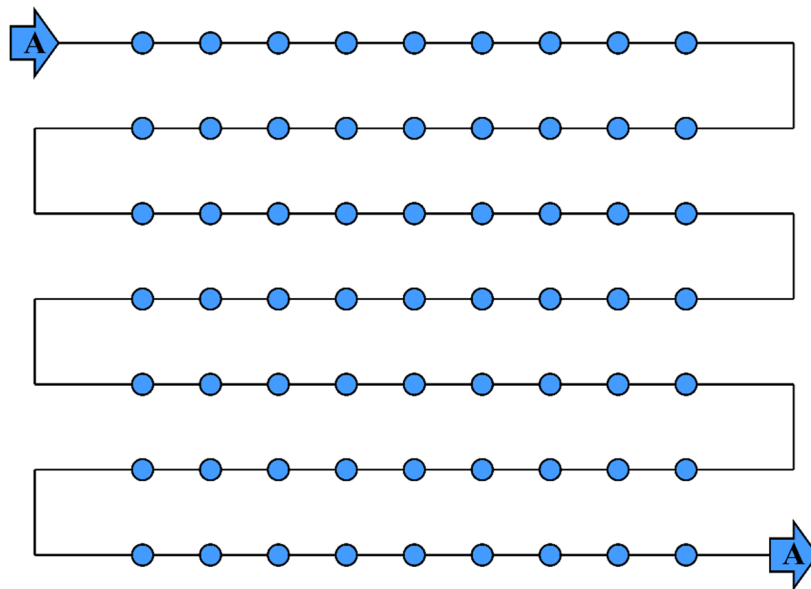


Рисунок 48 – Схема маршрутов аэрофотосъемки в направлении А

В таблицах 14, 15 приведены результаты оценки точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции без компенсации влияния шторно-щелевого затвора и с компенсацией затвора соответственно.

Таблица 14 – Оценка точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции по опорным и контрольным точкам по результатам обработки без компенсации шторного-щелевого затвора (маршруты в направлении А)

Точка	X, м	Y, м	Z, м	X <sub>расч</sub> , м	Y <sub>расч</sub> , м	Z <sub>расч</sub> , м	ΔX, м	ΔY, м	ΔZ, м
Опорные точки									
point 26	20060,039	94281,339	107,487	20060,010	94281,299	107,511	-0,029	-0,040	0,024
point 29	20091,921	94026,290	107,443	20091,950	94026,330	107,449	0,029	0,040	0,006
point 32	19950,575	94159,139	104,421	19950,601	94159,110	104,509	0,026	-0,029	0,088
point 34	19836,692	94319,500	101,933	19836,700	94319,493	101,898	0,008	-0,007	-0,035
point 31 v	19866,757	94009,835	102,276	19866,782	94009,882	102,280	0,025	0,047	0,004
СКП							0,043		0,044
Контрольные точки									
point 28	20076,732	94136,592	107,533	20076,691	94136,601	107,433	-0,041	0,009	-0,100
point 30	19974,377	94015,737	104,989	19974,345	94015,669	104,886	-0,032	-0,068	-0,103
point 14v	19949,441	94264,844	104,632	19949,569	94264,734	104,597	0,128	-0,110	-0,035
СКП							0,109		0,085

Таблица 15 – Оценка точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции по опорным и контрольным точкам по результатам обработки с компенсацией штормого-щелевого затвора (маршруты в направлении А)

Точка	X, м	Y, м	Z, м	X <sub>расч</sub> , м	Y <sub>расч</sub> , м	Z <sub>расч</sub> , м	ΔX, м	ΔY, м	ΔZ, м
Опорные точки									
point 26	20060,039	94281,339	107,487	20060,025	94281,341	107,472	-0,014	0,002	-0,015
point 29	20091,921	94026,29	107,443	20091,904	94026,330	107,449	-0,017	0,040	0,006
point 32	19950,575	94159,139	104,421	19950,581	94159,140	104,280	0,006	0,001	-0,141
point 34	19836,692	94319,5	101,933	19836,716	94319,457	101,951	0,024	-0,043	0,018
point 31 v	19866,757	94009,835	102,276	19866,755	94009,862	102,276	-0,002	0,027	0,000
СКП							0,027		0,066
Контрольные точки									
point 28	20076,732	94136,592	107,533	20076,695	94136,608	107,472	-0,037	0,016	-0,061
point 30	19974,377	94015,737	104,989	19974,482	94015,673	104,846	0,105	-0,064	-0,143
point 14v	19949,441	94264,844	104,632	19949,395	94264,758	104,695	-0,046	-0,086	0,063
СКП							0,094		0,010

Программный учет влияния искажений и введение поправок в снимки позволили улучшить точность определения координат опорных и контрольных точек в среднем на 25 % для фотограмметрической обработки материалов аэрофото­съемки, проводимой в одном направлении.

Однако для построения трехмерной модели территории оказалось недоста­точно информации для генерации текстур равномерно для всех объектов терри­тории (рисунки 49, 50). В приложении В представлен отчет о результатах обра­ботки.



Рисунок 49 – Трехмерная модель территории, построенная в ходе обработки аэрофотосъемки с маршрутами в направлении А



Рисунок 50 – Трехмерная модель территории с дефектами текстурирования

### 3.4 Построение трехмерной модели территории по материалам аэрофотосъемки в одном направлении Б и оценка точности фотограмметрических построений

В данном эксперименте проводилась фотограмметрическая обработка аэрофотосъемки, маршруты расположены в одном направлении, как показано на рисунке 51.

Фотограмметрическая модель была построена на основе 54 снимков. Скорость ветра во время аэрофотосъемки составляла 8 м/с. Фотограмметрическая обработка осуществлялась с настройками, соответствующими первому и второму случаю обработки. Результаты оценки точности обработки без компенсации влияния шторно-щелевого затвора и с компенсацией приведены в таблицах 15 и 16 соответственно. Отчет о фотограмметрической обработке представлен в приложении Г.

Анализ полученных значений оценки точности двух случаев обработки позволил установить повышение точности определения планового положения координат опорных и контрольных точек в среднем на 22 %. Также выявлены проблемы с построением текстур ввиду отсутствия достаточного количества информации, как

и в 3.3. На рисунке 52 показана трехмерная модель территории, полученная в результате фотограмметрической обработки.

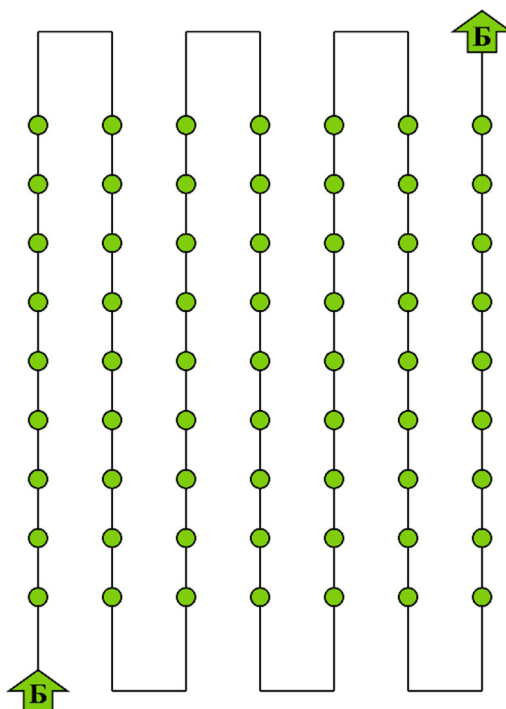


Рисунок 51 – Схема маршрутов аэрофотосъемки в направлении Б



Рисунок 52 – Трехмерная модель территории, полученная в результате фотограмметрической обработки снимков

Таблица 16 – Оценка точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции по опорным и контрольным точкам по результатам обработки без компенсации шторного-щелевого затвора (маршруты в направлении Б)

Точка	X, м	Y, м	Z, м	X <sub>расч</sub> , м	Y <sub>расч</sub> , м	Z <sub>расч</sub> , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
Опорные точки									
point 26	20060,039	94281,339	107,487	20059,994	94281,245	107,448	-0,045	-0,094	-0,039
point 29	20091,921	94026,290	107,443	20091,869	94026,348	107,431	-0,052	0,058	-0,012
point 32	19950,575	94159,139	104,421	19950,542	94159,146	104,358	-0,033	0,007	-0,063
point 34	19836,692	94319,500	101,933	19836,707	94319,587	102,019	0,015	0,087	0,086
point 31 v	19866,757	94009,835	102,276	19866,875	94009,821	102,336	0,118	-0,014	0,060
СКП							0,089		0,058
Контрольные точки									
point 28	20076,732	94136,592	107,533	20076,577	94136,554	107,487	-0,155	-0,038	-0,046
point 30	19974,377	94015,737	104,989	19974,376	94015,712	104,963	-0,001	-0,025	-0,026
point 14v	19949,441	94264,844	104,632	19949,496	94264,763	104,414	0,055	-0,081	-0,218
СКП							0,109		0,129

Таблица 17 – Оценка точности уравнивания сети пространственной фототриангуляции по опорным и контрольным точкам по результатам обработки с компенсацией штормного-щелевого затвора (маршруты в направлении Б)

Точка	$X, \text{ м}$	$Y, \text{ м}$	$Z, \text{ м}$	$X_{\text{расч}}, \text{ м}$	$Y_{\text{расч}}, \text{ м}$	$Z_{\text{расч}}, \text{ м}$	$\Delta X, \text{ м}$	$\Delta Y, \text{ м}$	$\Delta Z, \text{ м}$
<b>Опорные точки</b>									
point 26	20060,039	94281,339	107,487	20059,961	94281,316	107,453	-0,078	-0,023	-0,034
point 29	20091,921	94026,290	107,443	20091,918	94026,268	107,456	-0,003	-0,022	0,013
point 32	19950,575	94159,139	104,421	19950,557	94159,193	104,343	-0,018	0,054	-0,078
point 34	19836,692	94319,500	101,933	19836,748	94319,507	101,909	0,056	0,007	-0,024
point 31 v	19866,757	94009,835	102,276	19866,799	94009,829	102,294	0,042	-0,006	0,018
<b>СКП</b>							0,055		0,041
<b>Контрольные точки</b>									
point 28	20076,732	6094136,592	107,533	20076,662	94136,623	107,573	-0,070	0,031	0,040
point 30	19974,377	6094015,737	104,989	19974,364	94015,632	104,968	-0,013	-0,105	-0,021
point 14v	19949,441	6094264,844	104,632	19949,535	94264,775	104,495	0,094	-0,069	-0,137
<b>СКП</b>							0,101		0,083

### 3.6 Контроль построения трехмерных моделей местности

Контроль построения цифровых моделей местности осуществлялся путем вычитания поверхностей. Для этого были построены карты разностей в программном обеспечении QGIS. В качестве опорной модели была принята цифровая модель местности, построенная в результате фотограмметрической обработки аэрофотосъемки с перекрестными маршрутами (АБ).

В первом случае была проведена калькуляция поверхностей опорной цифровой модели местности и модели, полученной в результате фотограмметрической обработки аэрофотосъемки с маршрутами в одном направлении А. На рисунке 53 представлен результат калькуляции моделей АБ-А.

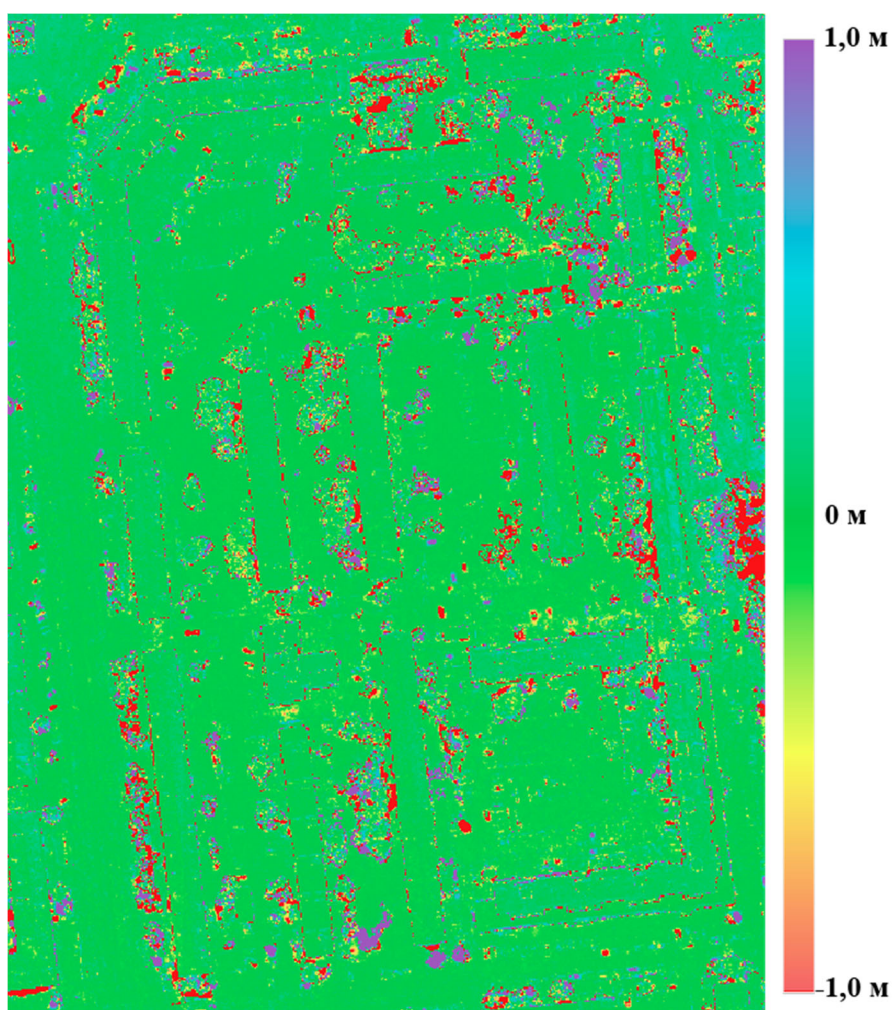


Рисунок 53 – Карта разностей двух поверхностей цифровых моделей местности АБ-А

Во втором случае вычитание поверхностей проводилось между картой высот опорной модели АБ и цифровой модели местности, полученной в результате фотограмметрической обработки аэрофотосъемки с маршрутами в направлении Б. Карта разностей АБ-Б представлена на рисунке 54.

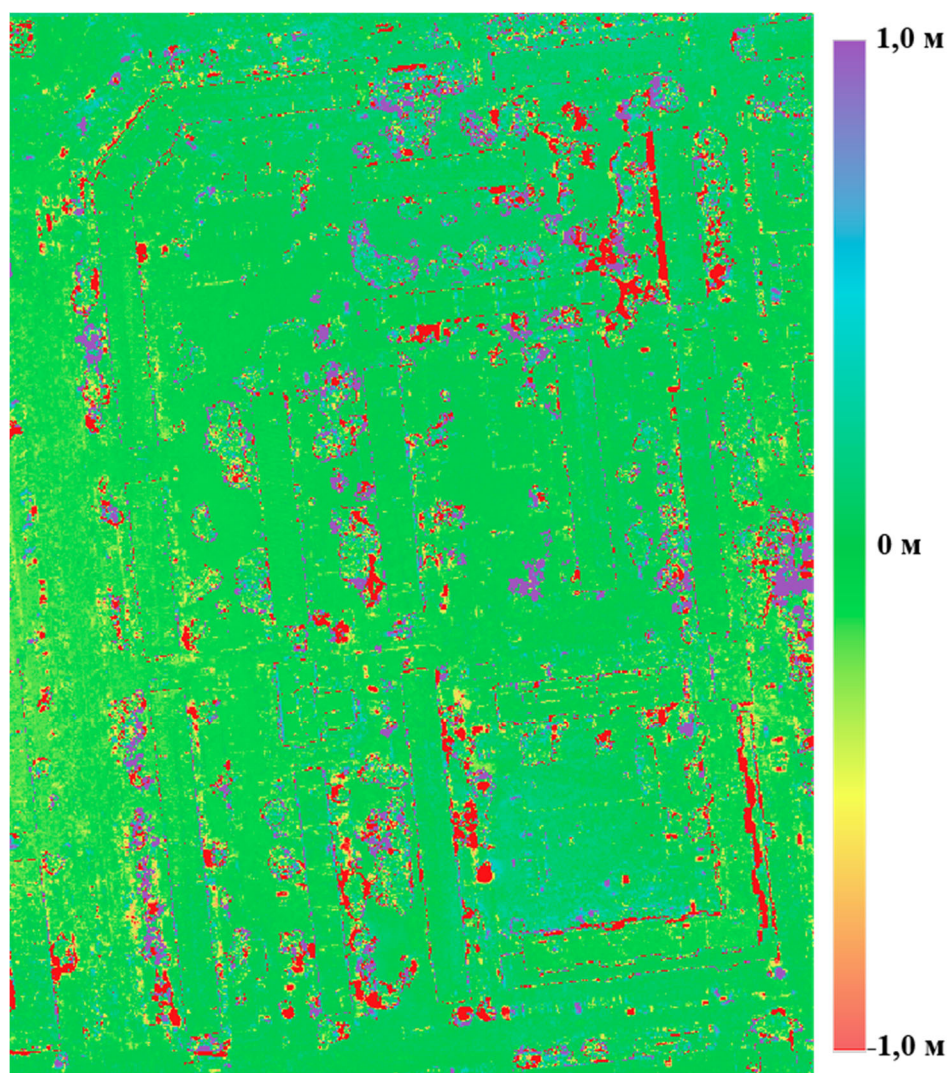


Рисунок 54 – Карта разностей двух поверхностей цифровых моделей местности АБ-Б

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

– разности в виде линейных контуров на границах высотных объектов (здания, деревья) возникают из-за отличия в определении их планового местоположения;

– при перекрестной схеме маршрутов лучше восстанавливается основание высотных объектов, экранированных древесными насаждениями.

Кластеры размером от нескольких метров со значительными расхождениями высот объектов соответствуют древесной растительности, что свидетельствует о нестабильном восстановлении их формы.

При совместной обработке материалов с отличающимся временем съемки замечен эффект фильтрации динамических объектов при построении цифровой модели поверхности. Приоритет имеют точки с меньшим значением высотной отметки.

### 3.7 Выводы по третьему разделу

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что при использовании цифровой неметрической камеры со шторно-щелевым затвором для выполнения аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна компенсация влияния искажений, вызываемых шторно-щелевым затвором, позволяет повысить точность получаемой продукции в среднем на 20 %. Для обеспечения детальности построения текстур трехмерных моделей застроенных территорий необходимо проводить аэрофотосъемку в перекрестном направлении маршрутов.

## 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 фотограмметрической 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1 Аврунев, Е. И. К вопросу о создании трехмерного кадастра на застроенных территориях / Е. И. Аврунев, В. В. Вылегжанина, И. А. Гиниятов. – Текст : непосредственный // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции, 17–19 ноября 2020 г., Новосибирск. В 3 ч. Ч. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 25–30.

2 Аврунев, Е. И. Проектирование и уравнивание пространственных геодезических построений, предназначенных для создания трехмерного кадастра / Е. И. Аврунев, А. И. Гиниятов, А. И. Каленицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 126–134. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-5-126-134.

3 Аврунев, Е. И. Современное состояние и проблемы геодезического обеспечения создания и ведения трехмерного кадастра недвижимости / Е. И. Аврунев, А. И. Гиниятов. – 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. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – С. 136–140.

4 Алябьев, А. А. Фотограмметрия в кадастре недвижимости / А. А. Алябьев, К. А. Литвинцев, А. А. Кобзев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2021. – № 8. – С. 27–35.

5 Аникеева, И. А. Обоснование допустимых размеров пикселя на местности и параметров сжатия аэро- и космических изображений, получаемых для целей картографирования / И. А. Аникеева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 23, № 2. – С. 109–130.

6 Аникеева, И. А. Факторы, критерии и требования к изобразительному качеству материалов аэрофотосъемки, получаемой для целей картографирования / И. А. Аникеева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 104–119.

7 Антипов, И. Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции / И. Т. Антипов. – Москва : Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 296 с. – Текст : непосредственный.

8 Антипов, И. Т. Об использовании цифровых средне- и малоформатных камер для аэрофотосъемки / И. Т. Антипов, Е. А. Кобзева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 17–27.

9 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.

10 Атлас-Аэро. Беспилотные авиационные комплексы. – Текст : электронный // ATLAS AERO : [сайт]. – 2022. – URL: <http://atlas-aero.ru>.

11 Аэрофотосъемочные работы : справочник аэрофотосъемщика / А. А. Попов, Ю. И. Полетаев, Ю. В. Евдокимов и др. – Москва : Транспорт, 1984. – 200 с. – Текст: непосредственный.

12 Барбасов, В. К. Обследование воздушных ЛЭП. Технология «ГЕОСКАН» / В. К. Барбасов, А. А. Разумовский. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 3. – 2017. – С. 39–42.

13 Барбасов, В. К. Обследование воздушных ЛЭП. Технология «ГЕОСКАН» / В. К. Барбасов. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 1. – 2017. – С. 20–24.

14 Барбасов, В. К. Применение беспилотных авиационных комплексов в электроэнергетике для мониторинга ЛЭП / В. К. Барбасов, Д. А. Шаповалов. – Текст : непосредственный // Энергия единой сети. – 2016. – № 2 (25). – С. 34–42.

15 Бегляров, Н. С. Об особенностях сбора трехмерной кадастровой информации на урбанизированных территориях / Н. С. Бегляров, Д. А. Шаповалов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 3 : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 62–70.

16 Блохинов, Ю. Б. Алгоритмы формирования цифровой модели поверхности и текстурного покрытия в наземной фотограмметрии / Ю. Б. Блохинов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 1. – С. 51–57.

17 Воробьева, Н. Г. Исследование возможностей БПЛА SUPERCAM S350-F в задачах изучения и сохранения археологического наследия / Н. Г. Воробьева, И. В. Журбин, Л. Ф. Князева. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 2. – С. 83–90.

18 Геоархеологическое картирование памятников каменного века и выходов минерального сырья Титовской сопки (восточное Забайкалье): практический аспект / П. В. Мороз, К. А. Курганович, М. А. Босов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2020. – Т. 26. – № 9. – С. 13–23.

19 ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. – Москва : ЦНИИГАиК, 2002. – 100 с. – Текст : непосредственный.

20 Горбенко, С. М. Научная фотография и анализ фотоизображений : учебное пособие / С. М. Горбенко, Л. А. Головина. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 118 с. – Текст : непосредственный.

21 ГОСТ Р 51833–2001. Национальный стандарт Российской Федерации. Фотограмметрия. Термины и определения. – Москва : Издательство стандартов, 2001. – Текст : непосредственный.

22 ГОСТ Р 59328-2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования : национальный стандарт РФ. – Введ. 01.06.2021. – Москва : Издательство стандартов, 2021. – 49 с. – Текст : непосредственный.

23 Грохольский, Д. В. КРЕДО ФОТОГРАММЕТРИЯ – новая программа Комплекса КРЕДО / Д. В. Грохольский. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 5. – 2021. – С. 13–15.

24 Группа компаний Геоскан. – Текст : электронный // Geoscan : [сайт]. – 2022. – URL: <https://www.geoscan.aero/ru>.

25 Гук, А. П. Фотограмметрия и дистанционное зондирование : учебник / А. П. Гук, Г. Конечный. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 248 с. – Текст : непосредственный.

26 Гук, А. П. Исследование возможности применения неметрических цифровых снимков для обновления топографических карт / А. П. Гук, В. И. Тихонов, М. А. Белошапкин. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2006. Международ. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 79–81.

27 Гук, А. П. Исследование точности автоматического измерения координат точек снимков с помощью масштабно-инвариантного преобразования SIFT / А. П. Гук, С. А. Арбузов. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010. VI Международ. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 35–38.

28 Гук, А. П. Некоторые проблемы построения реалистических измерительных 3D моделей по данным дистанционного зондирования / А. П. Гук, М. М. Шляхова // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 51–60.

29 Гук, А. П. Разработка методик создания 3D моделей по аэрокосмическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения и другим данным дистанционного зондирования / А. П. Гук, М. М. Лазерко. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 32–34.

30 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.

31 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.

32 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.

33 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.

34 Дехканов, М. М. Создание трехмерной модели объекта историко-культурного наследия в программе DATUGRAM3D / М. М. Дехканов, В. В. Кравцов, П. А. Круглова. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 1. – 2015. – С. 48–52.

35 Ессин, А. С. Технология обработки аэрофотоснимков, полученных с БПЛА, в целях создания ортофотопланов / А. С. Ессин, С. С. Ессин. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 72–75.

36 Иванова, А. И. Особенности формирования 3D-модели недвижимости для дальнейшего учета в ЕГРН / А. И. Иванова, А. В. Чернов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 7 : Международная научно-технологическая конференция студентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 1. – С. 206–217.

37 Инновационные комплексные системы. Беспилотные аппараты. – Текст : электронный // Инновационные комплексные системы : [сайт]. – 2022. – URL: <https://iks.aero>.

38 Кадничанский, С. А. О возможности обеспечения материалами АФС с БВС, пригодными для проведения кадастровых работ на землях населенных пунктов / С. А. Кадничанский. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 6. – 2020. – С. 35–40.

39 Карпик, А. П. Сущность геоинформационного пространства территорий как единой основы развития государственного кадастра недвижимости / А. П. Карпик, В. С. Хорошилов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 1. – С. 134–136.

40 Карпик, А. П. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы / А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 41–44.

41 Комиссаров, А. В. Анализ методик создания макетных снимков для проверки точности фотограмметрических построений / А. В. Комиссаров, В. В. Дед-

кова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 47–56. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-47-56.

42 КРЕДО ФОТОГРАММЕТРИЯ. Руководство пользователя. – Текст : электронный // Credo-Dialog : [сайт]. – 2022. – URL: <https://credo-dialogue.ru>.

43 Крупочкин, Е. П. О перспективах использования беспилотной съемки в археологических исследованиях / Е. П. Крупочкин, Д. В. Папин. – Текст : непосредственный // Теория и практика археологических исследований. – 2018. – № 4 (24). – С. 71–84. – DOI 10.14258/tpai(2018)4(24).-07.

44 Лазерко, М. М. Анализ современных средств для создания трехмерных моделей по различным данным / М. М. Лазерко. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 3, ч. 1. – С. 122–125.

45 Лобанов, А. Н. Фотограмметрия : учебник для вузов / А. Н. Лобанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1984. – 552 с. – Текст : непосредственный.

46 Михайлов, А. П. О применении цифровых фотокамер со шторно-щелевым затвором для выполнения аэрофотосъемки с легкомоторных и беспилотных летательных аппаратов / А. П. Михайлов, Э. Р. Монтель Андраде, П. В. Мануэль Де Хесус. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 30–32.

47 Михайлов, А. П. Фотограмметрия : учебник / А. П. Михайлов, А. Г. Чибуничев; под общ. ред. А. Г. Чибуничева. – Москва : МИИГАиК, 2016. – 294 с. – Текст : непосредственный.

48 Монтиэль Андраде Эдгар Рубен. Разработка и исследование фотограмметрических технологий мониторинга береговой линии по материалам аэрофотосъемки : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия / Монтиэль Андраде Эдгар Рубен. – Москва : МИИГАиК, 2016. – Текст : непосредственный.

49 Назаров, А. С. Фотограмметрия : пособие для студентов вузов / А. С. Назаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ТетраСистемс, 2010. – 400 с. : ил. – Текст : непосредственный.

50 Наземное лазерное сканирование : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с. – Текст : непосредственный.

51 Никитин, В. Н. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезических и фотограмметрических задач. – Текст: непосредственный. / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 41–45.

52 Никитин, В. Н. Создание макетных снимков площадной аэрофотосъемки с использованием ArcGIS / В. Н. Никитин, Е. Ю. Сахарова, А. Е. Червова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 95–100.

53 О возможности и эффективности использования беспилотных воздушных судов при выполнении кадастровых работ / И. А. Аникеева, Н. М. Бабашкин, С. А. Кадничанский, С. С. Нехин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2018. – № 8. – С. 44–52.

54 Об утверждении Концепции проекта цифровизации городского хозяйства «Умный город» : приказ Минстроя от 25.12.2020 № 866/пр. – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/81884/>. – Текст : электронный.

55 Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения» : приказ Росреестра от 23.10.2020 № П/0393. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

56 Опритова, О. А. Разработка требований к сбору и обработке данных аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов для моделирования геопространства : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия / Опритова Ольга Анатольевна. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – Текст : непосредственный.

57 Опыт ГК «Геоскан». Создание высокоточной трехмерной модели Тульской области / Ф. В. Солощенко, Е. В. Гринько, М. В. Курков, Н. Р. Суздальцев. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 2. – 2018. – С. 10–14.

58 Опыт документирования пещеры Шульган-Таш (Каповой) и окружающего ландшафта современными методами / Ю. М. Свойский, Е. В. Романенко, Н. Н. Григорьев, Е. С. Леванова. – Текст : непосредственный // Краткие сообщения Института археологии. – 2020. – № 261. – С. 67–81. – DOI 10.25681/IARAS.0130-2620.261.67-81.

59 Перес, Вальдез Мануэль де Хесус. Разработка и исследование фотограмметрической технологии обмеров архитектурных и исторических сооружений по материалам плановой и перспективной аэрофотосъемки : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»/ Перес Вальдез Мануэль де Хесус. – Москва, 2016. – 117 с. – Текст : непосредственный.

60 Петрова, Е. В. Создание трехмерных моделей объектов культурного наследия для их реставрации / Е. В. Петрова. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 5. – 2020. – С. 38–44.

61 Попов, В. М. Гиросtabilизация платформы беспилотного летательного аппарата для аэрофотосъемки и видеонаблюдения / В. М. Попов. – Текст : непосредственный // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2017. – № 2. – С. 134–149.

62 Применение ДЗЗ в геоинформационном картографировании для археологических исследований / И. Е. Сидорина, Н. А. Позднякова, А. А. Кружилина,

А. В. Поляков. – Текст : непосредственный // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2018. – Т. 24. – № 2. – С. 141–150. – DOI 10.24057/2414-9179-2018-2-24-141-150.

63 Прокопец, С. Д. Современные способы фиксации археологических объектов в полевых условиях / С. Д. Прокопец, Д. М. Белов. – Текст : непосредственный // Мультидисциплинарные исследования в археологии. – 2018. – № 2. – С. 94–102.

64 ПТЕРО. – Текст : электронный // ПТЕРО : [сайт]. – 2022. – URL: <http://ptero.ru>.

65 Разработка стенда для определения характеристик штормо-щелевых затворов / В. Н. Никитин, Д. Н. Раков, А. В. Семенцов, С. А. Арбузов, Е. П. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 82–95.

66 Райзман, Ю. Г. Возможности обеспечения материалами АФС с БВС, пригодными для проведения кадастровых работ на землях населенных пунктов / Ю. Г. Райзман. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 3. – 2020. – С. 36–40.

67 Раков, Д. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса / Д. Н. Раков, В. Н. Никитин. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 27–36.

68 Санкина, Е. А. Технологии BENTLEY при реставрации древнего монастыря в Подмосковье / Е. А. Санкина. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 4. – 2016. – С. 36–39.

69 Семенцов, А. В. Усовершенствование методики калибровки неметрических цифровых съемочных камер с использованием дополнительных геометрических условий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия / Семенцов Андрей Владимирович. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Текст : непосредственный.

70 Современные проблемы землеустройства и кадастров. Пространственное развитие территорий : учебник / А. П. Сизов, Е. А. Стыщенко, Д. М. Хомяков, Е. Г. Черных. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Издательство "КноРус"», 2022. – 218 с. – (Бакалавриат и магистратура). – Текст : непосредственный.

71 Современные проблемы отвода, использования и учета земель : коллективная монография / А. Е. Алтынов, Б. Э. У. Банколе, С. С. Дручинин, А. Т. Зверев, А. Ю. Жуковский, Т. В. Илюшина, А. М. Лелюхина, Ж. Г. Новосёлова, В. А. Ноздрачёв, А. П. Сизов, Е. А. Стыщенко, И. А. Хабарова. – Москва : Русайнс, 2017. – 170 с. – Текст : непосредственный.

72 Создание ландшафтных моделей местности и трехмерная реконструкция археологических памятников / Л. В. Татаурова, Л. В. Быков, А. З. Светлейший, П. В. Орлов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 123–128.

73 Стыщенко, Е. А. Перспективы развития системы государственного мониторинга использования земель / Е. А. Стыщенко, А. В. Семейкин. – Текст : непосредственный // Геодезия, землеустройство и кадастры: вчера, сегодня, завтра : сборник материалов международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию землеустроительного факультета Омского ГАУ, Омск, 29–30 марта 2017 года. – Омск : Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, 2017. – С. 168–172.

74 Трехмерная модель. – Текст : электронный // Pix4D : [сайт]. – 2022. – URL: <https://cloud.pix4d.com/dataset/353574/model?shareToken=049e9f65b90edfba54>.

75 Усманов, Б. М. Комплексная оценка современного состояния территории болгарского городища (Татарстан, Россия) / Б. М. Усманов, И. И. Гайнуллин, П. В. Хомяков. – Текст : непосредственный // Поволжская Археология. – 2018. – № 2(24). – С. 326–341. – DOI 10.24852/pa2018.2.24.326.341.

76 Фотограмметрическая калибровка фотокамеры для аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна / С. А. Кадничанский, М. В. Курков, В. М. Курков, А. Г. Чибуничев. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – № 6. – 2019. – С. 35–40.

77 Фотограмметрия в развитии городских агломераций / А. А. Алябьев, А. Е. Иванов, А. А. Кобзев, В. Н. Никитин. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 1. – С. 30–41. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-1-30-41.

78 Хлебникова, Т. А. Анализ точности получения измерительных трехмерных видеосцен по материалам аэрокосмических съемок в различных 3D ГИС / Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 61–65.

79 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 119–129.

80 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова, С. М. Аубакирова. – 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. 32–37.

81 Чернов, А. В. Теоретические основы трехмерного кадастра объектов недвижимости / А. В. Чернов, Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 153–170.

82 Чибуничев, А. Г. Разработка автоматизированной технологии создания векторной модели объекта по результатам трехмерного лазерного сканирования

и цифровой фотосъемки / А. Г. Чибуничев, В. П. Галахов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 89–92.

83 Шаповалов, Д. А. Аналитический обзор развития многомерных систем учета и регистрации прав и объектов недвижимости в парадигме «умного города» / Д. А. Шаповалов, Н. С. Бегляров. – Текст : непосредственный // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2021. – № 3. – С. 185–192.

84 Шершень, А. И. Аэрофотосъемка / А. И. Шершень. – Москва : Геодезиздат, 1958. – 336 с. – Текст : непосредственный.

85 Широкова, Т. А. Создание векторных моделей зданий и рельефа по данным воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки в программном продукте Terrasolid / Т. А. Широкова, А. В. Антипов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 92–95.

86 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 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.

87 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 IX Международной научной конференции, Красноярск, 2022 г. / Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 167–169.

88 Шуберт, Х. 3D-фотограмметрия с применением БПЛА в процессе археологического исследования / Х. Шуберт. – Текст : непосредственный // Вестник Омского университета. Серия: Исторические науки. – 2016. – № 4 (12). – С. 124–127.

89 3D Modelling of Archaeoseismic Damage in the Roman Site of Baelo Claudia (Gibraltar Arc, South Spain) / Y. Sánchez-Sánchez, J. Elez, P. G. Silva, G. Santos-Delgado, J. Luis Giner-Robles, K. Reicherter. – Spain. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/10/5223>. – Текст : электронный.

90 3D Numerical Modelling of Tailings Dam Breach Run Out Flow over Complex Terrain: A Multidisciplinary Procedure / K. Wang, P. Yang, G. Yu, C. Yang, L. Zhu. – China. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2538>. – Текст : электронный.

91 Accuracy Analysis of a Dam Model from Drone Surveys / E. Ridolfi, G. Buffi, S. Venturi, P. Manciola. – Italy. – URL: <https://doi.org/10.3390/s17081777/>. – Текст : электронный.

92 Agisoft Metashape. Руководство пользователя. – Текст : электронный // Agisoft : [сайт]. – 2022. – URL: <https://www.agisoft.com>.

93 Aricò, M. From scan-to-Bim to heritage building information modelling for an ancient arab-norman church / M. Aricò, M. Lo Brutto. – France. – URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B2-2022/761/2022/>. – Текст : электронный.

94 Bacher, U. Hybrid Aerial Sensor Data as Basis for a Geospatial Digital Twin / U. Bacher. – France. – URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B4-2022/653/2022/> – Текст : электронный.

95 Colomina, I. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote Sensing / I. Colomina, P. Molina. – Spain. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>. – Текст : электронный.

96 Digital survey and parametric 3D modelling for the vulnerability assessment of masonry heritage: The Basilica of San Domenico in Siena, Italy / A. Massafra, C. Costantino, D. Prati, G. Predari, R. Gulli. – Italy. – URL: <https://www.witpress.com/elibRARY/wit-transactions-on-the-built-environment/203/37951> . – Текст : электронный.

97 Eisenbeiss, H. The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping / H. Eisenbeiss. – Zurich. – URL: <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/140Eisenbeiss.pdf/>. – Текст : электронный.

98 Electronic shutter VS mechanical shutter. – URL: <https://www.canon-europe.com/pro/infobank/electronic-vs-mechanical-shutter/>. – Текст : электронный.

99 From UAV survey to 3D printing, geomatics techniques for the enhancement of small village Cultural Heritage / A. Fotia, A. Modafferi, A. Nunnari, S. D'Amico. – Italy. – URL: <https://wseas.com/journals/articles.php?id=153>. – Текст : электронный.

100 Geological hazard interpretation and hazard evaluation of open pit mines based on Unmanned Aerial Vehicle images / J. Ma, J. Liu, J. Ming, X. Sang . – Japan. – URL: [doi:10.1088/1742-6596/2006/1/012072](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2006/1/012072). – Текст : электронный.

101 Grieves, M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers. – USA. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4). – Текст : электронный.

102 Grun, A. Progress in photogrammetric point determination by compensation of systematic errors and detection gross errors / A. Grun. – Текст : непосредственный // Nachrichten aus dem Karten – und Vermessungswesen. – 1978. – № 2, 36. – P. 113–140.

103 Hirschmuller, Heiko. Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information / Heiko Hirschmuller. – Текст : непосредственный / IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – February 2008. – Volume 30, Issue 2. – P. 328–341. – DOI 10.1109/TPAMI.2007.1166.

104 Honarmand, M. Geological Mapping Using Drone-Based Photogrammetry: An Application for Exploration of Vein-Type Cu Mineralization / M. Honarmand, H. Shahriari. – Iran. – URL: <https://doi.org/10.3390/min11060585/>. – Текст : электронный.

105 Implementation of ultra-light UAV systems for cultural heritage documentation. / T. Bakirmana, B. Bayramb, B. Akpınar, M. F. Karabulut, O. C. Bayrak, A. Yigitoglu, D. Z. Seker. – Turkey. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207419303747?via%3Dihub>. – Текст : электронный.

106 Integration of 3D model from UAV survey in BIM environment / V. Barrile, A. Fotia, G. Candela, E. Bernard. – Italy. – URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-195-2019>. – Текст : электронный.

107 Integration of photogrammetry and portable mobile mapping technology for 3D modeling of cultural heritage sites: the case study of The Bziza Temple / E. Maset, R. Valente, M. Iamoni, M. Haider, A. Fusiello. – France. – URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B2-2022/831/2022/>. – Текст : электронный.

108 Integration of UAV Photogrammetry and SPH Modelling of Fluids to Study Runoff on Real Terrains / A. Barreiro, J. M. Domínguez, A. J. C. Crespo, H. González-Jorge, D. Roca, M. Gómez-Gesteira. – USA. – URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111031>. – Текст : электронный.

109 Liang, C-K. Analysis and Compensation of Rolling Shutter Effect / C-K. Liang, H. Chen, L-W. Chang. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Image Processing. – 2008. – Vol. 17. – P. 1323–1330. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/3328923\\_Analysis\\_and\\_Compensation\\_of\\_Rolling\\_Shutter\\_Effect](https://www.researchgate.net/publication/3328923_Analysis_and_Compensation_of_Rolling_Shutter_Effect).

110 Optiplane. – Текст : электронный // OP : [сайт]. – 2022. – URL: <http://optiplane.ru>.

111 Photogrammetric accuracy and modeling of rolling shutter cameras / J. Vautherin, S. Rutishauser, K. Schneider-Zapp et al. – Текст : электронный // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – Vol. III-3. – P. 139–146. – URL: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/III-3/139/2016/isprs-annals-III-3-139-2016.pdf>.

112 PHOTOMOD UAS. Руководство пользователя. – Текст : электронный // Racurs : [сайт]. – 2022. – URL: <https://racurs.ru/program-products/photomod-uas>.

113 Rey-Otero, Ives. Anatomy of the SIFT Method / Ives Rey-Otero, Mauricio Delbracio. – Текст : электронный // Image Processing On Line, 4 (2014). – P. 370–396. – URL: <http://dx.doi.org/10.5201/ipol.2014.82>.

114 Saadatseresht, M. UAV photogrammetry: A practical solution for challenging mapping projects / M. Saadatseresht, A. H. Hashempourb, M. Hasanlou. – Iran. – URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W5/619/2015/>. – Текст : электронный.

115 Simou, S. The integration of 3D technology for the conservation and restoration of ruined archaeological artifacts / S. Simou, B. Khadija, A. Nounah. – Marocco. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/354697337\\_3D\\_Reproductions\\_of\\_Cultural\\_Heritage\\_Artefacts\\_Evaluation\\_of\\_significance\\_and\\_experience](https://www.researchgate.net/publication/354697337_3D_Reproductions_of_Cultural_Heritage_Artefacts_Evaluation_of_significance_and_experience), <https://inlnk.ru/w4OVN>. – Текст : электронный.

116 SUPERCAM. – Текст : электронный // SUPERCAM : [сайт]. – 2022. – URL: <https://supercam.aero>.

117 Survey methodologies and 3d modelling for conservation of historical masonry bridges / I. Trizio, A. Marra, F. Savini, G. Fabbrocino. – China. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/354187790\\_SURVEY\\_METHODOLOGIES\\_AND\\_3D\\_MODELLING\\_FOR\\_CONSERVATION\\_OF\\_HISTORICAL\\_MASONRY\\_BRIDGES](https://www.researchgate.net/publication/354187790_SURVEY_METHODOLOGIES_AND_3D_MODELLING_FOR_CONSERVATION_OF_HISTORICAL_MASONRY_BRIDGES), <https://inlnk.ru/yOmRDo>. – Текст : электронный.

118 Suziedelyte Visockiene, J. Analysis of differences in 3D building information modeling / J. Suziedelyte Visockiene, E. Tumeliene. – Czech Republic – URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-65-2019/>. – Текст : электронный.

119 Wang, Y. Building 3D Realistic Modeling Based on Air-ground Multi-source Data Fusion / Y. Wang, T. Zhang, J. Wang. – China. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021303025>. – Текст : электронный.

120 WGIC POLICY REPORT: 2022-01. – Текст : электронный // Spatial Digital Twins: Global Status, Opportunities, and the Way Forward : [сайт]. – 2022. – URL: <https://wgicouncil.org/publication/reports/download-the-wgic-spatial-digital-twins-report/>.

121 Yu, D. Three-dimensional numerical simulation of mud flow from a tailing dam failure across complex terrain / D. Yu. – China. – URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-20-727-2020>. – Текст : электронный.



122 Zala Aero Group. – Текст : электронный // ZALA : [сайт]. – 2022. – URL: <https://zala-aero.com>.

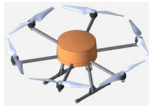





## ПРИЛОЖЕНИЕ А







(обязательное)







### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

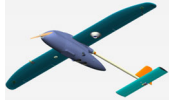



Таблица А.1 – Технические характеристики отечественных и зарубежных беспилотных воздушных судов





Производитель	Модель	Взлет и посадка	Максимальная взлетная масса, кг	Продолжительность полета, мин	Дальность полета, км	Съемочное оборудование
БВС мультироторного типа						
ГК Геоскан, г. Санкт-Петербург	Геоскан 401 	Взлет: вертикально в автоматическом режиме, посадка: площадка диаметром 5 м	9,3	до 60	24	Цифровая камера Sony RX1R II
	Gemini 		более 2,0	до 40	до 30	Цифровая камера Sony UMC-R10C
ГК «Беспилотные системы», г. Ижевск	Supercam X6M2 	Взлет и посадка: вертикально	до 8,0	до 55	до 10	Опционально
	Supercam X4 		4,0	40	до 5	





ООО «ПТЕРО», г. Москва	Рыжик 	Взлет и посадка: вертикально	15,0	45	–	Опционально
«Атлас Аэро», г. Санкт-Петербург	Атлас Мини Гео 	Взлет и посадка: вертикально Взлет и посадка: вертикально	2,4	30	15	Цифровая камера Ricoh GRII
	Атлас Компакт Гео 		3,2	45	30	Цифровая камера Ricoh GRII
	Атлас Карго ADK 	Взлет и посадка: вертикально	12,0	до 60	14	Цифровая фото- или видеокамера на гиростабилизиро- ванном подвесе, тепловизор или мультиспектраль- ная камера, лидар
DJI, Китай	DJI Matrice 300 в различных моди- фикациях 	Взлет и посадка: вертикально	6,38	от 30 до 55	15	Опционально
	Phantom 4 Pro V2.0 		1,37	около 30	до 10	Опционально

CHCNAV, Китай	 <p>BB4</p>	Взлет и посадка: вертикально	28,0	до 40 при полезной нагрузке, равной 5 кг, до 55 при полезной нагрузке в 1 кг	7	Цифровые камеры Sony A7 RII, Sony A6000, лазерный сканер
IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A, Италия	 <p>Novex</p>	Взлет и посадка: вертикально	8,1	до 40	–	Цифровые RGB-камеры, телевизионные камеры и др.
	 <p>IA-3 Colibri</p>		Менее 5,0	до 40 при полезной нагрузке, равной 0,5 кг	–	
БВС самолетного типа						
ГК Геоскан, г. Санкт-Петербург	 <p>Геоскан 701</p>	Взлет: с пусковой установки, посадка: на парашюте + баллонет	22,0	600	до 1000	Среднеформатная аэрофотосъемочная камера PhaseOne iXM-100, PhaseOne iXM-50, мультиспектральная цифровая камера MicaSense RedEdge-MX
	 <p>Геоскан 201</p>	Взлет: с пусковой установки, посадка: на парашюте, в автоматическом режиме	8,5	до 180	210	Цифровая камера Sony RX1R II
	 <p>Геоскан Lite</p>		3,1	до 60	70	Цифровая камера Sony Alpha 6000

ГК «Беспилотные системы», г. Ижевск	Supercam S450 	Взлет: пневматическая катапульта, посадка: парашют с системой отцепостроп и воздушные амортизаторы, размещенные в консолях крыла	29,0	до 420	не менее 450	Цифровые камеры Sony R10C, Sony A6000, Sony RX1RM2, Sony A7R2, Sony A7R IV, мультиспектральные цифровые камеры MicaSense RedEdge MX, Parrot Sequoia
	Supercam S350 / S350F 	Взлет: эластичная катапульта или пневматическая катапульта, посадка: парашют с системой отцепостроп	11,5	до 270	не менее 240	
	Supercam S250 / S250F 		9,5	до 180	не менее 180	
	Supercam S150 / S150F 	Взлет: эластичная катапульта, посадка: на парашюте в автоматическом или полуавтоматическом режиме	5,5	до 120	не менее 110	
	Supercam S100 / S100F 		3,5	до 60	не менее 50	
ООО «ПТЕРО», г. Москва	Птеро-G1 	Требуется площадка для взлета и посадки 200 x 100 м Взлет: с пневма-	20,0	до 720	до 1200	Nikon D810 с объективом Nikon AF Nikkor 50mm f/1.4D

		тической катапульты, посадка: на парашюте с амортизирующей подушкой				
	<p>Птеро-Н2</p> 	<p>Требуется площадка для взлета и посадки 200 x 100 м Взлет: с пневматической катапульты, посадка: на парашюте с амортизирующей подушкой</p>	18,0	до 360	до 480	<p>Мультиспектральная камера MicaSense RedEdge-MX, цифровые камеры Sony α7R II или Sony DSC-RX1RM2</p>
«Атлас Аэро», г. Санкт-Петербург	<p>Атлас 135 ГЕО</p> 	<p>Взлет: автоматический, с эластичной катапульты, посадка: автоматическая, парашютная</p>	3,0	75	75	<p>Цифровая камера Sony A6000</p>
	<p>Атлас 180 ГЕО</p> 	<p>Взлет: автоматический, с эластичной катапульты, посадка: автоматическая, парашютная</p>	6,0	до 120	120	<p>Цифровая камера Ricoh GRIII</p>
ZALA AERO, г. Ижевск	<p>ZALA 421-16F</p> 	<p>Взлет: пневматическая пусковая установка,</p>	10,5	более 240	более 75	<p>Гиросtabilизированный фотоаппарат с видеокамерой</p>

		посадка: парашют, воздушный амортизатор				Z-16F7R-VR / Z-16F7R2-VR / Z-16F7R4-VR, два фотоаппарата на поворотной раме с возможностью выставления перед полетом фиксированных углов взаимного расположения с видеокамерой Z-16F8R-VR / Z-16F8R2-VR, мультиспектральная камера
	ZALA 421-16F2 	Взлет: эластичная / пневматическая пусковая установка, посадка: парашют, воздушный амортизатор	7,5	210	более 50	
	ZALA 421-10F 	Взлет: эластичная катапульта, Посадка: парашют	4,5	более 120	более 15	Фотоаппарат с видеокамерой Z-10F1-VR
senseFly, Швейцария	eBee X 	Взлет: с руки, посадка: автоматическая линейная посадка (точность 5 м в секторе 20°)	1,6	в стандартной комплектации до 60	до 8	MicaSense RedEdge MX, Parrot Sequoia, senseFly Aeria X, senseFly S.O.D.A. 3D, senseFly Duet T, senseFly Duet M
IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A, Италия	IA-17 	Взлет: эластичная катапульта, посадка: парашют	25,0	более 300	80	Цифровые RGB-камеры, телевизионные камеры и др.

Конвертопланы						
ООО «ИКС», г. Санкт-Петербург	ИКС-7 	Взлет и посадка: вертикально	7,0	до 60	60	Цифровые камеры Sony A6000 / Sony RX1 RM2
ГК «Беспилотные системы», г. Ижевск	Supercam SX350 	Взлет и посадка: вертикально	13,5	до 120	Не менее 160	Опционально
ООО «Оптиплайн Аэродинамика», г. Новосибирск	Optiplane S2 	Взлет и посадка: вертикально	до 6,0	60	до 40	Sony 10x
СНСNAV, Китай	P330 Pro 	Взлет и посадка: вертикально, тре- буется площадка 4 х 4 м	14,0	до 150	до 15	Опционально

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ  
С ПЕРЕКРЕСТНЫМИ МАРШРУТАМИ (АБ) В ПО AGISOFT METASHAPE

1 Фотограмметрическая обработка аэрофотосъемки с перекрестными маршрутами (АБ) без компенсации влияния шторно-щелевого затвора.

1.1 Калибровка камеры. Количество обработанных снимков – 111.

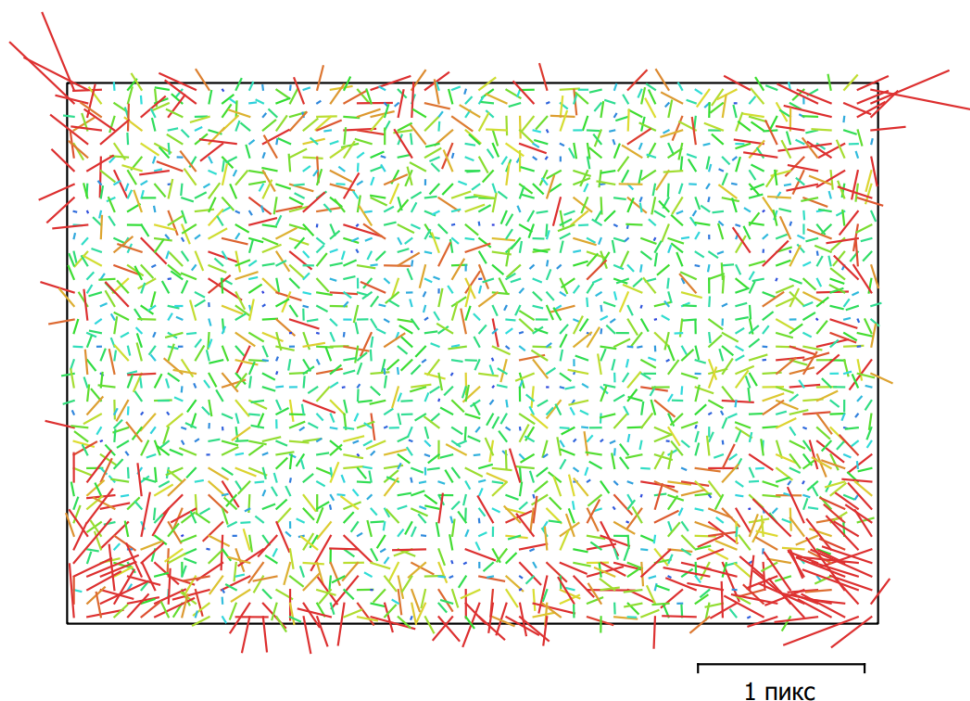


Рисунок Б.1 – Невязка по связующим точкам для ПЛСЕ-6000 (20 мм),  
обработка без компенсации

Тип	Разрешение	Фокусное расстояние	Размер пикселя
Кадровая	6 000 × 4 000	20 мм	4 × 4 мкм

	<b>Значение</b>	<b>Ошибка</b>	<b>F</b>	<b>Cx</b>	<b>Cy</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>F</b>	<b>5203.25</b>	0.29	1.00	0.07	-0.32	-0.07	0.13	-0.05	-0.01	-0.09
<b>Cx</b>	<b>-56.4677</b>	0.1		1.00	-0.00	0.04	-0.05	0.06	0.63	0.02
<b>Cy</b>	<b>43.2645</b>	0.093			1.00	-0.01	-0.03	0.01	0.02	0.46
<b>K1</b>	<b>-0.160665</b>	9.2e-05				1.00	-0.94	0.89	0.05	-0.07
<b>K2</b>	<b>0.139994</b>	0.00042					1.00	-0.98	-0.02	-0.00
<b>K3</b>	<b>0.0033889</b>	0.00058						1.00	0.02	-0.00
<b>P1</b>	<b>-0.000544086</b>	4.2e-06							1.00	-0.01
<b>P2</b>	<b>0.00104567</b>	3.6e-06								1.00

Рисунок Б.2 – Коэффициенты калибровки и матрица корреляции, обработка без компенсации

## 1.2 Построение цифровой модели местности.

Разрешение: 10,3 см/пиксель. Плотность точек: 93,9 точек/м<sup>2</sup>.

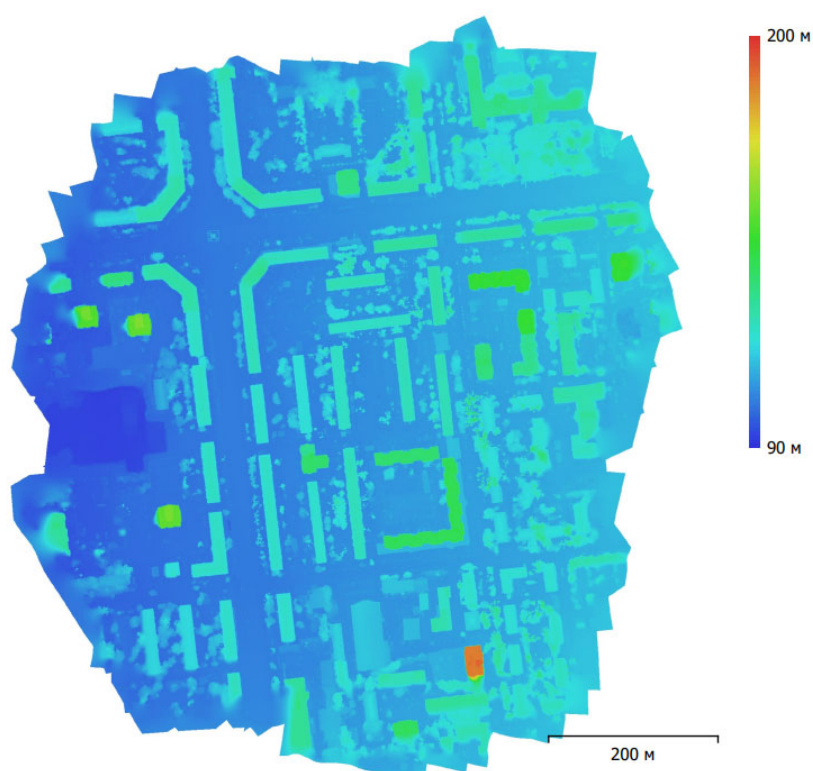


Рисунок Б.3 – Рассчитанная цифровая модель местности, обработка без компенсации

2 Фотограмметрическая обработка аэрофотосъемки с перекрестными маршрутами (АБ) с компенсацией влияния шторно-щелевого затвора.

2.1 Калибровка камеры. Количество обработанных снимков – 111. Функция компенсации шторно-щелевого («скользящего») затвора.

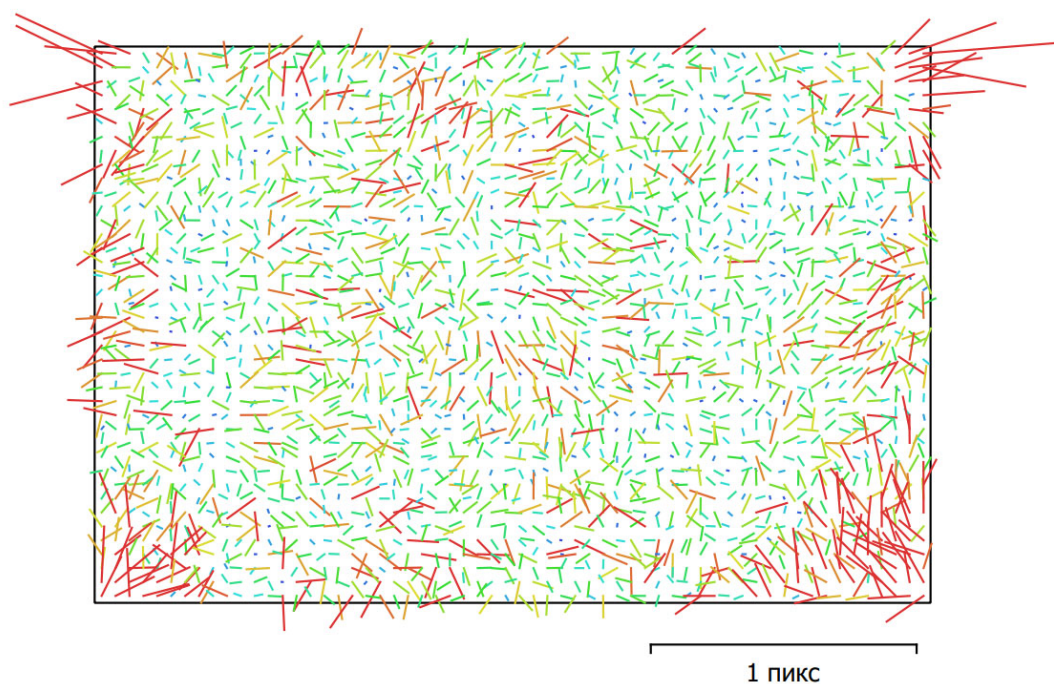


Рисунок Б.4 – Невязка по связующим точкам для ILCE-6000 (20 мм), обработка с компенсацией

Тип	Разрешение	Фокусное расстояние	Размер пикселя
Кадровая	6 000 × 4 000	20 мм	4 × 4 мкм

	Значение	Ошибка	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>5192.8</b>	0.46	1.00	-0.01	-0.36	-0.07	0.13	-0.04	-0.03	-0.08
<b>Cx</b>	<b>-60.615</b>	0.13		1.00	0.01	0.03	-0.05	0.06	0.59	-0.00
<b>Cy</b>	<b>38.3749</b>	0.12			1.00	-0.02	-0.03	-0.01	0.01	0.37
<b>K1</b>	<b>-0.161519</b>	0.00013				1.00	-0.93	0.88	0.03	-0.11
<b>K2</b>	<b>0.142354</b>	0.00056					1.00	-0.98	-0.02	0.01
<b>K3</b>	<b>-0.000643596</b>	0.00076						1.00	0.01	-0.01
<b>P1</b>	<b>-0.000765652</b>	5.7e-06							1.00	-0.01
<b>P2</b>	<b>0.00122399</b>	5e-06								1.00

Рисунок Б.5 – Коэффициенты калибровки и матрица корреляции, обработка с компенсацией

## 2.2 Построение цифровой модели местности.

Разрешение: 25 см/пиксель. Плотность точек: 16 точек/м<sup>2</sup>.

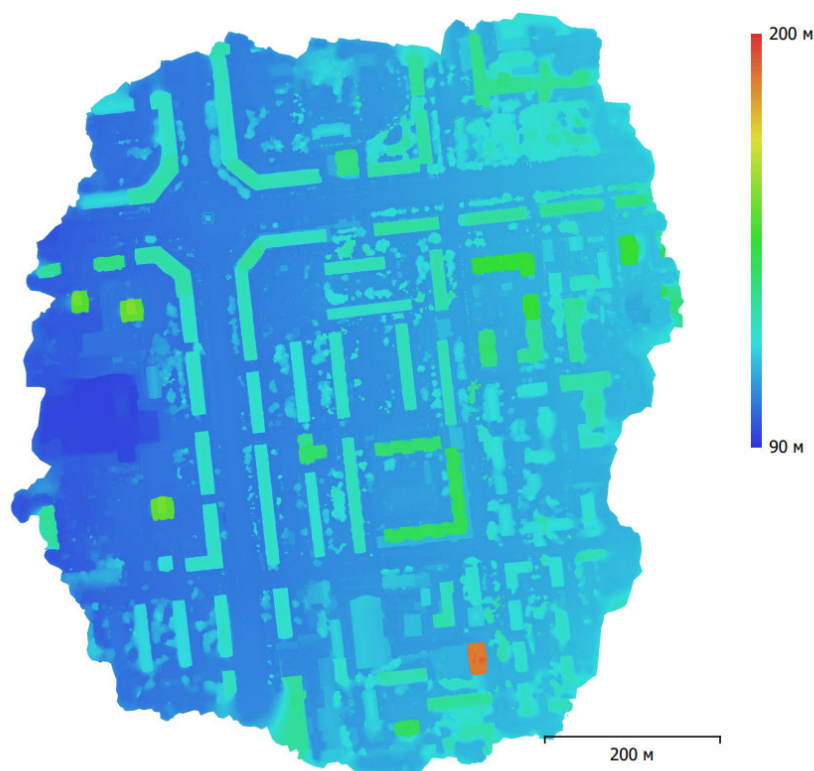


Рисунок Б.6 – Рассчитанная цифровая модель местности, обработка с компенсацией

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ  
С МАРШРУТАМИ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ (А)  
В ПО AGISOFT METASHAPE

1 Фотограмметрическая обработка аэрофотосъемки с маршрутами в одном направлении (А) без компенсации влияния шторно-щелевого затвора.

1.1 Калибровка камеры. Количество обработанных снимков – 57.

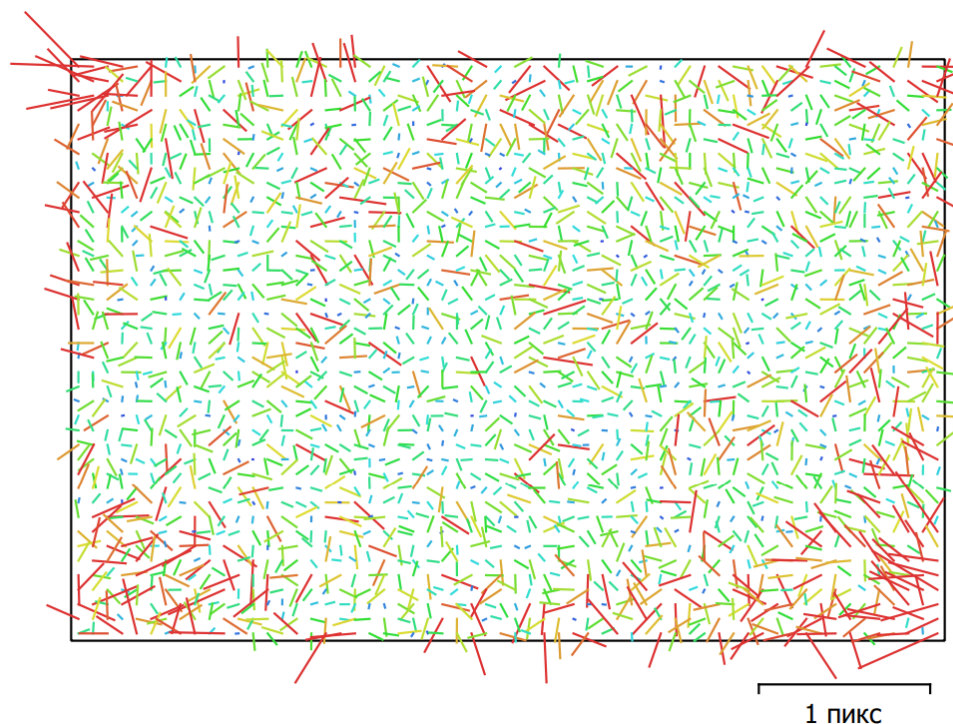


Рисунок В.1 – Невязка по связующим точкам для ILCE-6000 (20 мм), обработка без компенсации

Тип	Разрешение	Фокусное расстояние	Размер пикселя
Кадровая	6 000 × 4 000	20 мм	4 × 4 мкм

	<b>Значение</b>	<b>Ошибка</b>	<b>F</b>	<b>Cx</b>	<b>Cy</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>F</b>	<b>5200.28</b>	0.41	1.00	0.02	-0.31	-0.13	0.14	-0.04	0.00	-0.01
<b>Cx</b>	<b>-58.6576</b>	0.13		1.00	-0.03	0.04	-0.06	0.07	0.49	-0.05
<b>Cy</b>	<b>42.7088</b>	0.12			1.00	0.01	-0.00	-0.03	-0.01	0.44
<b>K1</b>	<b>-0.160862</b>	0.0001				1.00	-0.93	0.87	0.04	-0.11
<b>K2</b>	<b>0.144275</b>	0.00045					1.00	-0.98	-0.03	0.02
<b>K3</b>	<b>-0.00352927</b>	0.00062						1.00	0.03	-0.03
<b>P1</b>	<b>-0.000625855</b>	5.2e-06							1.00	-0.01
<b>P2</b>	<b>0.000954306</b>	4.7e-06								1.00

Рисунок В.2 – Коэффициенты калибровки и матрица корреляции, обработка без компенсации

1.2 Построение цифровой модели местности.

Разрешение: 10,4 см/пиксель. Плотность точек: 91,7 точек/м<sup>2</sup>.

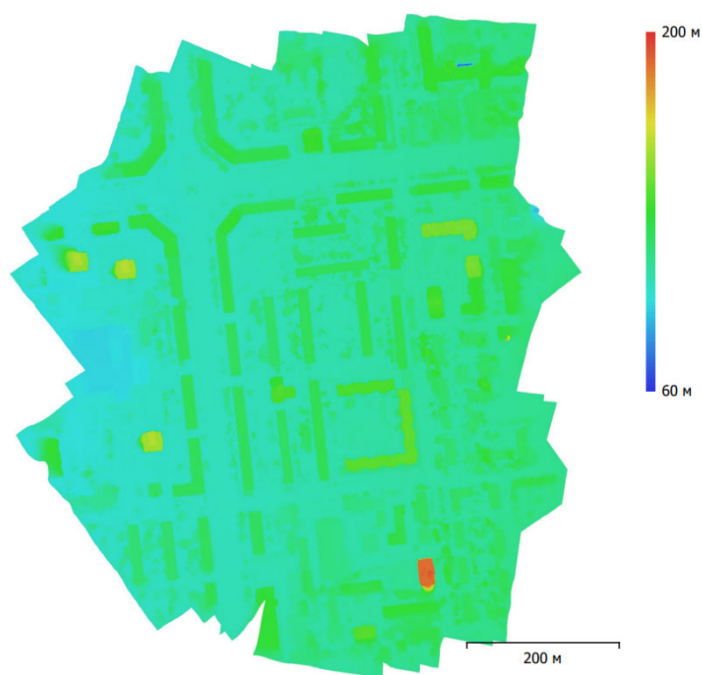


Рисунок В.3 – Рассчитанная цифровая модель местности, обработка без компенсации

2 Фотограмметрическая обработка аэрофотосъемки с маршрутами в одном направлении (А) с компенсацией влияния шторно-щелевого затвора.

2.1 Калибровка камеры. Количество обработанных снимков – 57. Функция компенсации шторно-щелевого («скользящего») затвора.

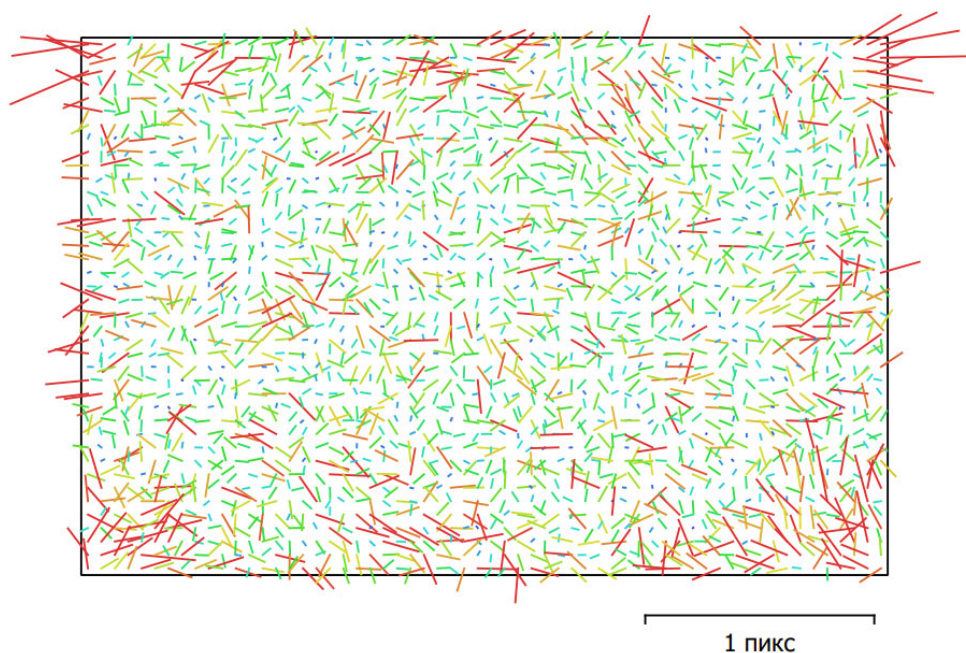


Рисунок В.4 – Невязка по связующим точкам для ИЛСЕ-6000 (20 мм), обработка с компенсацией

Тип	Разрешение	Фокусное расстояние	Размер пикселя
Кадровая	6 000 × 4 000	20 мм	4 × 4 мкм

	Значение	Ошибка	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>5186.84</b>	1	1.00	0.03	-0.32	-0.13	0.14	-0.03	-0.00	-0.01
<b>Cx</b>	<b>-60.827</b>	0.32		1.00	-0.02	0.04	-0.06	0.08	0.48	-0.04
<b>Cy</b>	<b>37.8863</b>	0.3			1.00	0.01	-0.00	-0.03	-0.01	0.43
<b>K1</b>	<b>-0.159813</b>	0.00026				1.00	-0.93	0.87	0.04	-0.11
<b>K2</b>	<b>0.138251</b>	0.0011					1.00	-0.98	-0.03	0.02
<b>K3</b>	<b>0.00341305</b>	0.0015						1.00	0.03	-0.02
<b>P1</b>	<b>-0.000745625</b>	1.3e-05							1.00	-0.01
<b>P2</b>	<b>0.00119818</b>	1.2e-05								1.00

Рисунок В.5 – Коэффициенты калибровки и матрица корреляции, обработка с компенсацией

## 2.2 Построение цифровой модели местности.

Разрешение: 10,4 см/пиксель. Плотность точек: 92 точек/м<sup>2</sup>.

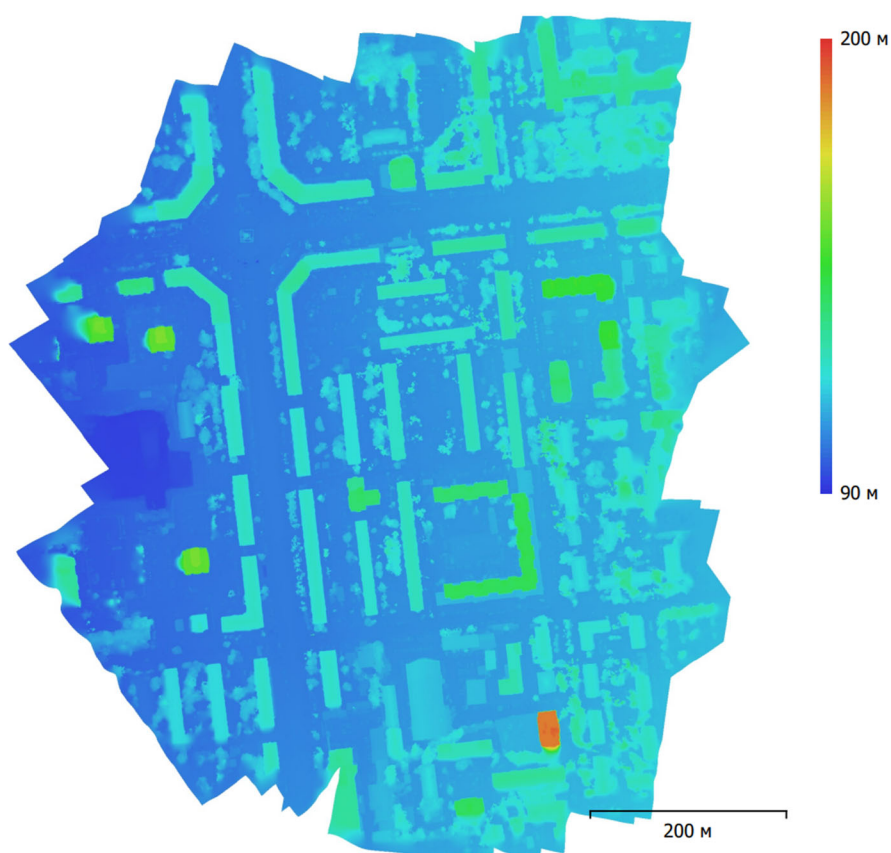


Рисунок В.6 – Рассчитанная цифровая модель местности, обработка с компенсацией

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ  
С МАРШРУТАМИ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ (Б)  
В ПО AGISOFT METASHAPE

1 Фотограмметрическая обработка аэрофотосъемки с маршрутами в одном направлении (Б) без компенсации влияния шторно-щелевого затвора.

1.1 Калибровка камеры. Количество обработанных снимков – 54.

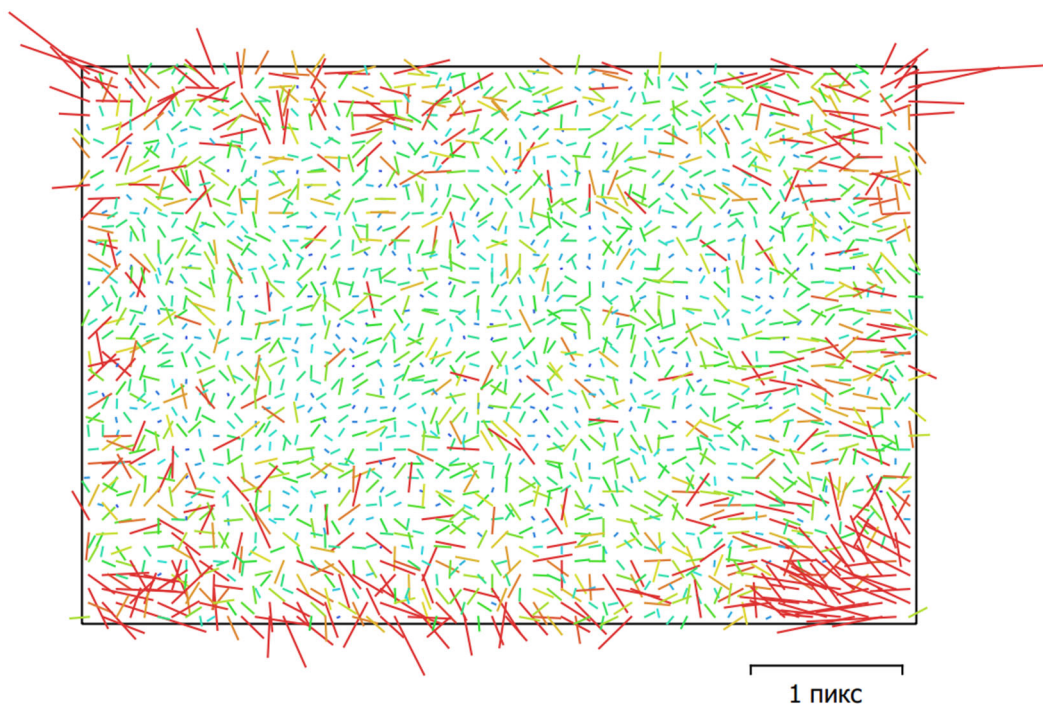


Рисунок Г.1 – Невязка по связующим точкам для ПЛСЕ-6000 (20 мм),  
обработка без компенсации

Тип	Разрешение	Фокусное расстояние	Размер пикселя
Кадровая	6 000 × 4 000	20 мм	4 × 4 мкм

	<b>Значение</b>	<b>Ошибка</b>	<b>F</b>	<b>Cx</b>	<b>Cy</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>F</b>	<b>5205.44</b>	0.39	1.00	-0.06	-0.36	-0.06	0.13	-0.04	-0.03	-0.10
<b>Cx</b>	<b>-54.5953</b>	0.13		1.00	0.06	0.02	-0.03	0.04	0.63	0.03
<b>Cy</b>	<b>42.7448</b>	0.11			1.00	0.01	-0.05	0.01	0.02	0.39
<b>K1</b>	<b>-0.161227</b>	0.00011				1.00	-0.94	0.88	-0.01	-0.07
<b>K2</b>	<b>0.138172</b>	0.00051					1.00	-0.98	0.01	-0.01
<b>K3</b>	<b>0.0082965</b>	0.00071						1.00	-0.01	0.00
<b>P1</b>	<b>-0.000429512</b>	5.2e-06							1.00	0.01
<b>P2</b>	<b>0.00106775</b>	4.5e-06								1.00

Рисунок Г.2 – Коэффициенты калибровки и матрица корреляции, обработка без компенсации

## 1.2 Построение цифровой модели местности.

Разрешение: 10,4 см/пиксель. Плотность точек: 96,1 точек/м<sup>2</sup>.

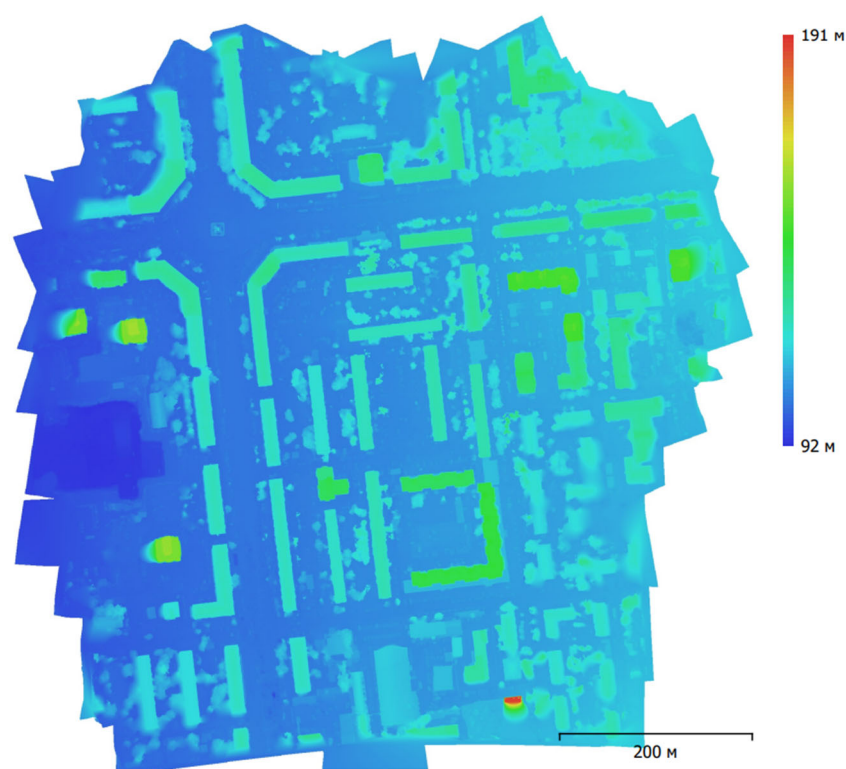


Рисунок Г.3 – Рассчитанная цифровая модель местности, обработка без компенсации

2 Фотограмметрическая обработка аэрофотосъемки с маршрутами в одном направлении (А) с компенсацией влияния шторно-щелевого затвора.

2.1 Калибровка камеры. Количество обработанных снимков – 54. Функция компенсации шторно-щелевого («скользящего») затвора.

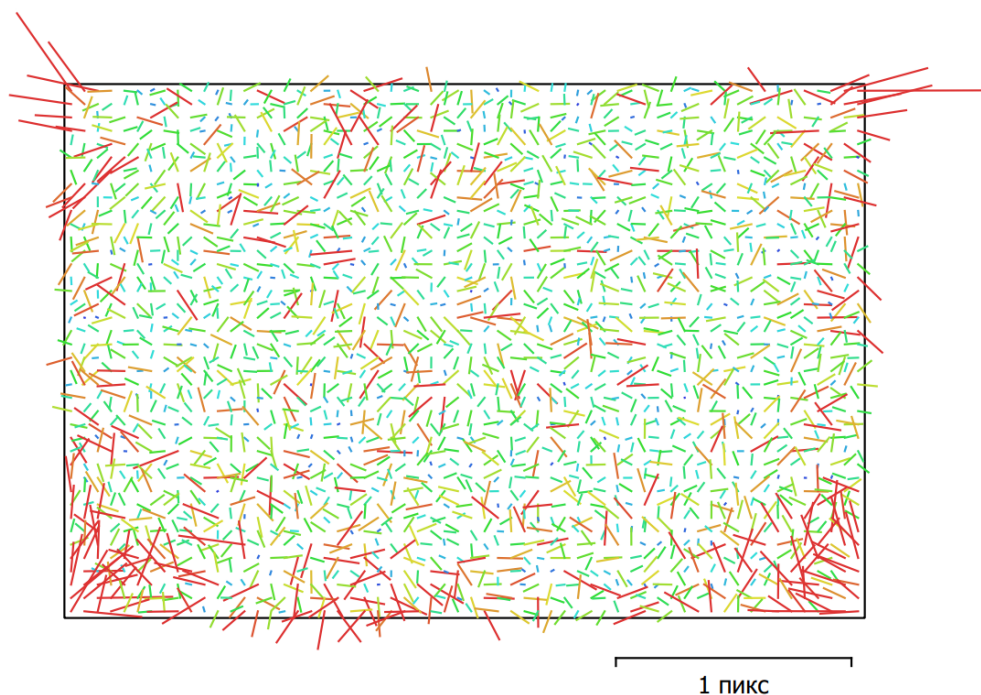


Рисунок Г.4 – Невязка по связующим точкам для ILCE-6000 (20 мм)

ILCE-6000 (20 мм), скользящий затвор

54 снимка

Тип	Разрешение	Фокусное расстояние	Размер пикселя
Кадровая	6 000 × 4 000	20 мм	4 × 4 мкм

	Значение	Ошибка	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>5192.35</b>	0.8	1.00	-0.06	-0.36	-0.07	0.14	-0.05	-0.03	-0.10
<b>Cx</b>	<b>-59.8</b>	0.26		1.00	0.06	0.01	-0.03	0.04	0.63	0.03
<b>Cy</b>	<b>38.7959</b>	0.23			1.00	0.02	-0.05	0.02	0.02	0.39
<b>K1</b>	<b>-0.163808</b>	0.00023				1.00	-0.94	0.88	-0.02	-0.07
<b>K2</b>	<b>0.148162</b>	0.001					1.00	-0.98	0.02	-0.01
<b>K3</b>	<b>-0.00747142</b>	0.0014						1.00	-0.02	0.01
<b>P1</b>	<b>-0.000750236</b>	1.1e-05							1.00	0.01
<b>P2</b>	<b>0.00122059</b>	9.2e-06								1.00

Рисунок Г.5 – Коэффициенты калибровки и матрица корреляции

## 2.2 Построение цифровой модели местности.

Разрешение: 10,2 см/пиксель. Плотность точек: 96,2 точек/м<sup>2</sup>.

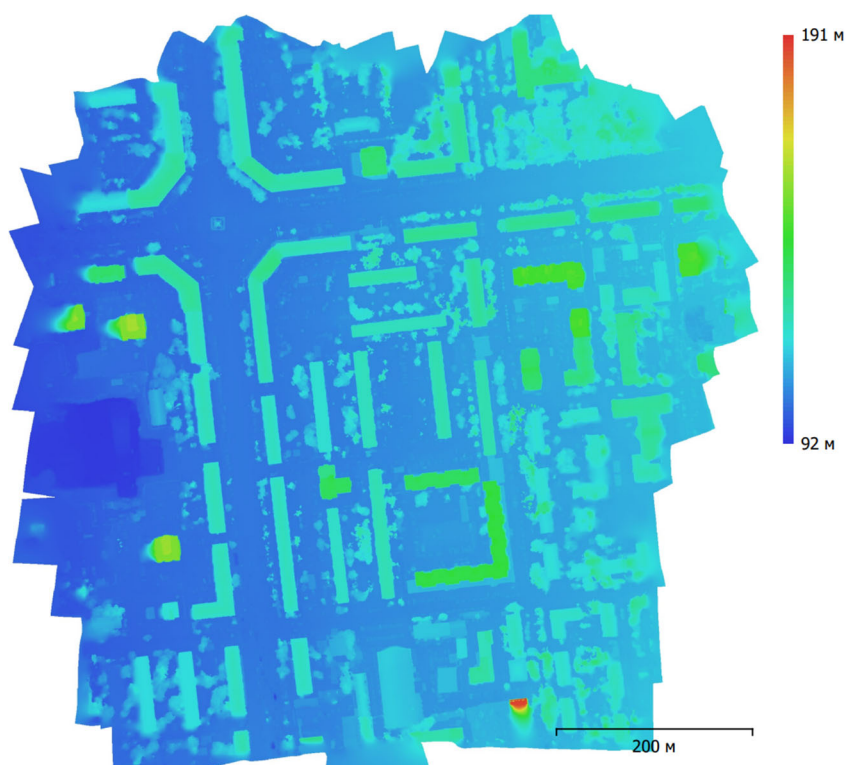


Рисунок Г.6 – Рассчитанная цифровая модель местности