

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

На правах рукописи

Оприцова Ольга Анатольевна



Разработка требований к сбору и обработке данных аэрофотосъемки
с беспилотных летательных аппаратов для моделирования геопространства

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Хлебникова Татьяна Александровна

Новосибирск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВА.....	10
1.1 Роль геоинформационного обеспечения в цифровой экономике Российской Федерации	10
1.2 Анализ требований нормативно-технических документов для моделирования геопространства	18
1.3 Технические и программные средства сбора и обработки данных для моделирования геопространства территорий	22
Выводы по первому разделу	34
2 РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К СБОРУ И ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВА	35
2.1 Требования, предъявляемые к моделям геопространства	35
2.2 Сопоставление методов получения и обработки снимков	37
2.3 Расчет параметров аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов	42
2.4 Разработка технологической схемы сбора и обработки данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов для моделирования геопространства	50
Выводы по второму разделу	53
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К СБОРУ И ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВА.....	55

3.1 Общие положения методики исследований.....	55
3.2 Построение и оценка точности фотограмметрической модели тест-объекта	56
3.3 Построение и оценка точности фотограмметрической модели фрагмента территории жилищно-строительного комплекса «Восточный» города Новосибирска.....	61
3.4 Построение и оценка точности фотограмметрической модели объекта недвижимости.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	75
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА	91
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ПО AGISOFT PHOTOSCAN (ТЕСТ-ОБЪЕКТ)	92
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА.....	99
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СНИМКОВ В ПО AGISOFT PHOTOSCAN (ЖСК «ВОСТОЧНЫЙ»).....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПОРНЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК В ПО AGISOFT PHOTOSCAN (ЖСК «ВОСТОЧНЫЙ»).....	106

ПРИЛОЖЕНИЕ Е (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА ТЕРРИТОРИИ ЖСК «ВОСТОЧНЫЙ» ГОРОДА НОВОСИБИРСКА (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СНИМКОВ)	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА ТЕРРИТОРИИ ЖСК «ВОСТОЧНЫЙ» ГОРОДА НОВОСИБИРСКА (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПОРНЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК).....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ И (обязательное) ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ПО AGISOFT PHOTOSCAN (ОБЪЕКТ НЕДВИЖИМОСТИ).....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ К (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА НЕДВИЖИМОСТИ ...	125

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в условиях становления и развития цифровой экономики Российской Федерации цифровые данные являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности. Возрастает спрос на цифровые геопропространственные данные, которые выступают универсальным элементом связи различных баз данных в целях построения единого геоинформационного пространства (ЕГИП) в рамках стратегии пространственного развития России.

Традиционно большую часть геопропространственных данных для ЕГИП обеспечивают средства и методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – космическая и аэрофотосъемка (АФС).

В последнее десятилетие с развитием микроэлектроники, робототехники, искусственного интеллекта (машинное зрение), облачных технологий активно развивается производство малогабаритных и несложных в управлении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые успешно используются для выполнения АФС.

Преимуществами БПЛА являются: рентабельность, возможность выполнения съемки с небольших высот и вблизи объектов, получение снимков высокого разрешения, оперативность получения снимков, возможность применения в зонах чрезвычайных ситуаций без риска для жизни и здоровья пилотов. БПЛА целесообразно применять при создании детальной модели геопропространства, крупномасштабных топографических планов, а также для оперативного геомониторинга территорий.

Анализ технологических трендов, проведенный в 2016 г. Межведомственной рабочей группой по разработке и реализации Национальной технологической инициативы при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России, показал, что в ближайшей перспективе ожидается глобальное развитие информационных технологий в отношении вычисли-

тельных мощностей и алгоритмов обработки больших данных, развитие навигационных технологий, повышение точности, детализации и актуальности пространственных данных, замена топографических карт трехмерными пространственными моделями, создаваемыми и актуализированными преимущественно автоматическим способом. Из-за ужесточения требований к актуальности пространственных данных увеличатся потребности в проведении регулярной АФС.

В настоящее время развитию технологий БПЛА уделяется большое внимание и в ближайшем будущем стоит ожидать новых достижений в части повышения точности определения координат центров проектирования снимков, автоматизации фотограмметрической обработки снимков и дешифрирования, использования средств телекоммуникации, позволяющих выполнять контроль результатов аэрофотосъемки в режиме реального времени.

Однако отсутствие актуальной нормативно-технической документации приводит к вольному толкованию устаревших документов и требований, что в свою очередь негативно сказывается на качестве конечной фотограмметрической модели. Поэтому разработка требований к сбору и обработке данных АФС с БПЛА для моделирования геопространства является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий и обработки результатов дистанционного зондирования Земли и АФС отражены в работах Антипова И. Т., Адрова В. Н., Гука А. П., Журкина И. Г., Кадничанского С. А., Карпика А. П., Лисицкого Д. В., Михайлова А. П., Нехина С. С., Савиных В. П., Тикунова В. С., Хлебниковой Т. А., Чибуничева А. Г., Чекалина В. В., Широковой Т. А. и др. Особенности применения БПЛА для АФС рассмотрены в работах Алябьева А. А., Быкова Л. В., Костюка А. С. и др. Большое внимание вопросам обработки и использования данных, полученных с БПЛА, уделялось на последних конгрессах Международного общества фотограмметрии и дистанционного зондирования (МОФДЗ). Эти вопросы нашли отражение в работах Colomina I., Molina P., Nomainejad N., Arango C., Eling C., Mian O. и др.

Цель и задачи научного исследования. Целью настоящего диссертационного исследования является разработка требований к сбору и обработке данных АФС с БПЛА для моделирования единого геоинформационного пространства территории, обеспечивающего решение задач городского планирования, управления территориями, экологического мониторинга, кадастра недвижимости, строительства, сельского хозяйства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) выполнить анализ состояния вопроса по использованию БПЛА для аэрофотосъемки территорий и перспектив такого применения в целях оперативного решения широкого круга задач в области пространственного развития регионов Российской Федерации;

2) разработать требования к сбору и обработке данных АФС с БПЛА для построения фотограмметрической модели как базового элемента ЕГИП;

3) разработать технологическую схему сбора и обработки данных АФС с использованием БПЛА для моделирования геопространства;

4) выполнить экспериментальные исследования по применению разработанных требований к сбору и обработке данных АФС с использованием современных технических и программных средств;

5) выполнить оценку точности фотограмметрических моделей, созданных по материалам АФС с использованием БПЛА.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются дистанционные методы и средства сбора пространственных данных. Предметом исследования являются требования к сбору и обработке данных АФС с использованием БПЛА для моделирования геопространства.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработаны основные требования к сбору и обработке данных АФС с БПЛА для моделирования геопространства, соблюдение которых позволит использовать созданную модель геопространства в качестве базового элемента для решения научно-практических задач в различных областях экономики Российской Федерации;

– разработана технологическая схема сбора и обработки данных АФС с использованием БПЛА, позволяющая получить фотограмметрическую модель, обеспечивающую необходимую точность и детальность при моделировании геопространства.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что разработаны теоретические основы требований к сбору и обработке данных АФС с использованием БПЛА, обеспечивающие построение модели с заданной точностью и детальностью; получены формулы для расчета параметров АФС с использованием БПЛА; обоснованы требования к выполнению совместной обработки плановых и перспективных снимков, позволяющие значительно повысить визуальную достоверность и точность фотограмметрических моделей, что значительно сокращает затраты времени на формирование пространственных данных в целях моделирования геопространства.

Практическая значимость заключается в том, что разработанные требования к сбору и обработке данных АФС с использованием БПЛА обеспечивают построение фотограмметрических моделей заданной точности и детальности, что позволяет использовать ее в качестве базового элемента ЕГИП, существенно снизить объем полевых работ за счет использования высокоточных фотограмметрических моделей в измерительных целях.

Методология и методы исследования. При выполнении исследований использованы базовые понятия АФС, фотограмметрии, методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, математической обработки геодезических измерений и моделирования. Экспериментальные исследования выполнены с применением БПЛА DJI Phantom 4 и Supercam S350 и современного программного обеспечения Agisoft PhotoScan Professional Edition (версия 1.2.0), разработанного Группой Компаний Геоскан (далее – Agisoft PhotoScan).

Положения, выносимые на защиту:

– требования к расчету параметров АФС с использованием БПЛА для обеспечения точности и детальности фотограмметрических моделей, являющихся исходной основой для моделирования геопространства;

– технологическая схема сбора и обработки данных АФС с использованием БПЛА, результатом которой выступает фотограмметрическая модель, позволяющая с заданной точностью определять метрические характеристики объектов, необходимые для решения задач в области кадастра недвижимости, строительства, территориального планирования, сельского хозяйства, транспорта, экологии и др.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует области исследования: 2 – разработка и исследование технических средств и технологий, фиксирующих в виде изображений различные элементы объектов исследований паспорта научной специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2016–2018 гг., Новосибирск) и на Международной научно-методической конференции «Актуальные вопросы образования. Инновационные подходы в образовании» (23–27 января 2017 г., Новосибирск).

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в десяти научных работах, шесть из которых опубликованы 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 125 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 126 наименований, содержит 9 таблиц, 23 рисунка и 9 приложений.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВА

1.1 Роль геоинформационного обеспечения в цифровой экономике Российской Федерации

В настоящее время возрастает актуальность оперативной поддержки принятия решений одновременно с повышением уровня их научной обоснованности, что приводит к необходимости разработки и внедрения новых методов с использованием современных технических средств.

В условиях становления и развития цифровой экономики Российской Федерации данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности, что повышает конкурентоспособность отечественных технологий и продукции, обеспечивает экономический рост и национальный суверенитет [75].

Одним из направлений реализуемой в настоящее время Программы «Цифровая экономика Российской Федерации» является создание эффективной системы сбора, обработки, хранения и предоставления потребителям пространственных данных, обеспечивающей потребности государства, бизнеса и граждан [75].

Целевым показателем плана мероприятий «АэроНет» Национальной технологической инициативы является покрытие территории Российской Федерации высокоточными трехмерными картами для нужд поддержания и развития инфраструктуры, транспорта, подвижной связи, точного земледелия, кадастра и др., на основе технологий ГЛОНАСС с применением беспилотных авиационных систем (БАС) и цифровой модели Земли [84].

Геоиндустрия в целом представляет собой совокупность системообразующих видов деятельности, направленных:

- на разработку нормативных документов, стандартов и технологий выполнения производственных циклов работ;
- создание, обновление и поддержку функциональности единых геопространственных сетей, систем и баз данных на территорию государств;

- выполнение геопространственных (пространственных) съемок и измерений, мониторинговых наблюдений за изменениями положения исследуемых объектов или их частей в пространстве;
- изготовление геопространственных (пространственных) моделей и продуктов на жестких носителях и в электронной форме;
- разработку, исследование, серийное изготовление и внедрение в производство инструментальных, аппаратных и программных средств сбора, хранения, обработки, предоставления и визуализации геопространственной (пространственной) информации, геопространственных WEB-сервисов;
- интеграцию разнородных геопространственных (пространственных) данных для их последующего многофункционального применения;
- подготовку профессиональных кадров [93].

С развитием информационных технологий наметился переход геопространственной деятельности с уровня информационной функциональности на уровень аналитической функциональности, который базируется на формировании пространственных знаний о территории и интеллектуализации подготовки инновационных геопространственных решений для рационального использования всех видов территориальных ресурсов [13].

Геопространственный подход ориентирован на роль интегрального инструмента для сбора элементов опережающего научного мышления в единую аналитическую систему, направлен на учет взаимодействия факторов и объектов в каждой точке метрического пространства, приобретает функции установления доминирующих и вспомогательных факторов (с возможностью выделения среди вспомогательных факторов таких, которыми можно пренебречь в рамках решаемой исследовательской задачи). Это позволяет спланировать, осуществить и проконтролировать оптимальную организацию территории, обеспечить межотраслевое взаимодействие, выводит геопространственную деятельность на более высокий уровень воздействия на функционирование социально-экономического комплекса территориального образования любого уровня [13].

Рассмотрим основные определения в области геопространства.

Геопространство – географическая оболочка Земли, подлежащая изучению, отображению, моделированию в пределах ограниченной территории, периода времени, объектового состава, перечня и степени подробности его свойств, указанных потребителем геоинформации. Критерием, ограничивающим включение пространств в понятие «географического», является применимость для их изучения и моделирования координатных систем: географических и геодезических [47, 48].

Геопространство – это совокупность находящихся на территории (над, под территорией) географических объектов природного и техногенного характера, природных явлений, техногенных и природных процессов и событий, обладающих интересующими нас пространственными свойствами [49].

Геоинформационное пространство – совокупность информационных координированных компьютерных моделей изучаемого геопространства [47].

Географическое пространство – множество географических объектов и явлений с соотношениями и связями между ними [6].

Пространственные данные, географические данные, геоданные, геопространственные данные – цифровые данные о пространственных объектах, включающие сведения об их местоположении и свойствах, пространственных и непространственных атрибутах [6].

Виртуальная модель – многомерная модель реальных объектов или процессов, во многих отношениях неотличимая от них, но сформированная и интерактивно функционирующая в программно-управляемой среде [6].

Модель геопространства содержит модели предметов и их отношений или, по установившейся терминологии, пространственные объекты. Таким образом, пространственные объекты – это модели пространственных предметов [47].

Территория – часть поверхности земной суши со всеми ее природными, хозяйственными объектами, населением и ресурсами. Территорию характеризуют ее пространственное положение, размеры, структура, другие геометрические (морфометрические) показатели и географические (ландшафтные) особенности [6].

Понятия «пространство» и «территория» взаимосвязаны, но не тождественны друг другу [47]. Не ставя здесь целью выявлять все особенности их, ограничимся тем, что эти понятия включают топографические объекты, процессы и явления природы.

Пространственная информация о территориях создается и используется в двух основных формах: дискретной и аналоговой. В дискретной форме – в виде координат и высот отдельных точек пространства – информацию получают методами геодезии. В последние годы координаты и высоты отдельных точек пространства измеряются спутниковыми методами. Детальное изучение географического пространства осуществляют с использованием средств и методов топографии, фотограмметрии и картографии [7, 8, 46].

До начала 1980-х гг. геодезическую пространственную информацию о территориях потребители получали и использовали в виде каталогов координат и высот точек, а топографическую и картографическую – в графическом виде [47, 48].

Научно-технический прогресс трех последних десятилетий и применение компьютерных технологий привели к созданию, развитию и использованию геоинформационных систем (ГИС). Основной функцией ГИС является пространственный анализ геопространства. Для анализа необходимы модели объектов геопространства, поэтому второй основной функцией геоинформационных систем является моделирование объектов геопространства [67, 68, 104].

Моделирование геопространства позволяет оптимизировать управленческие решения за счет более полного информационного обеспечения – предоставления данных в удобном для анализа, в том числе и автоматизированного, и восприятия виде.

Источниками моделирования геопространства служат картматериалы, материалы аэрофотосъемки, космической съемки, лазерной локации, данные полевых съемок.

В настоящее время цифровые пространственные данные являются элементом связи различных баз данных при моделировании геоинформационного пространства

территорий. Большую часть пространственных данных обеспечивают средства и методы дистанционного зондирования Земли [82, 98, 102, 103, 106–108,114].

В настоящее время становятся все более востребованы цифровые текстурированные модели местности, получаемые в результате фотограмметрической обработки материалов аэрокосмических съемок [28].

Специалистами Госкорпорации «РОСКОСМОС» (Россия) разработана платформа для создания погруженных в виртуальную реальность геоинформационных сервисов Atlas VR (рисунок 1). В рамках платформы рельеф местности воссоздается по данным сканирования поверхности в стереорежиме и с определенной точностью соответствует реальному внешнему виду физической поверхности территории. Сведения о растительности формируются по мультиспектральным данным, получаемым спутниками ДЗЗ. Разработчики Atlas VR предполагают, что платформа может быть использована для размещения проектов планируемых конструкций и сооружений. Виртуальное пространство ATLAS VR позволит не только моделировать объекты, но и создавать в цифровой среде вариативные сценарии развития событий.

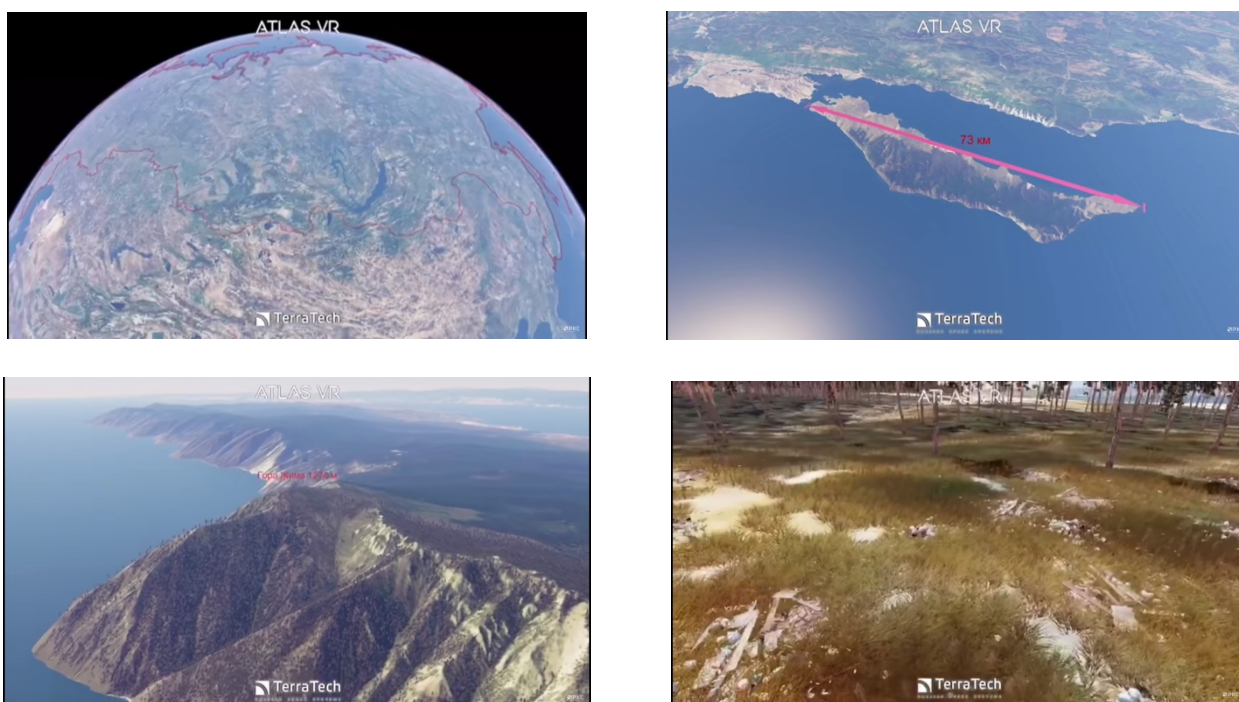


Рисунок 1 – Геоинформационные сервисы Atlas VR

Группа компаний Геоскан (ООО «Геоскан», Россия) в рамках Национальной технологической инициативы [65] запустила общественный проект по созданию трехмерных моделей регионов страны «3D Россия» (рисунок 2), предполагающий сплошную съемку местности с помощью БПЛА. В рамках проекта желающие энтузиасты могут опубликовать трехмерные модели зданий, сооружений, памятников, природных объектов, созданных по материалам наземной съемки или с малой высоты любительскими БПЛА. Модели создаются средствами программы Agisoft PhotoScan и размещаются на геопортале Sputnik Web. Инструменты геопортала позволяют решать измерительные задачи (измерения длины, высоты, площади, объема, построение профилей), строить карты уклонов и ЦМР в виде TIN-моделей.

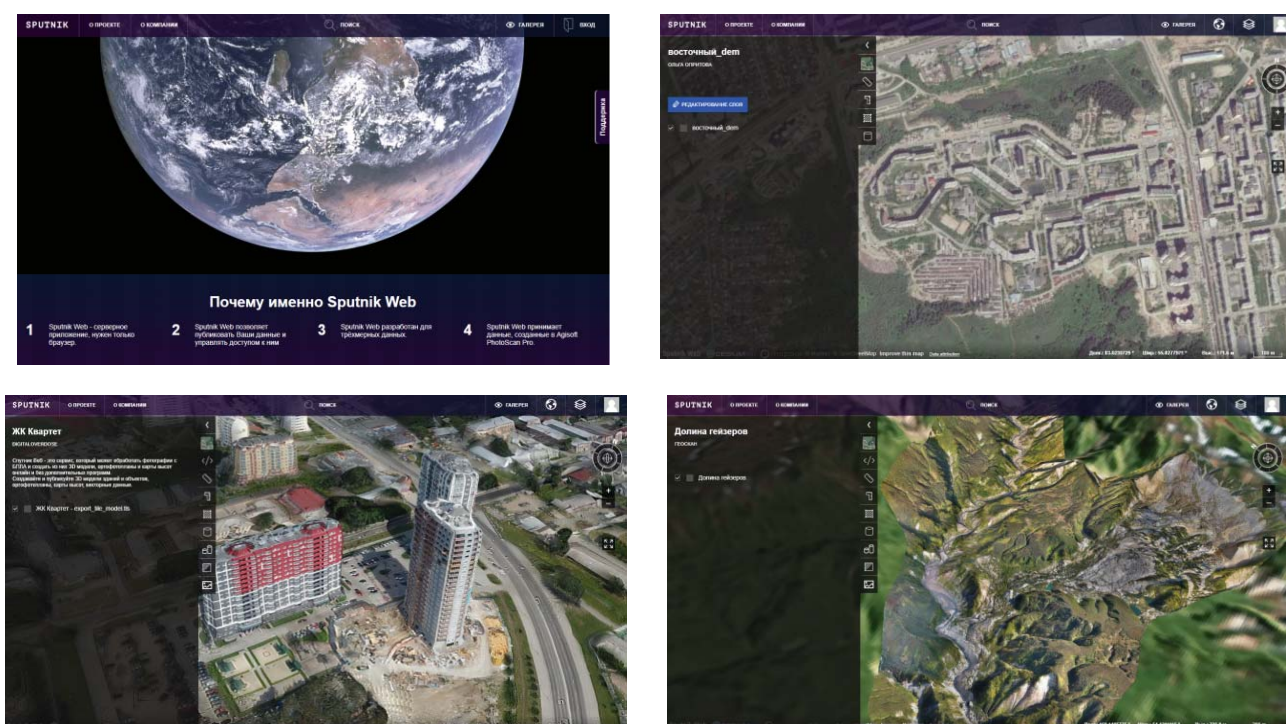


Рисунок 2 – Общественный проект по созданию трехмерных моделей регионов страны «3D Россия»

Большая часть созданных цифровых геопроостранственных моделей представлена векторными и растровыми картами, цифровыми моделями рельефа, тематическими геоизображениями, объемными геоизображениями, картографическими сервисами и сервисами пространственных объектов, прочими статически-

ми и динамическими моделями. Все большее развитие получают методы создания, анализа, прогнозирования и представления территорий в виде многомерных геопространственных моделей [49, 50].

Однако при изучении геопространства по его цифровой модели следует помнить, что любая модель всегда имеет отличия от моделируемого объекта. Это связано, прежде всего, с самим процессом моделирования – точностью исходных данных, алгоритмами обработки, вычисления и отображения. Кроме того, полученная модель геопространства всегда будет соответствовать тому состоянию пространства, которое существовало некоторое время назад – на момент получения исходных данных.

Модель, являющаяся близкой к идеальной цифровой копии окружающей реальности, должна удовлетворять следующим критериям:

- модель должна быть многомерной и отображать состояния и движение материи в реальном пространстве-времени в четырех базовых измерениях: трех измерениях пространства и времени;
- общее число измерений, включая признаковые, в которых реализуется модель, должно стремиться к максимальному числу свойств явлений, существующих в природе (число моделируемых классов и свойств – к существующему в реальности);
- модель должна представлять каждый элементарный объем пространства в каждый элементарный отрезок времени;
- пространственное разрешение модели должно стремиться к максимальному;
- временное разрешение должно стремиться к максимально высокому;
- пространственный охват модели должен стремиться к максимальному;
- временной охват должен стремиться к максимальному;
- точность модели должна стремиться к полной пространственно-временной тождественности;
- достоверность модели должна стремиться к абсолютной [51].

На рисунке 3 представлен перечень основных сфер социально-экономической деятельности, где геоинформационное обеспечение является неотъемлемой частью [47].



Рисунок 3 – Межведомственный характер геоинформационного обеспечения общества

В настоящее время начинается формирование новой регуляторной среды, обеспечивающей благоприятный правовой режим для возникновения и развития современных технологий, а также для осуществления экономической деятельности, связанной с их использованием [73, 75].

1.2 Анализ требований нормативно-технических документов для моделирования геопространства

Нами проанализированы следующие действующие нормативно-технические документы для моделирования геопространства.

1 Федеральный закон от 30.12.2015 № 431–ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [70].

2 Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов (ГКИНП (ГНТА)-02-036-02), утвержденная Федеральной службой геодезии и картографии России в 2002 г. [15].

3 Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съемок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме (ГКИНП (ОНТА)-12-274-03) утвержденное Федеральной службой геодезии и картографии России в 2003 г. [16].

4 Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях (РАФ-89), утвержденное начальником Военно-топографического управления Генерального штаба и начальником Главного штаба Военно-Воздушных Сил в 1989 г. [88].

5 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000, 1 : 500 (ГКИНП-02-033-82) с поправками, утвержденными ГУГК в 1982 г. [18].

6 ГКИНП-02-127-80. Руководство по редактированию топографических крупномасштабных карт и планов [19].

7 ГКИНП-НТА-02-118. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000 и 1 : 500 [21].

8 ГКИНП-09-32-80. Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов [20].

9 ГОСТ Р 52055-2003. Геоинформационное картографирование. Пространственные модели местности. Общие требования [23].

10 ГОСТ 28441–99. Картография цифровая. Термины и определения [22].

11 ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. Термины и определения [24].

12 ГОСТ Р 52439–2005. Модели местности цифровые. Каталог объектов местности. Требования к составу [25].

13 ГОСТ Р 52440–2005. Модели местности цифровые. Общие требования [26].

Федеральным законом от 25.12.2015 № 431 «О геодезии, картографии и пространственных данных» определены следующие понятия:

– пространственные объекты – природные объекты, искусственные и иные объекты (в том числе здания, сооружения), местоположение которых может быть определено, а также естественные небесные тела;

– пространственные данные – данные о пространственных объектах, включающие сведения об их форме, местоположении.

Согласно ГОСТ Р 52438-2005 «Географические информационные системы»:

– пространственный объект (геообъект, геоинформационный объект, географический объект) – это цифровая модель материального или абстрактного объекта реального или виртуального мира с указанием его идентификатора, координатных и атрибутивных данных;

– пространственные данные (геоинформационные данные, геопространственные данные, географические данные, геоданные) – это данные о пространственных объектах и их наборах.

В соответствии с ГОСТ Р 52055-2003 «Пространственные модели местности» пространственная модель местности – это наглядное и измеримое трехмерное изображение земной поверхности на электронных средствах отображения информации, воспроизведенное в соответствии с заданными условиями наблюдения (обзора) на основе цифровой информации о местности (электронных карт, цифровых моделей местности), полученной с географических карт, кадастровых

планов и космоаэрофотографических материалов, рельефных карт и видеоизображений.

В настоящее время картографические методы отображения местности заменяются методами моделирования геопространства.

В данной работе под моделью геопространства нами подразумевается совокупность информационных ресурсов на моделируемую территорию, включающих:

- цифровую модель рельефа (ЦМР);
- цифровую модель местности (ЦММ);
- цифровой ортофотоплан;
- цифровую векторную карту (модель);
- классификатор пространственных объектов и их свойств;
- правила цифрового описания пространственных объектов.

В результате анализа выше перечисленных нормативно-технических документов выявлен ряд проблем, препятствующих эффективному использованию БПЛА для решения задач в сфере геодезии и картографии. Проблемы заключаются в том, что в нормативных документах требования относятся к условиям использования материалов пленочных аэрофотоаппаратов, которые в настоящее время практически не применяются.

В вопросах моделирования требования опираются на создание пространственных моделей местности в основном по картографическим материалам. В связи с этим точность измерения координат и детальность отображаемых элементов моделей зависят от масштаба исходных цифровых или аналоговых топографических карт. Применение цифровых технологий требует иного подхода при формировании требований к исходным данным для создания цифровых моделей местности.

За последние два десятилетия произошли следующие принципиальные изменения в технике и технологии аэрофототопографического производства:

- переход от аналоговой аэрофотосъемки к цифровой;

- использование беспилотных авиационных систем;
- воздушное лазерное сканирование;
- применение космических цифровых изображений высокого разрешения;
- использование высокоточных бортовых систем определения положения и ориентации;
- использование спутниковых методов геодезических определений;
- применение метода точного определения местоположения точки (PPP – Precise Point Positioning);
- цифровые методы фотограмметрической обработки;
- использование ГИС;
- ГИС-средства анализа пространственных данных.

Однако в действующих нормативно-технических документах не отражены требования, учитывающие особенности новых технических средств и технологий сбора и обработки данных.

В таблице 1 приведены отсутствующие в современных нормативных документах требования к сбору и обработке данных цифровой АФС.

Таблица 1 – Требования к сбору и обработке данных цифровой АФС, отсутствующие в современных нормативных документах

Этапы обработки	Отсутствующие требования, параметры
1 Аэрофотосъемочные работы	<ul style="list-style-type: none"> – размер проекции пикселя на местности; – допустимая максимальная высота фотографирования; – максимальный эффективный поперечный угол поля зрения снимка
2 Планово-высотная подготовка материалов аэрофотосъемки	<ul style="list-style-type: none"> – случаи, в которых требуются опорные точки; – случаи, в которых опорные точки не требуются; – количество контрольных точек
3 Фотограмметрическая обработка	<ul style="list-style-type: none"> – система координат и проекция
4 Моделирование геопространства	<ul style="list-style-type: none"> – термины и определения; – состав элементов модели; – математическая основа моделей; – форматы выходных данных

В данном подразделе использованы материалы презентации, представленной ФГБУ «Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» «Проблемы нормативно-технического обеспечения создания пространственных данных по материалам дистанционного зондирования (Н. М. Бабашкин, С. А. Кадничанский, С. С. Нехин, Л. И. Яблонский) на XIII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017».

Таким образом, актуализация нормативно-технических документов будет способствовать эффективному использованию современных технических и программных средств для формирования единого геоинформационного пространства в рамках реализации программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

1.3 Технические и программные средства сбора и обработки данных для моделирования геопространства территорий

Для создания моделей геопространства в настоящее время используют данные, получаемые в основном следующими методами:

- геодезическими (полевыми) или с помощью систем глобального позиционирования GPS, ГЛОНАСС;
- картографическими (векторизация, растеризация топографических, тематических, специальных и т. п. карт);
- дистанционного зондирования Земли.

Геодезический метод предусматривает полевой сбор информации об объектах непосредственно на местности. Полевая съемка на местности определяет истинное горизонтальное или вертикальное положение объектов. При этом способе сбора информации осуществляют измерения углов и расстояний.

Для съемки используют специальные геодезические инструменты (теодолиты, нивелиры и др.). По завершении полевых работ данные фиксируются либо в специальных полевых журналах, либо на устройствах автоматизированной регистрации в закодированном виде.

Эта информация называется исходной и требует первичной обработки и унификации [91].

Картографический метод основан на сканировании диапозитивов постоянного хранения или тиражных оттисков топографических карт (планов) и их последующей векторизации, т. е. создании цифровых топографических карт (планов) [37].

Понятие «картографическая модель» согласно действующим нормативным документам считается тождественным понятию «цифровая модель» и определяется как «логико-математическое представление в цифровой форме объектов картографирования и отношений между ними». Содержание такой модели должно соответствовать содержанию карты определенного вида и масштаба.

В основе дистанционного зондирования Земли лежит способность физических тел (земной поверхности) отражать и испускать электромагнитное излучение, отдельные диапазоны которого регистрируются приемниками электромагнитного излучения, расположенными на авиационных или космических носителях.

Системы получения и распространения данных ДЗЗ включают в себя:

- носители съемочной аппаратуры;
- аппаратуру дистанционного зондирования;
- бортовые средства передачи данных на Землю по радиоканалу;
- наземные комплексы приема информации, ее обработки и предоставления потребителям.

Обработка материалов дистанционного зондирования Земли выполняется на цифровых фотограмметрических системах.

Результатом обработки данных, полученных перечисленными выше методами, являются цифровые карты (планы), ортофотопланы, цифровые модели местности, рельефа и др. Эти продукты являются составными элементами единого геопространства [63, 64, 66–68, 105, 118].

Благодаря геоинформационным технологиям цифровые модели местности стали инструментом пространственного анализа, предоставляющим широкие воз-

возможности в области исследования и выявления взаимосвязей и закономерностей [72, 74, 77, 78, 118].

В последнее десятилетие с развитием микроэлектроники, робототехники, искусственного интеллекта (машинное зрение), облачных технологий активно развивается производство малогабаритных и несложных в управлении БПЛА, которые успешно используются для выполнения АФС [41, 83, 84].

Наиболее удачным, по нашему мнению, является следующее определение. БПЛА – летательный аппарат многоразового или условно-многоразового использования, не имеющий на борту экипажа (человека-пилота) и способный самостоятельно целенаправленно перемещаться в воздухе для выполнения различных функций в автономном режиме (с помощью собственной управляющей программы) или посредством дистанционного управления (осуществляемого человеком-оператором со стационарного или мобильного пульта управления).

К БПЛА не относятся все ракеты, снаряды, бомбы (независимо от того, управляемые они или нет), аэростаты без двигателей и другие безмоторные летательные аппараты: планеры, дельтапланы, парaplаны. Но беспилотные дирижабли, моторные дельтапланы и парaplаны в соответствии с данным определением вполне можно отнести к БПЛА.

В настоящее время в мировой практике нет устоявшейся классификации БПЛА. В ряде российских источников приводится универсальная классификация БПЛА в зависимости от взлетной массы и дальности действия (таблица 2).

Предпосылками применения БПЛА для аэрофотосъемки можно считать недостатки двух традиционных способов получения данных с помощью космических спутников и воздушных пилотируемых аппаратов [39]. Данные спутниковой съемки позволяют получить снимки с пространственным разрешением от 0,2 до 0,4 м, что недостаточно для инженерно-топографических планов и детального моделирования пространственных объектов. Кроме того, не всегда удается подобрать безоблачные снимки из архива. В случае съемки под заказ теряется оперативность получения данных.

Таблица 2 – Российская универсальная классификация БПЛА

Класс БПЛА	Взлетная масса, кг	Дальность действия, км
1 Микро- и мини-БПЛА ближнего радиуса действия	до 5	до 25–40
2 Легкие БПЛА малого радиуса действия	5– 50	10–70
3 Легкие БПЛА среднего радиуса действия	50–100	70–150 (250)
4 Средние БПЛА	100–300	150–1000
5 Средне-тяжелые БПЛА	300–500	70–300
6 Тяжелые БПЛА среднего радиуса действия	более 500	70–300
7 Тяжелые БПЛА большой продолжительности полета	более 1 500	около 1 500
8 Беспилотные боевые самолеты	более 500	около 1 500

Традиционная аэрофотосъемка, которая проводится с помощью самолетов (Ту-134, Ан-2, Ан-30, Ил-18, Cessna, L-410) или вертолетов (Ми-8Т, Ка-26, AS-350), требует больших экономических затрат на обслуживание и заправку, что приводит к повышению стоимости конечной продукции.

Применение стандартных авиационных комплексов нерентабельно в следующих случаях:

- съемка небольших объектов и малых по площади территорий. В этом случае экономические и временные затраты на организацию работ, приходящиеся на единицу отснятой площади, существенно превосходят аналогичные показатели при съемке больших площадей (тем более для объектов, значительно удаленных от аэродрома);

- при необходимости проведения регулярной съемки в целях мониторинга протяженных объектов: трубопроводы, линии электропередачи, транспортные магистрали.

Росту количества разработок БПЛА в последнее десятилетие способствовали объективные предпосылки, связанные с технологическими успехами, такими как:

- появление новых легких и прочных материалов, особенно композитных;

- быстрое развитие микроэлектронной компонентной базы: микроконтроллеров, микросистемных навигационных датчиков, приемопередатчиков радиосигналов, различных СВЧ-устройств, микроэлектронных драйверов сильноточных потребителей, миниатюрных видеокамер и т. д.;
- появление и быстрое развитие высокоэффективных возобновляемых источников питания (на основе литий-полимерных аккумуляторов, топливных элементов и др.);
- разработки в области высокоресурсных бесколлекторных электродвигателей, а также реактивных и поршневых двигателей;
- развитие спутниковых систем глобального позиционирования;
- общее развитие вычислительной техники, включая появление специальных операционных систем, интерфейсов, математического и алгоритмического обеспечения.

Разработками в области беспилотной авиационной техники занимаются в разных странах как крупные фирмы, так и небольшие специализированные предприятия, подразделения университетов и даже отдельные энтузиасты-любители [5].

Достоинствами применения БПЛА в целях картографирования территорий по сравнению со стандартными авиационными комплексами являются:

- рентабельность;
- возможность съемки с небольших высот и вблизи объектов;
- получение снимков высокого разрешения;
- оперативность получения снимков;
- возможность применения в зонах чрезвычайных ситуаций без риска для жизни и здоровья пилотов.

Беспилотный летательный аппарат в совокупности с инфраструктурой и средствами обеспечения (транспортно-пусковое устройство, средства связи, наземный пункт управления и др.) образуют беспилотную авиационную систему.

БПЛА целесообразно применять при создании детальной модели геопространства и крупномасштабных топографических планов.

Для выполнения аэрофотосъемочных работ в целях моделирования геопространства БПЛА должны обладать следующими конструктивными особенностями:

- тип конструкции: самолетного или вертолетного типа;
- способ управления: автоматический или полуавтоматический;
- полезная нагрузка: откалиброванная цифровая автоматическая фотокамера (возможно в качестве дополнения видеокамера, тепловизор и инфракрасная (ИК) камера);
- автопилот, способный выдерживать параметры съемки: маршрут, углы наклона камеры, процент продольного и поперечного перекрытия, высоту и т. д.;
- способность выполнения полетов на малых высотах.

В литературных источниках встречаются описания применения БПЛА и фотограмметрических методов обработки материалов аэрофотосъемки для решения отдельных частных задач, таких как построение текстурированных моделей памятников архитектуры, определение объемов выработки твердых пород, определение состояния сельскохозяйственных культур и древесной растительности, определения численности животных определенного вида [1, 14, 30, 40, 60, 71, 86, 87, 90, 92, 94, 96, 109–111, 117, 121–125]. Однако единая методика, описывающая все этапы формирования модели геопространства, – от выбора БПЛА и съемочной аппаратуры до разработки требований по формированию метрического и семантического описания объектов геопространства – на сегодняшний день отсутствует. Нормативно-технические документы, регламентирующие выполнение аэрофотосъемочных работ, разработаны в 1980-х гг. Это указывает на необходимость разработки требований к сбору и обработке данных АФС, полученных с БПЛА, для моделирования геопространства.

Несмотря на недостатки нормативного регулирования в части применения БПЛА, отмечается положительный опыт использования этого технологического оборудования. Так, при осуществлении картографирования полуострова Крым в 2017 г. Акционерное общество «Роскартография» при выполнении государственного контракта по заказу Федеральной службы государственной регистрации,

кадастра и картографии в числе прочих использовало беспилотные средства, которые отлично зарекомендовали себя с точки зрения удобства, точности и экономичности.

На основе обзора отечественных и зарубежных публикаций установлено, что моделирование геопространства небольших территорий в современных условиях наиболее эффективно выполняется с применением БПЛА и цифровых фотограмметрических систем, которые позволяют в короткие сроки (в течение 1-2 дней) получить исходную основу для крупномасштабного картографирования, решения маркшейдерских, кадастровых и других задач в виде фотограмметрических моделей, по точности и детальности отвечающих требованиям нормативно-технических документов, благодаря автоматизации наиболее трудоемких процессов, таких как взаимное ориентирование, пространственная фототриангуляция, построение цифровой модели рельефа.

При большом количестве достоинств беспилотной съемки получаемые данные имеют недостатки, которые создают проблемы при фотограмметрической обработке:

- низкое качество изображений;
- невысокая точность бортовых данных GPS / IMU;
- использование бытовых некалиброванных фотокамер;
- ошибки, связанные с нестабильностью полета.

Указанные недостатки материалов АФС с БПЛА требуют от цифровых фотограмметрических систем дополнительных функциональных возможностей, позволяющих минимизировать указанные недостатки и получать качественные выходные результаты [56].

В настоящее время из числа отечественных цифровых фотограмметрических систем для обработки, в том числе материалов аэрофотосъемки с БПЛА, наиболее известны PHOTOMOD и Agisoft PhotoScan.

Цифровая фотограмметрическая система (ЦФС) PHOTOMOD (Компания Ракурс, г. Москва) осуществляет полный комплекс задач от сбора данных для по-

строения сетей фототриангуляции до создания цифровых моделей рельефа и метрических трехмерных моделей [126]. С помощью данной ЦФС возможно получение пространственной информации по материалам различных съемочных систем, таких как кадровые цифровые и пленочные камеры, космические сканирующие системы, а также радары с синтезированной апертурой.

Перечень задач, решаемых с использованием этой цифровой фотограмметрической системы, обширен; их выбор зависит от потребностей конкретной производственной организации. Программное обеспечение PHOTOMOD рассчитано на операционную среду Microsoft Windows. В системе реализованы следующие основные возможности [126]:

- предварительная подготовка исходных снимков;
- внутреннее ориентирование снимков;
- взаимное ориентирование снимков;
- ввод и измерение координат опорных точек;
- внешнее ориентирование снимков;
- моновекторизация;
- стереовекторизация;
- построение ЦМР;
- создание ортофотоплана;
- создание цифровой карты местности;
- построение трехмерной модели городской застройки.

Программное обеспечение Agisoft PhotoScan (Группа компаний Геоскан, Россия) может функционировать в операционных системах Windows XP или более поздних [120].

Программа Agisoft PhotoScan в значительной степени ориентирована на автоматизацию процесса обработки данных, что имеет существенное значение для оперативного получения топографической информации.

Принцип работы автоматической фотограмметрической обработки заключается в следующем. Информация о каждом фотоснимке записывается в EXIF-файл (ко-

ординаты, высота центра фотоснимка, углы поворота камеры). Программа использует технологии машинного зрения и фотограмметрической обработки для определения общих точек на нескольких фотоснимках. С учетом данных EXIF-файлов каждому пикселю определяется соответствующий пиксель на других фотоснимках. При нахождении соответственных точек на трех и более снимках вычисляются координаты и высота точки в пространстве. Разработчики таких программ рекомендуют перекрытие фотоснимков от 60 до 80 %.

Для создания цифровых трехмерных моделей объектов программа Agisoft PhotoScan позволяет использовать фотоснимки, полученные различными цифровыми фотокамерами с разных ракурсов (при условии, что каждый элемент объекта создаваемой модели был изображен по крайней мере с двух позиций съемки) [27, 109, 120].

Особенностью данного программного продукта является то, что обработка снимков в целях топографического обеспечения включает ряд последовательно выполняемых операций, часть которых реализуется современными методами машинного зрения и базируется на использовании аппарата проективной геометрии, однородных координат и фотометрической обработки изображений [40]:

- выбор и отождествление на снимках соответственных точек;
- построение фотограмметрических моделей;
- уравнивание координат точек сети;
- построение цифровых моделей рельефа и текстурированных моделей местности.

В качестве признака особых точек снимков принимаются экстремумы яркости снимка. После выбора и отождествления на снимках соответственных точек дальнейшая обработка осуществляется классическими фотограмметрическими методами.

Результаты обработки данных каждого этапа используются на последующих этапах, а также могут быть экспортированы в обменный формат данных для использования во внешних программах.

Технологии, использующие программы автоматической фотограмметрической обработки, позволяют получать цифровые ортофотопланы, модели местности, рельефа, 3D-модели. На открытых участках местности точность полученных данных по технологии автоматической фотограмметрической обработке сопоставима с лазерным сканированием [126].

Разработчиками Компании Agisoft также предложен геоинформационный интернет-сервис ГИС Спутник.

Геоинформационный сервис ГИС Спутник – это система визуализации многомерных геопространственных данных, подготовленных средствами Agisoft PhotoScan, в режиме реального времени. Система позволяет выполнять измерительные операции: измерение длин, высот, объемов, разностей объемов. ГИС Спутник позволяет загружать и отображать данные в едином геоинформационном пространстве. Поддержка протокола WMS дает возможность подключать данные с OGC-совместимых серверов.

В результате фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки современными программными средствами получают стереомодели, цифровые модели поверхности и ортофотопланы, которые служат источником для последующей векторизации и формирования пространственных данных на территорию съемки [9–11, 38].

Использование стереомоделей позволяет определять пространственные координаты любой точки объекта съемки. Однако для работы со стереомоделями необходимо иметь специализированное программно-аппаратное обеспечение и обладать достаточной остротой стереозрения.

Ортофотопланы представляют собой сплошное изображение участка местности, могут быть загружены в распространенные геоинформационные системы и позволяют определить плановые координаты видимых частей объектов съемки. Однако при работе с ортофотопланами у оператора нет возможности изменить ракурс и получить информацию о взаимном пространственном расположении конструктивных элементов объекта съемки.

Современные программные средства позволяют использовать точечные цифровые модели поверхности для получения пространственных данных в качестве альтернативы стереомоделям. При этом точность определения пространственных данных не зависит от остроты стереозрения оператора.

Точечные цифровые модели поверхности обладают следующими достоинствами:

- нет необходимости использовать специализированное фотограмметрическое программно-аппаратное обеспечение;
- точность определения пространственных координат объектов не зависит от остроты стереозрения оператора;
- есть возможность изменить ракурс наблюдения;
- модели содержат информацию о вертикальных и наклонных элементах объекта съемки.

Поэтому наиболее удобными, по нашему мнению, для определения пространственных данных и формирования моделей объектов являются фотограмметрические модели в виде точечных цифровых моделей поверхности.

В качестве инструмента для последующего моделирования геопространства на основе фотограмметрических моделей в настоящее время наиболее перспективной представляется ГИС «Панорама» (АО КБ «Панорама», г. Москва) – универсальная геоинформационная система, имеющая средства создания и редактирования цифровых карт и планов городов, обработки данных ДЗЗ, выполнения различных измерений и расчетов, оверлейных операций, построения 3D-моделей, обработки растровых данных, средства подготовки графических документов в цифровом и печатном виде, инструментальные средства для работы с базами данных [12].

Трехмерная модель местности в ГИС «Панорама» представляет собой поверхность, построенную с учетом рельефа местности, на которую может быть наложено изображение векторной, растровой или матричной карты и расположенные на ней трехмерные объекты, соответствующие объектам двухмерной карты. Она является полноценной трехмерной картой, которая позволяет выбирать объ-

екты на модели, просматривать и редактировать информацию об объекте, редактировать их внешний вид.

Для построения трехмерной модели геопространства в ГИС «Панорама» используются: векторная карта, матрица высот, триангуляционная модель рельефа (TIN-модель), классификатор карты, библиотека трехмерных изображений объектов, цифровые фотоснимки местности и цифровые фотографии объектов местности. Состав исходных данных зависит от вида создаваемой модели.

Для создания трехмерной модели достаточно иметь двухмерную карту и матрицу высот. По этим данным строится трехмерная модель рельефа выбранного участка местности. Для построения объемной модели с учетом объектов, расположенных на данной карте, разрабатывается библиотека трехмерных изображений объектов, которая является частью классификатора карты [12].

Преимуществом ГИС «Панорама» является то, что система используется для создания государственных цифровых топографических карт. Возможности ГИС «Панорама» позволяют формировать 3D-отображение 2D-объектов в зависимости от кода классификатора и семантических характеристик. Таким образом, результатом обработки данных, полученных с БПЛА, являются два продукта – цифровая топографическая карта (или план) и 3D-модель геопространства. Причем внесение изменений в цифровую топографическую карту (или план) без дополнительной обработки отражается в 3D-модели геопространства (рисунок 4).



Рисунок 4 – Изображение фрагментов 3D-модели геопространства

Выводы по первому разделу

В результате исследований установлено, что действующие нормативно-технические документы по формированию пространственных данных, выполнению аэрофотосъемочных работ, фотограмметрической обработке данных требуют существенной доработки в части терминологии, применения современных средств съемки, технологий обработки цифровых данных, создания и использования новых геоинформационных продуктов. Необходимы актуальные решения для создания модели геопространства.

К настоящему времени развитие беспилотной авиационной техники достигло уровня, при котором стало возможным создание и использование высокоэффективных, многофункциональных беспилотных летательных аппаратов.

Использование БПЛА в качестве аэросъемочной платформы имеет большие перспективы при съемке небольших по протяженности площадных объектов и при съемке линейных объектов. Данные с БПЛА позволяют получать качественные картографические материалы (пространственные данные).

В связи с тем, что структура цифровой модели геопространства существенно отличается от структуры традиционных цифровых карт, в применяемых в настоящее время методиках формирования геопространственных данных имеется ряд нерешенных вопросов, связанных с требованиями к сбору и обработке данных АФС с БПЛА, в зависимости от требуемой точности и детальности, а также с оценкой точности полученных пространственных данных.

2 РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К СБОРУ И ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВА

2.1 Требования, предъявляемые к моделям геопространства

Модели геопространства, являющиеся основой единого геоинформационного пространства и инфраструктурным элементом цифровой экономики [75], должны обеспечивать выполнение пространственного анализа и формирование новых данных в виде характеристик, оценочных показателей территории и вариантов научно обоснованных управленческих решений, что требует новых методов моделирования с использованием современных технических средств.

В этой связи требования к сбору данных АФС необходимо формировать с учетом требований, предъявляемым к моделям геопространства. В настоящее время нормативно-техническими документами к моделям местности, представляющими собой основу моделей геопространства, предъявляются следующие требования [23, 25]:

- возможность наглядного представления трехмерного образа местности с топологическими связями и характеристиками в зависимости от времени суток, года и обстановки на экранах индивидуального и коллективного пользования;
- возможность наглядного зрительного восприятия рельефа, пространственных форм, размеров и положения наземных и подземных объектов местности, коммуникаций;
- читаемость и распознаваемость элементов и объектов местности;
- многоплановость изображения элементов и объектов местности;
- измеримость изображения;
- возможность визуальной оценки взаимного пространственного расположения объектов.

Математическая основа модели местности должна обеспечивать:

- визуализацию пространственного изображения участка местности с отображением форм рельефа и объектового состава из любой произвольно выбранной пользователем точки;
- возможность изменения ракурса наблюдения отображаемого района из одной точки;
- пошаговое моделирование изображения (перемещение точки наблюдения отображаемого района по задаваемой пользователем в пространстве траектории);
- изменение масштаба отображаемой модели местности.

Точность моделей местности характеризуется совместным влиянием погрешностей исходных данных и ошибок, возникающих в процессе обработки, а также зависит от качественных показателей технических характеристик средств визуализации.

Указанные погрешности в свою очередь являются функциями ошибок, зависящих от следующих наиболее значимых факторов:

- проекции и масштаба, используемых для отображения участка модели местности;
- корректности и качества математического аппарата и алгоритмического обеспечения, применяемых в процессе вычислений;
- параметров местоположения пункта наблюдения;
- степени удаленности объектов от переднего плана модели местности;
- точности аппроксимирования объектов при их визуализации;
- размеров рабочего поля экрана видеоустройства;
- размерности пикселя экрана видеоустройства [23, 25].

2.2 Сопоставление методов получения и обработки снимков

При выполнении аэрофотосъемки для целей создания и обновления цифровых топографических карт (планов), цифровых моделей местности и рельефа в соответствии с [88] для каждого аэрофотосъемочного участка рассчитываются:

- высота аэрофотосъемки над средней плоскостью;
- высота средней плоскости аэрофотосъемочного участка;
- превышение средней плоскости аэрофотосъемочного участка над уровнем аэродрома базирования;
- высота аэрофотосъемки относительно высоты аэродрома базирования;
- наибольшее превышение точек местности над средней плоскостью;
- базис аэрофотосъемки;
- расстояние между соседними аэрофотосъемочными маршрутами;
- число аэрофотосъемочных маршрутов на трапецию;
- число аэрофотоснимков в маршруте и на трапецию;
- вертикальный базисный угол;
- вертикальный угол визирования на трассу соседнего маршрута;
- летное время, необходимое для выполнения задания;
- число катушек аэрофотоплёнки, необходимое для выполнения задания;
- максимальная путевая скорость самолета при выполнении аэрофотосъемки.

Формулы для расчета перечисленных параметров известны из нормативной и технической литературы [58, 59, 88]. Приведем основные из них.

1 Высота аэрофотосъемки H над средней плоскостью

$$H = m \cdot f_k,$$

где m – знаменатель масштаба аэрофотографирования;

f_k – фокусное расстояние аэрофотоаппарата.

2 Высота средней плоскости аэрофотосъемочного участка

$$A_{\text{cp}} = \frac{A_{\text{min}} + A_{\text{max}}}{2},$$

где A_{min} – абсолютная минимальная высота точек местности, взятая с карты;

A_{max} – абсолютная максимальная высота точек местности, взятая с карты.

3 Расчетные продольное и поперечное перекрытия (для средней плоскости фотографирования) при аэрофотосъемке горной местности

$$p' = p + \frac{h}{H - h} (100 - p),$$

$$q' = q + \frac{h}{H - h} (100 - q),$$

где p – заданное продольное перекрытие аэрофотоснимков;

q – заданное поперечное перекрытие аэрофотоснимков.

4 Базис аэрофотосъемки

$$B = \frac{m \cdot l}{100} (100 - p),$$

где l – размер аэрофотоснимка по стороне.

5 Расстояние между соседними аэрофотосъемочными маршрутами

$$D = \frac{m \cdot l}{100} (100 - q).$$

6 Максимальная путевая скорость самолета $W_{\text{доп}}$, при которой обеспечивается получение аэрофоснимков с допустимым остаточным сдвигом δ оптического изображения при времени экспозиции τ

$$W_{\text{доп}} = \frac{\delta \cdot m}{278 \tau}.$$

Согласно требованиям [20, 88, 89] носитель аэрофотосъемочной аппаратуры должен предельно точно следовать проектному положению маршрутов аэрофотосъемки, выдерживать заданный эшелон (высоту фотографирования), обеспечивать требования по соблюдению предельных отклонений по углам ориентирования фотокамеры.

В последнее время изменились технические средства получения данных, алгоритмы и методы обработки, необходимые для построения моделей местности. За последнее время модели местности перешли из разряда удобных для визуализации пространственных моделей в цифровой продукт для решения инженерных задач, позволяющий измерять с заданной точностью координаты объектов пространственной модели на плоском экране [9–11, 33–36, 57, 66–68, 80, 99–101, 115, 119].

Этому способствовало:

- появление и развитие методов съемки с беспилотных летательных аппаратов цифровыми камерами различного типа (как метрическими, так и неметрическими);
- разработка алгоритмов автоматического построения фотограмметрических моделей местности по перекрывающимся снимкам;
- развитие методов лазерной съемки и алгоритмов обработки данных;
- развитие космических съемочных систем высокого и сверхвысокого разрешения.

Аэрофотосъемка с БПЛА имеет определенные особенности. Полет БПЛА, как правило, производится с крейсерской скоростью от 70 до 110 км/ч на высоте до 1 500 м. Полет БПЛА не устойчив, на него влияют порывы ветра, турбулентность и другие возмущающие факторы. Практический опыт ряда авторов показал, что съемки с БПЛА следует выполнять с перекрытием вдоль маршрутов около 80 %, а между маршрутами – около 40 %. Это позволяет исключить разрывы при формировании фототриангуляционных блоков снимков [52, 53, 92].

Съемка цифровой камерой для решения фотограмметрических задач не налагает столь строгих требований к параметрам камеры, как съемка аэрофотоаппаратом на пленку. Это вызвано следующим:

- цифровое изображение хорошо поддается исправлению программными средствами без существенной потери качества;
- для устранения геометрических искажений можно выполнить калибровку камеры.

Однако цифровые камеры, используемые в настоящее время для съемки с БПЛА, имеют ряд недостатков. Прежде всего, это геометрические искажения, вызванные в основном дисторсией объектива, неровностью поверхности ПЗС-матрицы, не идеальной установкой ПЗС-матрицы по отношению к главному лучу.

В большинстве случаев на БПЛА устанавливаются неметрические камеры [31, 69].

В настоящее время в неметрических камерах применяются электронные, центральные и шторно-щелевые затворы. Электронные затворы, как правило, используются в камерах компактного класса, не позволяющих получать снимки с высоким фотографическим качеством. Центральный затвор для неметрических камер реализуется в небольшом количестве моделей компактного класса. Большинство профессиональных и полупрофессиональных камер с матрицей большого размера оснащаются шторно-щелевыми затворами.

Для аэрофотосъемки с БПЛА оптимальным вариантом является использование цифровых неметрических камер с центральным затвором. Такие затворы обеспечивают одновременное экспонирование всего поля снимка. Однако затворы такого типа при движении носителя вносят смаз изображения. Интенсивность смаза зависит от выдержки, высоты фотографирования и скорости движения БПЛА. Влияние смаза должно учитываться при фотограмметрической обработке материалов аэрофотосъемки.

Наибольшее распространение из-за оптимального критерия «цена – качество» получили неметрические зеркальные и гибридные беззеркальные камеры, од-

ной из конструктивных особенностей которых является шторно-щелевой затвор. Стабильность его работы играет большую роль в формировании изображения. Вследствие того, что изображение при работе такого затвора формируется не одномоментно, как с применением центральных затворов, а последовательно за счет движения щели, в момент фотографирования при движении носителя происходит нарушение ортоскопии изображения [87].

Качество продукции, получаемой в результате фотограмметрической обработки цифровых снимков, во многом определяется геометрическими свойствами используемых цифровых фотокамер [2, 3, 55, 62].

По размеру матрицы цифровые камеры разделяются на крупноформатные, среднеформатные и малоформатные. Каждая группа предназначена для решения определенной группы задач. Крупноформатные – для съемки обширных территорий в несколько сотен и тысяч квадратных километров, среднеформатные – для съемки некрупных населенных пунктов, линейных сооружений (линий электропередачи, трубопроводов, автодорог). Малоформатные камеры используются для съемки отдельных объектов местности (карьеров, промышленных площадок и пр.) и, как правило, устанавливаются на беспилотных летательных аппаратах [4].

Каждая цифровая аэрофотокамера имеет свои специфические характеристики. Это размер матрицы выходного изображения, фокусное расстояние аэрофотокамеры, размер пикселя светочувствительной матрицы, продольный и поперечный углы поля зрения. Все параметры связаны между собой и влияют на эффективность аэрофотосъемки [62, 116]. Для решения конкретных задач в определенных условиях необходим обоснованный выбор значений этих параметров. На выбор оптимальных значений параметров аэрофотосъемки влияют: масштаб создаваемого плана (ортофотоплана) или карты; характер местности; требуемая точность съемки рельефа; ограничения, связанные с использованием того или иного воздушного судна, например максимальная высота полета [43, 44].

Аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов имеет ряд особенностей: превышение допустимых углов наклона снимков, несоблюдение прямо-

линейности траектории полета для обеспечения необходимого перекрытия между снимками, высокая частота фотографирования и, как следствие, избыток кадров [52, 53].

Цифровые аэрофотокамеры, устанавливаемые на БПЛА, имеют свои специфические характеристики:

- размер матрицы выходного изображения;
- фокусное расстояние аэрофотокамеры;
- размер пикселя светочувствительной матрицы;
- продольный и поперечный углы поля зрения.

Все параметры связаны между собой и влияют на эффективность АФС. Для решения конкретных задач в определенных условиях необходим обоснованный выбор значений этих параметров [85].

2.3 Расчет параметров аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов

При проектировании работ [61] по созданию модели геопространства необходимо выполнить выбор следующих параметров – высоты фотографирования и фокусного расстояния аэрофотокамеры. Но так как на практике выбор вариантов фокусного расстояния ограничен определенным набором имеющегося в распоряжении оборудования, задача сводится к расчету высоты фотографирования при использовании конкретной аэрофотокамеры с определенным фокусным расстоянием объектива [43, 44].

В данном подразделе предложен расчет пространственного разрешения снимков цифровой камеры, установленной на БПЛА, и расчет высоты фотографирования для обеспечения требуемой точности и детальности построения модели геопространства.

При выборе пространственного разрешения цифровых аэрофотоснимков в целях фотограмметрических построений рассмотрим известные особенности передачи непрерывного аналогового сигнала в цифровую форму, визуального

восприятия изображения и требования действующих нормативно-технических документов в части сканирования аналоговых снимков.

Проблема дискретизации сигналов с ограниченным спектром освещена в литературе (теорема Котельникова – Найквиста – Шенона или теорема отсчетов). Теорема отсчетов (выборки, *sampling theorem*) теории сигналов широко применяется в радиотехнике, радиофизике, оптике и в других научно-технических областях. Ее значение особенно возросло в последние два десятилетия в связи с компьютеризацией и с переходом всей радиоэлектроники на цифровые технологии.

Существует целый ряд теорем отсчетов для различных классов сигналов. По существу содержания эти теоремы следует называть теоремами дискретизации, так как они выясняют математические условия, при которых сигналы данного класса могут быть однозначно восстановлены по своим мгновенным значениям в бесконечном множестве моментов времени.

Для преобразования непрерывного аналогового сигнала в цифровую форму его разделяют на части, соответствующие равным интервалам дискретизации. Сигнал в пределах каждого интервала описывается средним значением его интенсивности [32].

Идея теоремы Котельникова заключается в том, что непрерывный сигнал с ограниченным спектром можно абсолютно точно представить набором его отдельных отсчетов, следующих с равными интервалами, при условии, что частота их следования, как минимум, вдвое превышает верхнюю границу спектра указанного сигнала [54].

Требования, сформулированного теоремой Котельникова, лишь теоретически достаточно для восстановления сигнала по оптимальному правилу и лишь применительно к идеализированному сигналу, который в природе не встречается. Во-первых, конечный спектр может характеризовать лишь бесконечный во времени сигнал. Во-вторых, само значение отсчетов должно быть взято с наивысшей точностью. В-третьих, на практике невозможна ситуация, чтобы при некоторой частоте квантования сигнал можно восстановить идеально, а при частоте на любую сколь угодно малую величину больше эта задача была неразрешимой [32].

В статье Котельникова В. А. [54] приведены особенности передачи изображений с определенными заранее известными полутенями. К таким передачам нельзя прямо применять выведенные теоремы. Для этих передач можно сократить необходимый диапазон частот во сколько угодно раз. Процедура восстановления исходного сигнала по его отсчетам никогда не бывает оптимальной. Поэтому на практике используют заведомо большую частоту квантования по времени.

Однако с уменьшением интервала существенно возрастают сложность и объем обрабатываемой аппаратуры.

Применительно к цифровой съемке можно утверждать, что размер наименьшего элемента изображения на местности должен быть не менее чем в два раза меньше требуемой погрешности измерения координат точек объекта.

Задача численной оценки различения объектов, наблюдаемых с применением оптико-электронных средств, впервые была решена Джонсоном (John Johnson) в 1958 г. В ходе экспериментов были определены значения разрешения, необходимые для опознавания изображений объектов, наблюдаемых с применением приборов ночного видения на основе электронно-оптических преобразователей. Выбранным четырем уровням восприятия в порядке повышения информативности – обнаружение, ориентация, распознавание, идентификация – поставлены минимально необходимые значения, указанные в парах линий, укладываемых на наименьший размер цели.

Этот критерий также применяется для оптико-электронных средств с выходным видеосигналом – видео- и фотокамер, тепловизоров, с тем отличием, что вместо пар линий штриховой миры значения указываются в телевизионных линиях (ТВЛ) или, что то же самое, в элементах изображения (пикселях). Пара линий штриховой миры в экспериментах Джонсона, как мера наименьшего различимого пространственного периода, равна двум телевизионным линиям и соответствующие значения уровней разрешения будут иметь значения 2,0; 2,8; 8,0; 12,8 ТВЛ соответственно [95].

Джонсон в своей работе выделил четыре уровня различения – обнаружение, ориентация, распознавание, идентификация (таблица 3).

Таблица 3 – Определение уровней различения

Уровень различения	Описание
Обнаружение	Объект присутствует
Ориентация	Различается симметричность или асимметричность объекта и его ориентация
Распознавание	Определяется класс объекта
Идентификация	Объект может быть описан в рамках знаний наблюдателя

Согласно критерию Джонсона, начальный уровень информативности изображения, при котором зрительная система реализует первую стадию восприятия, характеризуется для различения точечных стимулов операциональным порогом, равным двум. Для решения более сложных зрительных задач второй стадии восприятия уровень информативности и операциональный порог восприятия должны быть выше.

Экспериментально установлены и применяются на практике в аэрофотосъемочных процессах соотношения между количеством элементов разрешения, укладываемых в пределах минимального размера объекта, и уровнями дешифрируемости (таблица 4).

Таблица 4 – Соотношения между количеством элементов разрешения и уровнями дешифрируемости

Уровень дешифрируемости	Классификационный признак	Количество пикселей
Обнаружение	Объект появляется в поле зрения	2
Определение ориентации	Наблюдатель различает форму объекта и определяет его ориентацию	4
Различение	Наблюдатель классифицирует объект	8
Идентификация	Наблюдатель в пределах своих знаний устанавливает тип объекта	13

Таким образом применительно к цифровой съемке можно утверждать, что для обнаружения объекта размер наименьшего элемента изображения на местности должен быть не менее чем в два раза меньше минимального геометрического элемента создаваемой модели. Соответственно, для определения ориентации, различения и идентификации объекта размер наименьшего элемента изображения на местности должен быть не менее, чем в 4, 8, 13 меньше минимального геометрического элемента создаваемой модели.

В нормативно-техническом документе по топографическому дешифрированию [17] указано, что при идентификации малых и слабоконтрастных объектов местности особое внимание должно быть обращено на тот факт, что возможность их восприятия прямо зависит от соотношения оптического контраста и размера деталей фотоизображения.

Действующая инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов содержит формулы для расчета оптимального элемента геометрического разрешения при сканировании исходных аэрофотоснимков в зависимости от масштаба снимков и масштаба создаваемой карты (плана) или ортофотоплана.

В рамках исследования нами получены формулы для расчета пространственного разрешения в зависимости от требуемой средней квадратической погрешности определения координат и высот по модели и формула для расчета высоты АФС с использованием цифровой камеры с определенным фокусным расстоянием.

Согласно требованиям действующих нормативно-технических документов по топографической съемке, средние ошибки в положении на карте (плане) предметов и контуров местности с четкими очертаниями относительно ближайших точек съемочного обоснования не должны превышать 0,5 мм, а в горных районах – 0,7 мм. В этом случае величина СКП на местности будет вычисляться как

$$\text{СКП}_{\text{на местности}} = 0,5 \cdot M, \quad (1)$$

где M – знаменатель масштаба создаваемой карты (плана).

Вместе с тем, средние ошибки съемки рельефа относительно ближайших точек геодезического обоснования не должны превышать по высоте 1/4 принятой высоты сечения рельефа при углах наклона до 2° и 1/3 – при углах наклона свыше 2°.

Выразив знаменатель масштаба съемки через СКП, получим

$$M = \frac{\text{СКП}_{\text{на местности}}}{0,5} \quad (2)$$

Графическое разрешение, соответствующее фотографической разрешающей способности снимка 7 лин./мм, составляет 0,07 мм.

Тогда расчет значения необходимого пространственного разрешения снимков выполняется по формуле

$$R = 0,07 \cdot \frac{\text{СКП}_{\text{на местности}}}{0,5}, \quad (3)$$

где 0,07 – графическое разрешение, соответствующее фотографической разрешающей способности изображения не менее 7 лин./мм.

Необходимо учесть, что в настоящее время на БПЛА часто устанавливают неметрические камеры, что связано с их малой стоимостью, небольшим весом и простотой использования. Современные цифровые фотограмметрические системы имеют специальные инструменты для фотограмметрической обработки снимков, полученных некалиброванными камерами.

Однако после автоматической самокалибровки (вычисление поправок dx и dy в координаты измеренных на снимке точек, компенсирующих влияние дисторсии) средствами цифровых фотограмметрических систем остаточная фотограмметрическая дисторсия объектива съемочной камеры составляет от 2 до 2,5 пикселей. Для учета этой особенности принят понижающий коэффициент k_d , равный 2.

Таким образом, расчет значения пространственного разрешения исходных аэрофотоснимков выполняется по формуле

$$R = 0,07 \cdot \text{СКП}_{\text{на местности}} \cdot k_d \quad (4)$$

Для перехода от аналоговой формы представления снимков к цифровой нами предложен коэффициент перехода $k_{\text{цф}}$, равный 10.

Тогда

$$R = 0,7 \cdot \text{СКП}_{\text{на местности}} \quad (5)$$

При фиксированном фокусном расстоянии объектива, с учетом размера элемента цифровой матрицы и требуемого пространственного разрешения на местности, высота съемки вычисляется по формуле

$$H = \frac{f \cdot R}{p}, \quad (6)$$

где f – фокусное расстояние съемочной камеры, мм;

R – пространственное разрешение на местности, м;

p – физический размер пикселя светочувствительной матрицы цифровой камеры, мкм.

Подставив вместо R уравнение (4), получим формулу, с использованием которой вычисляется высота фотографирования, обеспечивающая создание модели с заданными точностными характеристиками:

$$H = \frac{0,7 \cdot f \cdot \text{СКП}_{\text{на местности}}}{p}. \quad (7)$$

Предложенные формулы были использованы при выполнении экспериментальных исследований.

В результате исследований установлено, что для построения качественных точечных цифровых моделей поверхности необходимо, чтобы каждая точка объекта съемки отображалась на трех и более снимках. При выполнении плановой АФС вертикальных и наклонных элементов объектов это требование не всегда обеспечивается. В результате построенная фотограмметрическая модель имеет недостаточную плотность и не позволяет оператору уверенно распознать часть конструктивных элементов и определить их местоположение.

Для решения этой проблемы в работе предложено выполнять плановую и перспективную АФС. В действующих нормативно-технических документах приведены несколько различных определений перспективной аэрофотосъемки.

В Большой советской энциклопедии перспективная аэрофотосъемка определена как фотографическая съемка местности с воздуха при заданном наклоне оптической оси аэрофотоаппарата. Это позволяет охватывать сразу значительные площади и воспроизводить близкие объекты в более крупном масштабе.

До недавнего времени перспективную аэрофотосъемку для создания карт (планов) применяли редко. Это связано с тем, что для ее выполнения необходимо специальное оборудование, а обработка перспективных снимков сложнее, чем плановых.

Однако в связи с развитием геоинформационных технологий и цифровых методов появились новые возможности получения и обработки материалов перспективной аэрофотосъемки [45].

Перспективные снимки предоставляют пользователю возможность определения:

- назначения и состояния объекта;
- формы и протяженности конструктивных элементов объектов;
- пространственного взаимного расположения конструктивных элементов объекта.

Совместная фотограмметрическая обработка плановых и перспективных снимков позволяет обеспечить достаточное количество точек на вертикальных и наклонных элементах объекта для уверенной идентификации.

В результате исследований установлено, что использование перспективных снимков для построения фотограмметрических моделей позволяет дополнительно определить состояние объекта, форму и протяженность конструктивных элементов на вертикальных и наклонных элементах объекта, пространственное взаимное расположение конструктивных элементов объекта.

2.4 Разработка технологической схемы сбора и обработки данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов для моделирования геопространства

Для моделирования геопространства с использованием БПЛА нами разработана технологическая схема сбора и совместной фотограмметрической обработки материалов плановой и перспективной АФС.

Сбор и обработка данных аэрофотосъемки с использованием БПЛА для моделирования геопространства должны выполняться на основании технического задания.

На подготовительном этапе должны быть выполнены:

- анализ исходных материалов, включающих краткую физико-географическую характеристику района работ, сведения о наличии пунктов геодезической сети и пунктов глобальной навигационной спутниковой сети;
- разработка требований к точности и детальности модели геопространства, на основании которых должен быть осуществлен выбор БПЛА и цифровой камеры для аэрофотосъемки;
- расчет параметров аэрофотосъемки: пространственного разрешения цифровых снимков, высоты фотографирования; планирование маршрутов с использованием программных средств, совместимых с системой автоматического управления БПЛА.

На этапе создания планово-высотного обоснования должны быть решены следующие задачи:

- разработка проекта, в котором определены система координат, точность определения координат опознаков, схема расположения опознаков с учетом имеющихся пунктов геодезической сети и пунктов глобальной навигационной спутниковой сети;
- маркировка опознаков, обеспечивающая уверенное распознавание их на снимках;

- определение координат и высот опознаков с заданной точностью.

На этап аэрофотосъемки с использованием БПЛА выполняются:

- определение места стартовой площадки для БПЛА в зависимости от типа БПЛА и в соответствии с рекомендациями эксплуатационных документов;
- плановая съемка;
- перспективная съемка.

Этап составления фотограмметрического проекта включает следующие процессы:

- импорт цифровых снимков с последующей оценкой качества и отбраковкой избыточных и непригодных для дальнейшей обработки снимков;
- выбор и установка параметров обработки, способствующих получению фотограмметрической модели заданной точности и детальности;
- загрузка координат опознаков, определение местоположения и измерения координат опознаков на снимках.

На этапе фотограмметрической обработки снимков выполняются:

- пространственная фототриангуляция с использованием автоматического отождествления соответствующих точек перекрывающихся снимков;
- построение фотограмметрической модели в виде точечной цифровой модели;
- оценка точности фотограмметрической модели с использованием контрольных точек, равномерно распределенных на территории съемки.

При получении результатов оценки точности, удовлетворяющих заданным требованиям, выполняется экспорт в обменные форматы, совместимые с геоинформационными системами. Результаты фотограмметрической обработки должны сопровождаться метаданными, состав и формат которых определяется техническим заданием.

Обобщенная схема сбора и обработки данных аэрофотосъемки для моделирования геопространства приведена на рисунке 5.

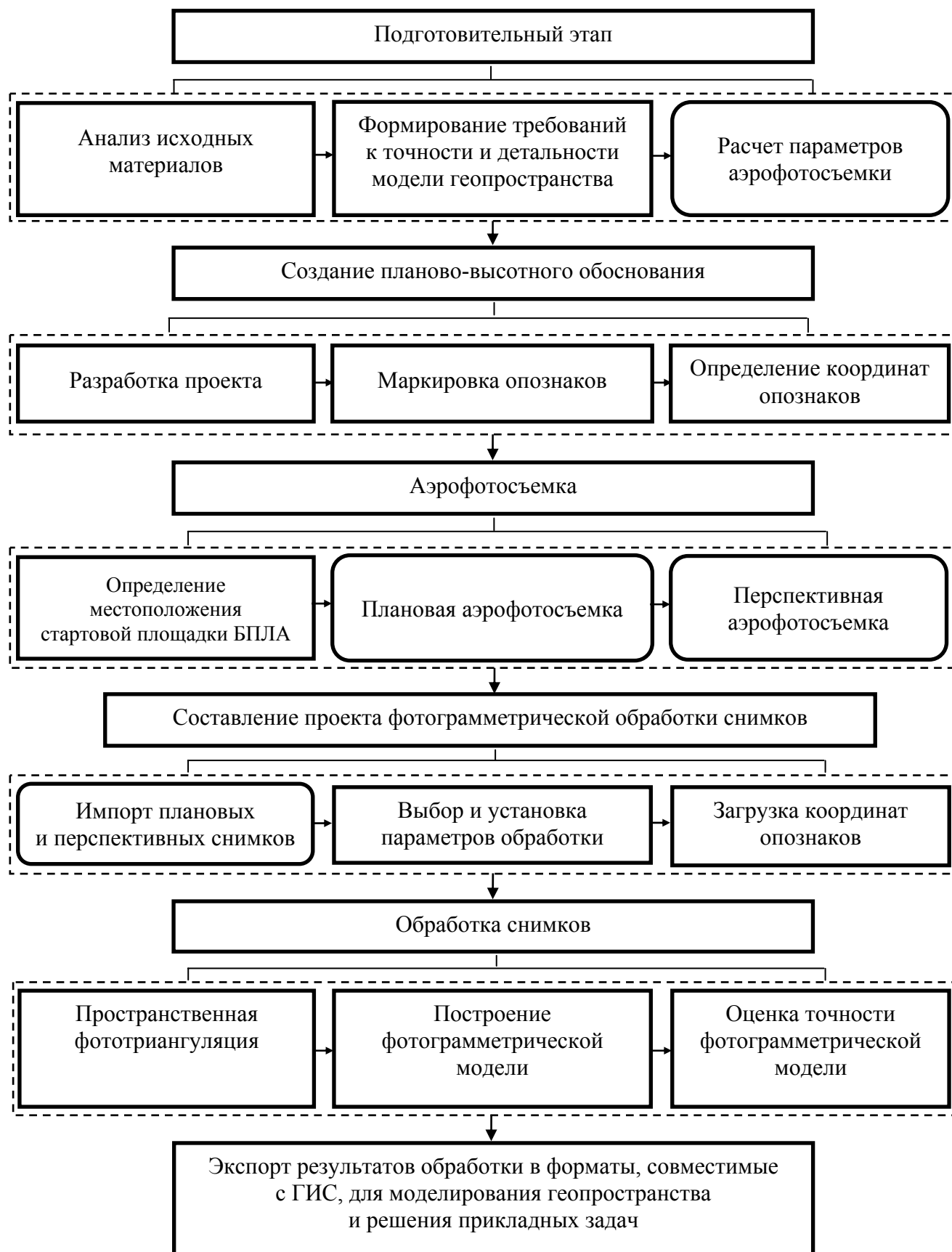


Рисунок 5 – Технологическая схема сбора и обработки данных АФС с использованием БПЛА для моделирования геопространства

В отличие от существующей технологии сбора и обработки материалов АФС в предложенной технологической схеме на подготовительном этапе выполняется расчет параметров АФС, с использованием БПЛА в зависимости от требований к точности и детальности модели геопространства по разработанным формулам. Для построения фотограмметрической модели выполняется совместная фотограмметрическая обработки плановых и перспективных снимков, что обеспечивает получение точечной цифровой модели поверхности, которая может служить исходной основой в геоинформационных системах для формирования моделей объектов в составе модели геопространства.

Выводы по второму разделу

На основании выполненных исследований разработаны и сформулированы:

1 Требования к сбору и обработке данных аэрофотосъемки с БПЛА для моделирования геопространства:

– для обеспечения заданной точности пространственное разрешение снимков, полученных с БПЛА для моделирования геопространства, должно быть не менее чем в два раза меньше требуемой погрешности измерения координат точек объекта;

– для обеспечения заданной детальности пространственное разрешение снимков, полученных с БПЛА для моделирования геопространства, должно быть не менее чем в два раза меньше минимального геометрического элемента создаваемой модели. Для определения ориентации, различения и идентификации объекта размер наименьшего элемента изображения на местности должен быть не менее, чем в 4, 8, 13 меньше минимального геометрического элемента создаваемой модели. Значение пространственного разрешения выбирается на основании анализа характерных особенностей территории съемки и назначения модели;

– расчеты пространственного разрешения снимков, полученных с БПЛА, и высоты фотографирования должны выполняться по формулам

$$R = 0,7 \cdot \text{СКП}_{\text{на местности}}$$

$$H = \frac{0,7 \cdot f \cdot \text{СКП}_{\text{на местности}}}{p}$$

Значение пространственного разрешения выбирается на основании анализа характерных особенностей территории съемки и назначения модели.

2. Требование к обработке данных аэрофотосъемки с БПЛА для моделирования геопространства – для обеспечения заданной детальности и визуальной достоверности фотограмметрической модели необходимо выполнять совместную фотограмметрическую обработку плановых и перспективных снимков.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К СБОРУ И ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВА

3.1 Общие положения методики исследований

В данном разделе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований разработанных требований и предложенной технологической схемы сбора и обработки данных АФС с использованием БПЛА для моделирования геопространства.

Исследования включали следующие процессы:

- подготовку требований к точности и детальности модели геопространства;
- расчет пространственного разрешения аэрофотоснимков;
- расчет высоты фотографирования;
- разработку проекта плано-высотного обоснования;
- маркировку опознаков;
- определение плановых координат и высот опознаков;
- выполнение плановой аэрофотосъемки;
- выполнение перспективной аэрофотосъемки;
- составление проекта фотограмметрической обработки;
- построение фотограмметрической модели;
- оценку точности фотограмметрической модели в виде точечной цифровой модели поверхности;
- построение ортофотоплана;
- экспорт точечной цифровой модели поверхности и ортофотоплана в обменный формат;

- импорт точечной цифровой модели поверхности и ортофотоплана в геоинформационную систему;
- создание моделей объектов геопространства.

Перечисленные выше процессы выполнялись в отношении следующих объектов:

- тест-объект;
- фрагмент территории жилищно-строительного комплекса «Восточный» города Новосибирска;
- объект недвижимости.

Для выполнения исследований выбраны следующие технические и программные средства:

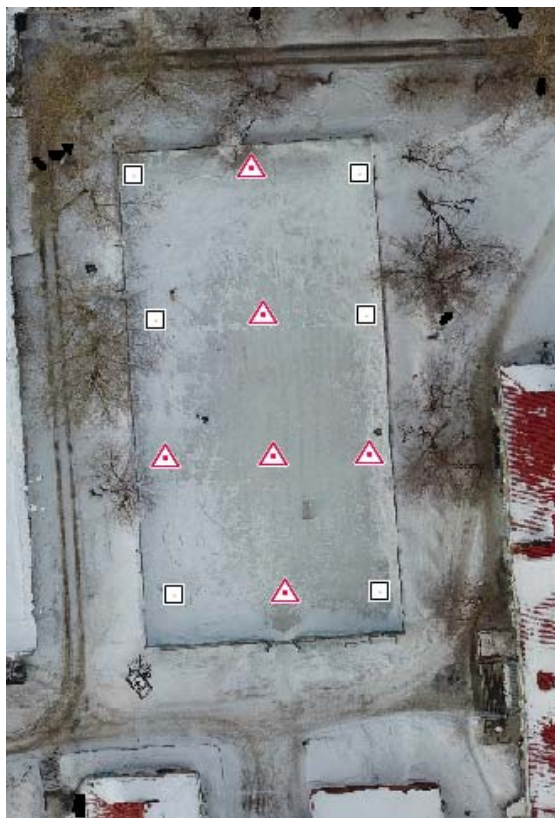
- БПЛА DJI Phantom 4;
- БПЛА Supercam S350;
- ГНСС-приемник Topcon Hyper SR;
- ПО Agisoft Photoscan;
- ПО ГИС «Панорама».

3.2 Построение и оценка точности фотограмметрической модели тест-объекта

Целью эксперимента являлась оценка возможностей получения аэрофотоснимков с использованием БПЛА DJI Phantom 4 и создания по ним фотограмметрической модели [81].

Для достижения цели построен тест-объект, представляющий собой земельный участок с ровной поверхностью площадью около 1 800 м², с закрепленными пунктами планово-высотного обоснования. Проект планово-высотного обоснования обеспечил равномерное расположение опознаков на территории съемки.

Схема расположения пунктов приведена на рисунке 6.



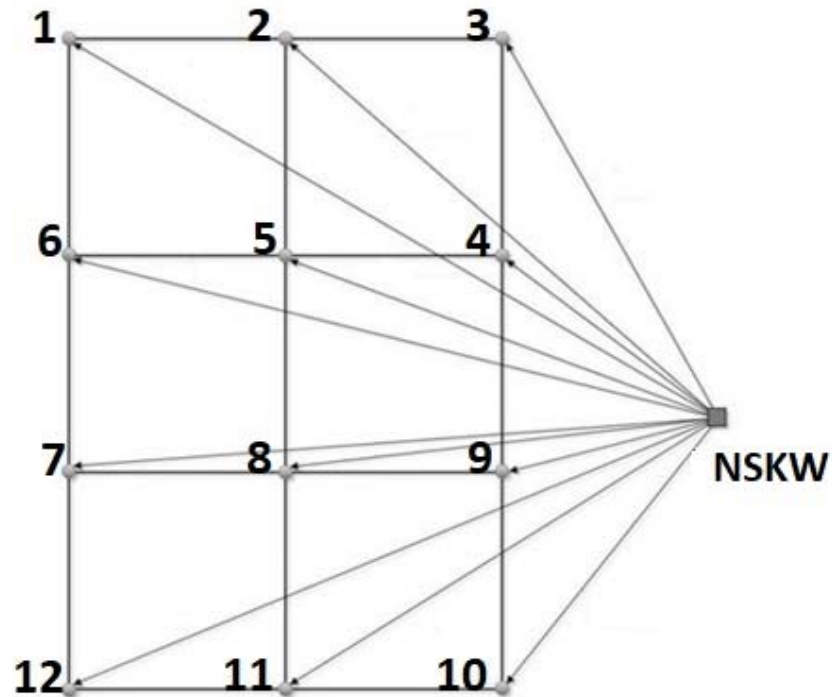
□ – опорная точка; ▲ – контрольная точка

Рисунок 6 – Схема расположения пунктов планово-высотного обоснования

Для маркировки пунктов использовались диски контрастного цвета диаметром около 20 см. Для определения плановых координат и высот опознаков тест-объекта с помощью ГНСС-приемника Topcon Nurer SR был использован лучевой метод. Принципиальная схема метода приведена на рисунке 7. Средняя квадратическая погрешность (СКП) определения координат и высот составила 0,02 м. Результаты оценки точности эталонного полигона, на основании сопоставления контрольных длин линий, полученных с помощью ГНСС-определений и измеренных с помощью электронной рулетки, приведены в приложении А.

Согласно предложенной технологической схеме (см. рисунок 5), на подготовительном этапе проанализированы исходные материалы, сформированы требования к точности и детальности, выполнен расчет параметров аэрофотосъемки с использованием БПЛА DJI Phantom 4 с установленной цифровой фотокамерой DJI FC330 с фокусным расстоянием 4 мм и размером кадра 4 000 × 3 000 пиксе-

лей. Данный БПЛА относится к вертолетному типу (рисунок 8) и предназначен для выполнения панорамной и плановой аэрофото- и видеосъемки на высоте до 500 м.



NSKW – постоянно действующая базовая станция ГНСС; 1, 2, 3, ..., 12 – опознаки;

—————> – измеряемый вектор

Рисунок 7 – Схема определения плановых координат и высот опознаков тест-объекта лучевым методом



Рисунок 8 – Вид БПЛА DJI Phantom 4

Съемка выполнена на высоте около 100 м. Планирование маршрутов съемки с заданным продольным и поперечным перекрытием снимков около 80 % осуществлено средствами мобильного приложения Pix4D Poligon Mission.

Окно мобильного приложения с изображением границ съемки, осей маршрутов и центров проектирования снимков приведено на рисунке 9.

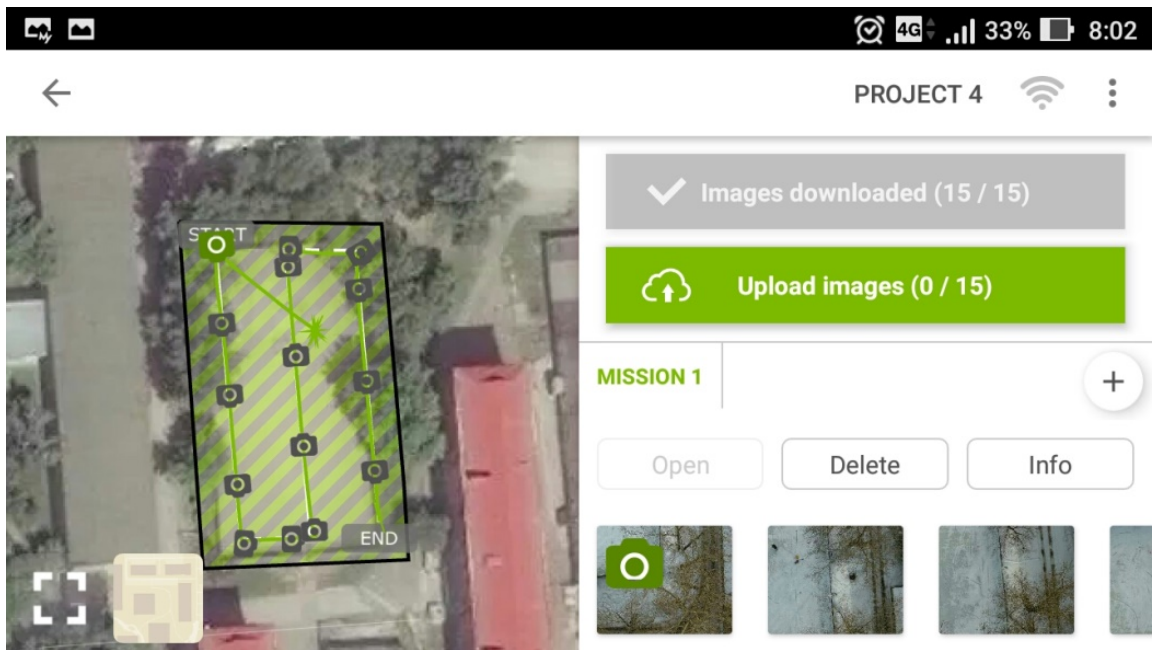


Рисунок 9 – Окно программы Pix4D Poligon Mission

Управление БПЛА во время аэрофотосъемки выполнялось в автоматическом режиме с помощью автопилота.

В качестве инструмента для фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки, полученных с БПЛА, выбрано программное обеспечение Agisoft Photoscan.

На этапе импорта цифровых аэрофотоснимков в фотограмметрический проект исключены избыточные снимки и снимки низкого качества. Для проекта установлена местная система координат.

В результате обработки получена фотограмметрическая модель в виде точечной цифровой модели поверхности (рисунок 10). Отчет о фотограмметрической обработке приведен в приложении Б.

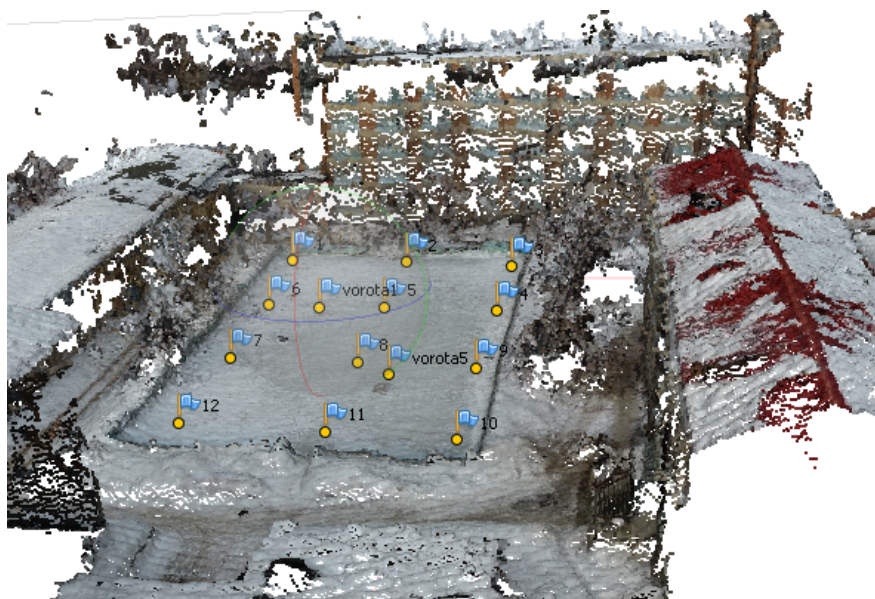


Рисунок 10 – Изображение точечной цифровой модели поверхности

Оценка точности фотограмметрической обработки материалов аэрофото- съемки с БПЛА выполнялась по плановым координатам и высотам опорных и контрольных точек на этапе автоматической фототриангуляции (приложение В).

Результаты оценки точности построения фотограмметрической модели с использованием опорных и контрольных точек приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты оценки точности фотограмметрической модели на опорных и контрольных точках

Назначение	Число точек	СКП, м			
		m_x	m_y	m_l	m_h
Опорные	6	0,015	0,019	0,024	0,016
Контрольные	6	0,016	0,030	0,034	0,054

По результатам экспериментального исследования установлено:

– СКП определения планового положения опорных и контрольных точек не превышает 0,1 м, что соответствует требованиям, предъявляемым к точности определения координат характерных точек границ земельного участка, характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства [76];

– СКП определения высот точек построенной модели соответствует точности топографической съемки с высотой сечения рельефа 0,5 м [15].

3.3 Построение и оценка точности фотограмметрической модели фрагмента территории жилищно-строительного комплекса «Восточный» города Новосибирска

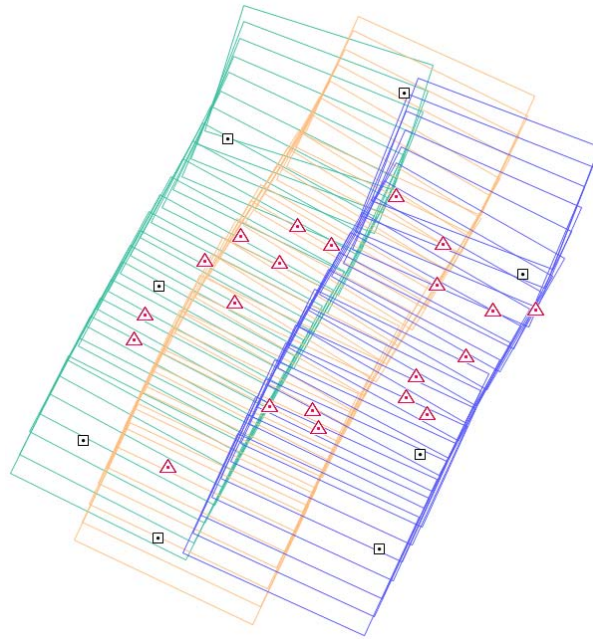
Целью эксперимента являлась оценка возможностей построения моделей объектов геопространства с использованием данных плановой аэрофотосъемки с БПЛА [112, 113].

Согласно предложенной технологической схеме (см. рисунок 5), на подготовительном этапе проанализированы исходные материалы, сформированы требования к точности и детальности, вычислены параметры плановой АФС с учетом характеристик БПЛА Supercam S350 и установленной цифровой камеры SONY ILCE-6000 с фокусным расстоянием 20 мм и размером кадра 4 000 × 6 000 пикселей.

Supercam S350 представляет собой аппарат самолетного типа (рисунок 11) с размахом крыла 3,2 м и предназначен для выполнения панорамной и плановой аэрофотосъемки и видеосъемки на высоте от 50 до 500 м. Развивает скорость полета от 65 до 120 км/ч. Допустимый вес полезной нагрузки может достигать 2,5 кг.



Рисунок 11 – Вид БПЛА Supercam S350



□ – опорная точка; △ – контрольная точка; — границы снимков

Рисунок 13 – Схема расположения снимков, опорных и контрольных точек

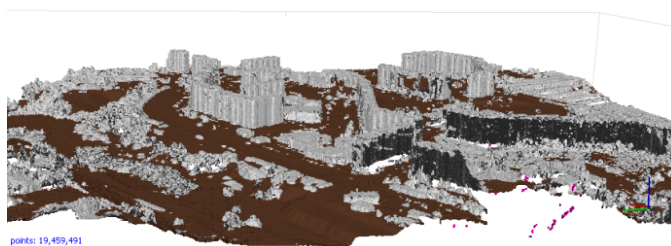
Perspective 30°



points: 19,459,491

Рисунок 14 – Изображение цифровой модели поверхности

Perspective 30°



points: 19,459,491

Рисунок 15 – Изображение цифровой модели рельефа

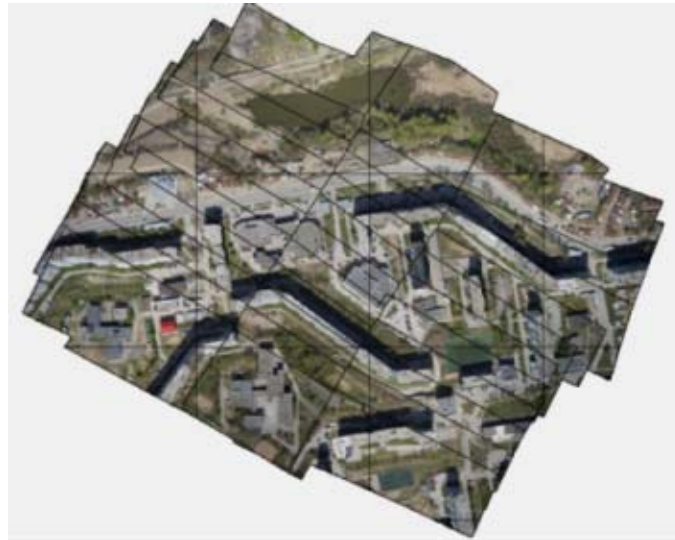


Рисунок 16 – Изображение ортофотоплана

Оценка точности построения фотограмметрических моделей выполнена с использованием плановых координат и высот опорных и контрольных точек. Результаты оценки точности приведены в таблицах 6 и 7, а также в приложениях Е, Ж.

Таблица 6 – Результаты оценки точности построения фотограмметрической модели с использованием координат центров проектирования

Назначение	Число точек	СКП, м			
		m_x	m_y	m_l	m_h
Центры проектирования снимков	66	0,13	0,34	0,37	0,32
Контрольные	15	0,76	0,84	1,13	1,00

Таблица 7 – Результаты оценки точности построения фотограмметрической модели на опорных и контрольных точках

Назначение	Число точек	СКП, м			
		m_x	m_y	m_l	m_h
Опорные	8	0,09	0,07	0,11	0,15
Контрольные	21	0,14	0,29	0,32	0,51

По результатам эксперимента установлено, что для повышения точности определения координат точек фотограмметрической модели необходимо при выполнении пространственной фототриангуляции наряду с координатами центров проектирования использовать координаты опорных точек.

Результаты фотограмметрической обработки экспортированы в обменный формат GeoTiff.

Дальнейшая обработка выполнялась средствами ГИС «Панорама» и включала:

- импорт ЦМР, ЦМП и ортофтоплана;
- векторизацию объектов местности;
- формирование атрибутивных данных.

Векторизация объектов выполнялась в соответствии с принятыми для соответствующего масштаба или специально разработанными Правилами цифрового описания топографических объектов.

В рамках исследований предложено технологическое решение автоматизированного определения относительных высот площадных объектов средствами ГИС «Панорама».

Определение относительных высот площадных объектов включает в себя следующие операции:

- получение разности значений ЦМП и ЦМР (рисунок 17);
- построение центров площадных объектов (рисунок 18);
- автоматическое внесение значения относительной высоты в метрическое описание центра площадного объекта;
- автоматический перенос значения высоты в семантическое описание площадного объекта.

На основе векторных объектов, созданных в соответствии с правилами цифрового описания и классификатором, предусматривающим 3D-отображение, средствами ГИС «Панорама» автоматически генерируется 3D-модель геопространства (рисунок 19).



Рисунок 17 – Матричное изображение разностей значений ЦМП и ЦМР



Рисунок 18 – Центры площадных объектов



Рисунок 19 – Фрагмент 3D-модели геопространства

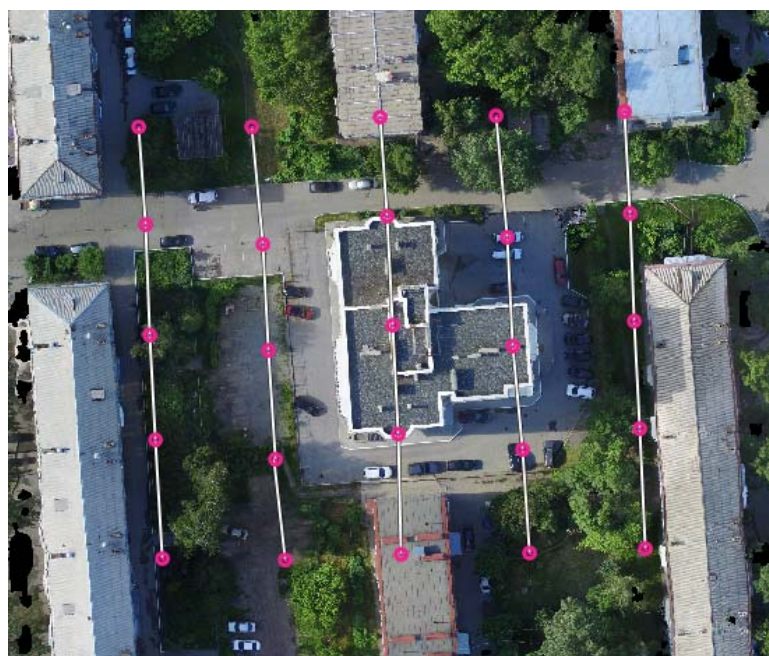
3.4 Построение и оценка точности фотограмметрической модели объекта недвижимости

Целью эксперимента являлось построение и оценка точности фотограмметрической модели объекта недвижимости для дальнейшего использования этой модели при решении измерительных задач в области кадастра [79].

Согласно предложенной технологической схеме (см. рисунок 5), для построения модели геопространства на территорию объекта городской инфраструктуры на примере 9-этажного жилого строения на подготовительном этапе проанализированы исходные материалы, сформированы требования к точности и детальности, выполнен расчет параметров плановой АФС с учетом особенностей установленной на БПЛА DJI Phantom 4 цифровой камеры DJI FC330.

Плановая АФС выполнена с 80-процентным продольным перекрытием.

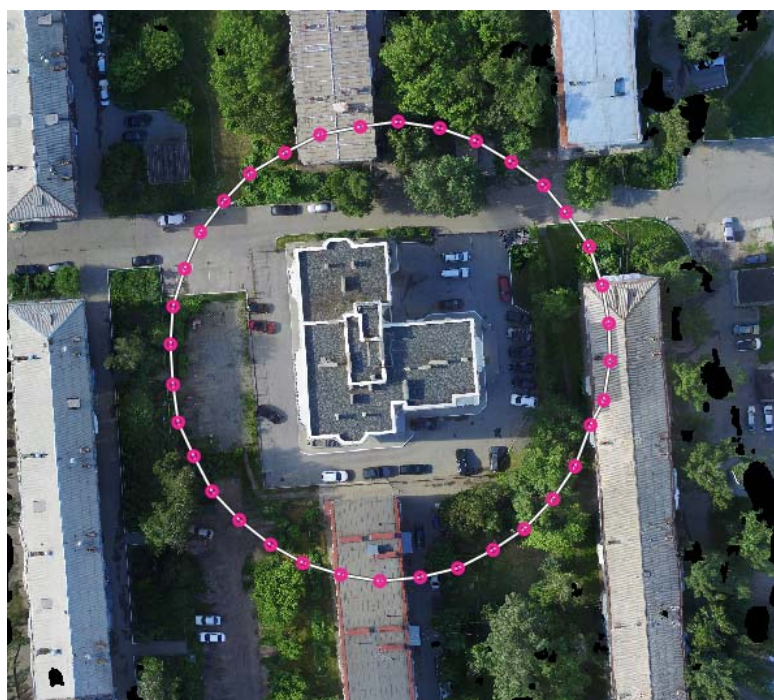
Схема расположения маршрутов и центров снимков относительно рассматриваемого строения при выполнении плановой АФС приведена на рисунке 20.



● – центр снимка; ———— – линия маршрута

Рисунок 20 – Схема расположения маршрутов и центров снимков при выполнении плановой аэрофотосъемки

Перспективная АФС выполнена по линии окружности вокруг строения с величиной базиса 10° и заданным углом к линии горизонта около 30° . Расстояние между центрами снимков при этом составило около 7 м. Центр окружности совпадает с центром контура строения. Схема расположения маршрутов и центров снимков относительно рассматриваемого строения при выполнении перспективной АФС приведена на рисунке 21.



● – центр снимка; ———— – линия маршрута

Рисунок 21 – Схема расположения маршрутов и центров снимков перспективной аэрофотосъемки

Характеристики плановой и перспективной съемки приведены в таблице 8.

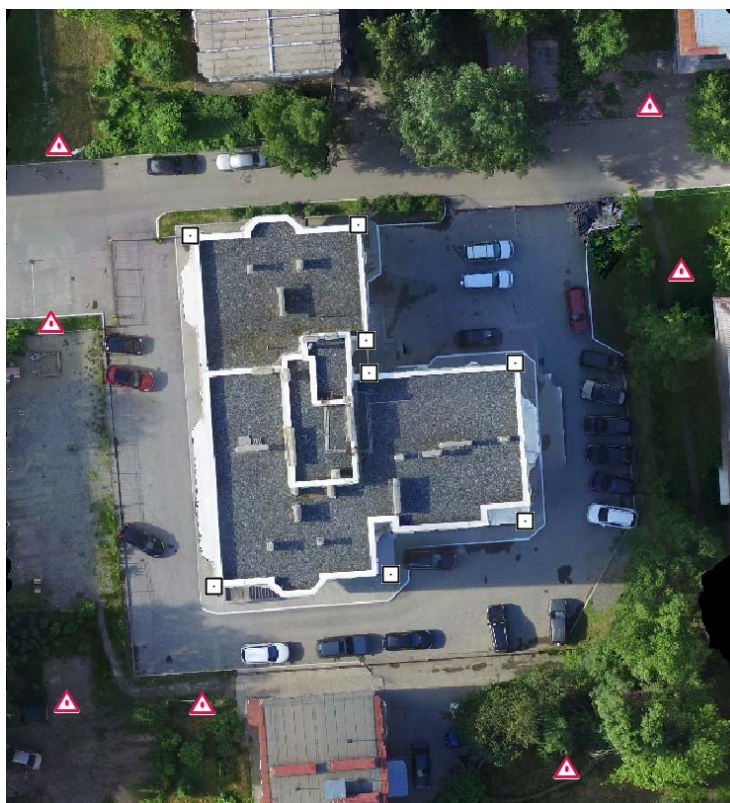
Таблица 8 – Характеристики плановой и перспективной съемки

Вид АФС	Количество снимков, штук	Высота съемки, м	Пространственное разрешение, см/пиксель	Время съемки, минут
плановая	25	75	2,9	2
перспективная	36	75	3,2	4

Продольный и поперечный углы наклона снимков при плановой съемке не превышали $2,6^\circ$. Продольные углы наклона при перспективной съемке составляли от 25 до 30° , поперечные – от $0,2$ до $3,8^\circ$.

Проектирование планово-высотного обоснования выполнено в соответствии с инструкцией [18]. Для маркировки точек планово-высотного обоснования использованы пластиковые диски контрастного цвета диаметром $0,2$ м. В качестве контрольных точек использованы твердые характерные точки объекта недвижимости – углы строения. Координаты и высоты опорных и контрольных точек получены с помощью ГНСС-приемника Topcon Hyper SR. СКП определения координат составила $0,02$ м.

Схема расположения опорных и контрольных точек приведена на рисунке 22.



□ – опорная точка; △ – контрольная точка

Рисунок 22 – Схема расположения опорных и контрольных точек

В результате фотограмметрической обработки с использованием ПО Agisoft Photoscan материалов разных видов АФС и их сочетаний получены и проанализированы точечные цифровые модели поверхности. Отчет о фотограмметрической обработке приведен в приложении И. Изображения полученных точечных цифровых моделей поверхности приведены на рисунке 23.

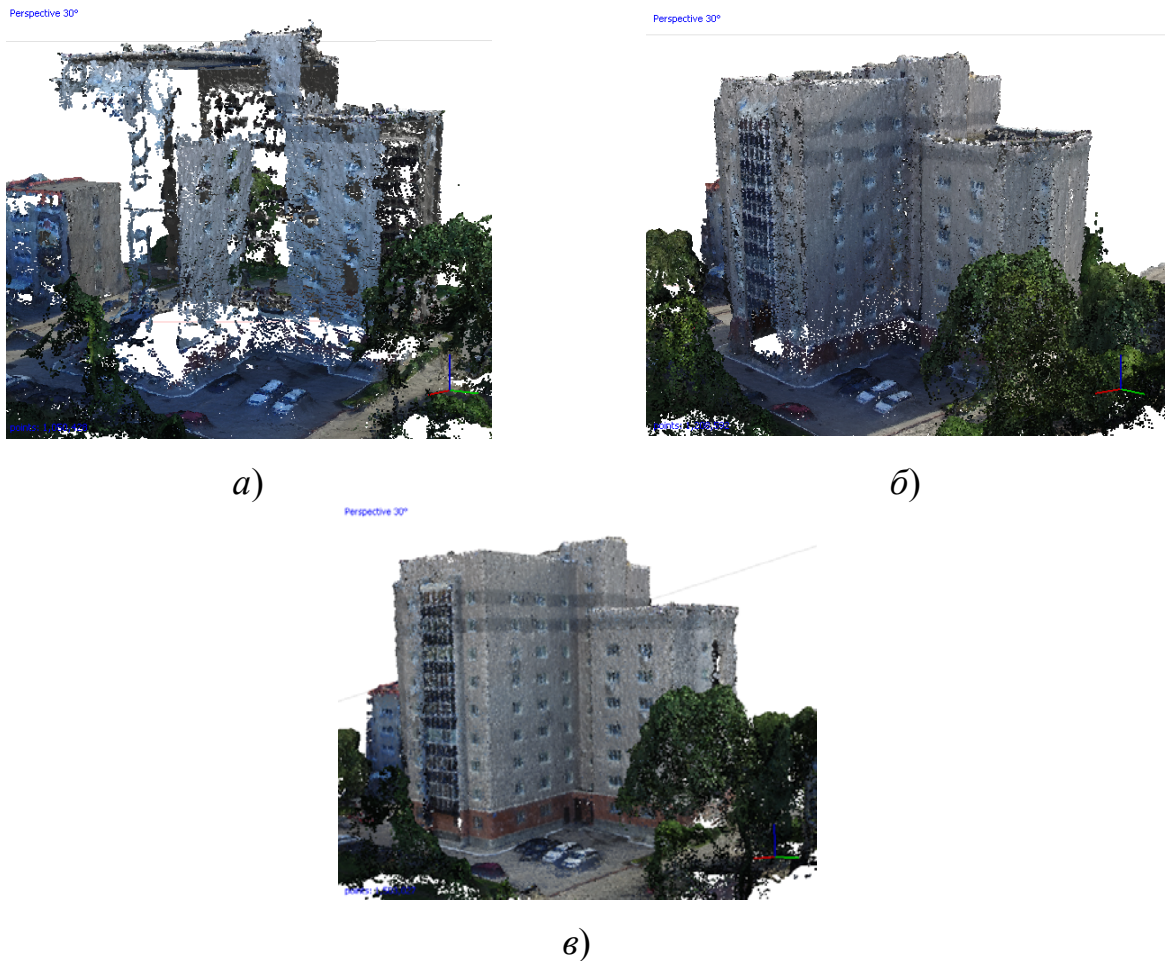


Рисунок 23 – Изображения точечных моделей, полученных по материалам аэрофотосъемки: а) по плановым снимкам; б) по перспективным снимкам; в) совместная обработка данных плановой и перспективной съемки

При автоматическом построении точечных цифровых моделей поверхности получено:

- для плановой съемки – около 900 соответственных точек соседних снимков и около 400 точек – в зоне тройного перекрытия;

– для перспективной съемки по круговому маршруту – около 1 500 соответственных точек соседних снимков и около 1 000 точек – в зоне тройного перекрытия.

На следующем этапе исследований выполнена оценка точности построения фотограмметрической модели по материалам разных видов АФС и их сочетаний.

Оценка точности построения фотограмметрической модели выполнялась путем вычисления средней квадратической погрешности определения координат опорных и контрольных точек.

Вычисление расхождений между измеренными и полученными по фотограмметрической модели значениями координат выполнялось по следующей формуле:

$$\Delta_{X_i} = X_{GNSS} - X_{\text{МОД}}, \quad \Delta_{Y_i} = Y_{GNSS} - Y_{\text{МОД}},$$

где X_{GNSS} , Y_{GNSS} – значения координат i -й точки, полученные в результате ГНСС-измерений;

$X_{\text{МОД}}$, $Y_{\text{МОД}}$ – значения координат i -й точки, полученные по фотограмметрической модели.

СКП определения координат опорных и контрольных точек была рассчитана по формуле Гаусса:

$$\Delta_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{X_i}^2}{n}}, \quad \Delta_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{Y_i}^2}{n}}, \quad \Delta = \sqrt{\Delta_X^2 + \Delta_Y^2},$$

где n – количество точек;

Δ – СКП планового положения.

Результаты оценки точности фотограмметрической модели объекта недвижимости, полученной по результатам обработки материалов указанных вариантов АФС, приведены в таблице 9 и в приложении К.

Таблица 9 – Оценка точности построения фотограмметрической модели объекта недвижимости

Вид аэрофото- съемки	СКП, м							
	на опорных точках				на контрольных точках			
	m_x	m_y	m_l	m_h	m_x	m_y	m_l	m_h
плановая	0,013	0,021	0,024	0,032	0,031	0,045	0,049	0,061
перспективная	0,020	0,022	0,030	0,035	0,036	0,043	0,048	0,063
плановая и перспективная	0,016	0,023	0,029	0,033	0,044	0,031	0,046	0,061

Анализ полученных результатов показал, что включение материалов перспективной АФС, полученных с БПЛА, в процесс построения фотограмметрической модели строения в виде точечной цифровой модели поверхности повышает ее визуальную достоверность и обеспечивает возможность определения местоположения конструктивных элементов в составе вертикальных и наклонных поверхностей. Оценка точности показала, что СКП определения положения характерных точек не превышает 5 см в плане и 7 см по высоте, что соответствует требованиям [76].

Использование для фотограмметрической обработки двух видов съемки приводит к увеличению времени съемки, а увеличение количества снимков в фотограмметрическом проекте – к увеличению времени обработки. Однако для моделирования отдельных объектов недвижимости это не имеет принципиального значения ввиду небольших площадей.

Таким образом, фотограмметрические модели в виде точечных цифровых моделей поверхности, построенные по материалам АФС с использованием БПЛА, целесообразно использовать для измерительных задач в области кадастра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований достигнута основная цель работы – разработаны требования к сбору и обработке данных АФС для моделирования геопространства.

Основные научные и практические результаты, полученные в результате диссертационного исследования, заключаются в следующем.

1 Выполнен анализ состояния вопроса по применению БПЛА для аэрофотосъемки территорий и перспективы ее применения для оперативного решения различных задач в области цифровой экономики Российской Федерации, на основании которого сделан вывод о необходимости совершенствования нормативно-правовой базы в части применения данных АФС с БПЛА для моделирования геопространства.

2 Разработаны и обоснованы требования к сбору и обработке данных АФС с БПЛА для построения фотограмметрических моделей в качестве базового элемента ЕГИП, позволяющие получить фотограмметрические модели объектов съемки, обеспечивающие заданные детальность и точность определения координат.

3 Разработана технологическая схема сбора и обработки данных плановой и перспективной АФС с использованием БПЛА, позволяющая повысить точность, достоверность и наглядность фотограмметрических моделей объектов съемки и обеспечить необходимую точность получения метрических данных в камеральных условиях.

4 Выполнены экспериментальные исследования по моделированию тест-объекта, фрагмента территории МЖК «Восточный» г. Новосибирска и объекта городской инфраструктуры по данным АФС с БПЛА с учетом разработанных требований, которые позволили получить детальные высокоточные фотограмметрические модели для применения в измерительных целях в различных отраслях экономики Российской Федерации.

5 Выполнена оценка точности построенных фотограмметрических моделей, позволившая сделать вывод о целесообразности применения разработанных требований к сбору и обработке данных АФС с использованием БПЛА.

Результаты исследований по созданию единого геоинформационного пространства рекомендуется использовать для решения широкого спектра задач по развитию территорий, в области экологии, землеустройства и кадастров, сельского хозяйства, градостроительства, жилищно-коммунального хозяйства, благоустройства, транспорта и др. Внедрение результатов исследований позволит значительно сократить расходы финансовых средств, повысить оперативность и эффективность принятия решений по развитию территорий.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в исследованиях, направленных на автоматизацию моделирования объектов геопространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Алябьев, А. А. Фотограмметрический метод в кадастровых работах: цифровые стереомодели и ортофотопланы [Текст] / А. А. Алябьев, К. А. Литвинцев, Е. А. Кобзева // Геопрофи. – 2018. – № 2. – С. 4–8.
- 2 Аналитическая пространственная фототриангуляция [Текст] / А. Н. Лобанов, В. Б. Дубиновский, М. М. Машимов, Р. П. Овсянников. – М. : Недра, 1991. – 255 с.
- 3 Антипов, И. Т. Исследования вероятностей оценки точности пространственной аналитической триангуляции [Текст] / И. Т. Антипов, Т. А. Хлебникова // Вестник СГУГиТ. – 2011. – Вып. 2 (15). – С. 50–57.
- 4 Антипов, И. Т. Об использовании цифровых средне- и малоформатных камер для аэрофотосъемки [Текст] / И. Т. Антипов, Е. А. Кобзева // Геодезия и картография. – 2013. – № 11. – С. 29–34.
- 5 Арбузов, С. А. Реализация практико-ориентированного обучения посредством научно-образовательного и производственного центра беспилотных авиационных систем (НОПЦ БАС) СГУГиТ [Текст] / С. А. Арбузов, М. А. Петрова, О. А. Опритова // АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБРАЗОВАНИЯ. Инновационные подходы в образовании. Междунар. науч.-метод. конф. : сб. материалов в 2 ч. (Новосибирск, 23–27 января 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Ч. 1. – С. 210–214.
- 6 Берлянт, А. М. Картографический словарь [Текст] / А. М. Берлянт. – М. : Научный мир. – 2005. – 424 с.
- 7 Берлянт, А. М. Развитие теории и методов создания геоизображений [Текст] / А. М. Берлянт // Геодезия и картография. – 2001. – № 11. – С. 35–41.
- 8 Бугаков, С. В. Особенности геоинформационного моделирования [Текст] / С. В. Бугаков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 3. – С. 77–80.

9 Воронин, Е. Г. О влиянии дискретизации на точность измерений по цифровому снимку [Текст] / Е. Г. Воронин // Геодезия и картография. – 1999. – № 10. – С. 31–35.

10 Гебгарт, Я. И. Некоторые вопросы измерения снимков [Текст] / Я. И. Гебгарт, У. Д. Ниязгулов, А. А. Гебгарт // Геодезия и картография. – 2005. – № 2. – С. 24–25.

11 Гельман, Р. Н. Влияние размера пиксела на точность измерений цифрового снимка и построение модели [Текст] / Р. Н. Гельман // Геодезия и картография. – 2004. – № 9. – С. 30, 35–37.

12 Геоинформационная система «КАРТА 2005 версия 12» (ГИС «Панорама х64»). Прикладные задачи. Построение 3D модели. ПАРБ.00046-03 98 07 [Текст] : программное изделие. – М., 2018.

13 Геопространственный дискурс опережающего и прорывного мышления [Текст] / А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий, К. С. Байков, А. Г. Осипов, В. Н. Савиных // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 53–67.

14 Гермак, О. В. Возможности неметрических цифровых камер в наземной фотограмметрии [Электронный ресурс] / О. В. Гермак, Н. А. Калачева, О. А. Гугуева // Инженерный вестник Дона. – 2013. № 4 (27). – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-nemetricheskih-tsifrovyyh-kamer-v-nazemnoy-fotogrammetrii>.

15 ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов [Текст]. – М. : ЦНИИГАиК, 2002. – 100 с.

16 ГКИНП (ОНТА)-12-274-03. Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съемок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме (Федеральная служба геодезии и картографии России) [Текст]. – М., 2003. – 68 с.

17 ГКИНП 02-121-79. Руководство по дешифрированию аэроснимков планов масштабов 1 : 2 000 и 1 : 5 000 [Текст]. – М. : ЦНИИГАиК, 1980.

18 ГКИНП-02-033-82. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000, 1 : 500 с поправками, утвержденными ГУГК в 1982 г. [Текст]. – М. : Недра, 1982.

19 ГКИНП-02-127-80. Руководство по редактированию топографических крупномасштабных карт и планов [Текст]. – М. : ЦНИИГАиК, 1980. – 49 с.

20 ГКИНП-09-32-80. Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов [Текст]. – М. : Недра, 1982. – 17 с.

21 ГКИНП-НТА-02-118. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000 и 1 : 500 [Текст]. – М., 1979. – 17 с.

22 ГОСТ 28441–99. Картография цифровая. Термины и определения [Текст]. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 10 с.

23 ГОСТ Р 52055–2003. Геоинформационное картографирование. Пространственные модели местности. Общие требования [Текст]. – М. : Госстандарт России, 2003. – 4 с.

24 ГОСТ Р 52438–2005. Географические информационные системы. Термины и определения [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2006.

25 ГОСТ Р 52439–2005. Модели местности цифровые. Каталог объектов местности. Требования к составу [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2006. – 54 с.

26 ГОСТ Р 52440–2005. Модели местности цифровые. Общие требования [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2006. – 8 с.

27 Группа компаний Геоскан. Применение БЛА при решении картографических и кадастровых задач [Электронный ресурс] : отчет. – Режим доступа : <http://geoscan.ru>.

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

29 Гук, А. П. Современное состояние и перспективное развитие фотограмметрических технологий, дистанционных методов и мониторинга по аэрокосмической информации [Текст] / А. П. Гук, И. Т. Антипов // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 5. – С. 3–8.

30 Гурский, Р. А. Алгоритмы и методы обработки информации, полученной не метрическими камерами [Текст] / Р. А. Гурский // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – № 1 (13). – С. 129–135.

31 Евстратова, Л. Г. Опыт создания ортофотопланов по материалам аэро съемки цифровой неметрической камерой [Текст] / Л. Г. Евстратова, А. А. Саваренко // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 3. – С. 57–60.

32 Жмудь, В. А. Теорема Котельникова – Найквиста – Шеннона, принцип неопределенности и скорость света [Текст] / В. А. Жмудь // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 1 (7).

33 Журкин, И. Г. Выбор критерия и пространства свойств для оценки эффективности инструментально-программных средств ГИС [Текст] / И. Г. Журкин // Информационные технологии. – 1999. – № 3. – С. 28–32.

34 Журкин, И. Г. Результаты экспериментальных исследований технологии получения измерительной трехмерной видеосцены по материалам аэрокосмических съемок [Текст] / И. Г. Журкин, Т. А. Хлебникова // Геодезия и картография. – 2010. – № 7. – С. 27–31.

35 Журкин, И. Г. Технология получения измерительной трехмерной видеосцены по материалам аэрокосмических съемок [Текст] / И. Г. Журкин, Т. А. Хлебникова // Геодезия и картография. – 2009. – № 8. – С. 43–48.

36 Журкин, И. Г. Технология трехмерного моделирования городских территорий на основе ГИС // Междунар. научно-техн. конф, посвящ. 225-летию МИИГАиК [Текст] / И. Г. Журкин, М. А. Баклыков, С. В. Еруков. – М, 2004. – С. 6–13.

37 Журкин, И. Г. Цифровое моделирование измерительных трехмерных видеосцен [Текст] : монография / И. Г. Журкин, Т. А. Хлебникова. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 246 с.

38 Зинчук, Н. Н. Оценка точности измерений порога восприятия глубины дискретной стереомодели [Текст] / Н. Н. Зинчук // Геодезия и картография. – 2004. – № 11. – С. 25–29.

39 Иноземцев, Д. П. Беспилотные летательные аппараты: Теория и практика. Часть 1. Обзор технических средств [Текст] / Д. П. Иноземцев // Журнал «Технологии». – 2013. – № 2 (49). – С. 50–54.

40 Иноземцев, Д. П. Беспилотные летательные аппараты: Теория и практика. Часть 2. Модель обработки аэрофотоснимков в среде AGISOFT PHOTOSCAN [Текст] / Д. П. Иноземцев // Журнал «Технологии». – 2013. – № 3 (50). – С. 48–51.

41 Использование многороторных БПЛА для целей ДЗЗ [Текст] / В. К. Барбасов, Н. М. Гаврюшин, Д. О. Дрыга, М. С. Батаев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – С. 122–126.

42 Исследование возможностей применения квадрокоптера для съемки береговой линии обводненного карьера с целью государственного кадастрового учета [Текст] / И. М. Ламков, А. Ю. Чермошенцев, С. А. Арбузов, А. П. Гук // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 200–209.

43 Кадничанский, С. А. Обоснование допустимой высоты фотографирования при стереотопографической съемке рельефа [Текст] / С. А. Кадничанский // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 3. – С. 31–35.

44 Кадничанский, С. А. Обоснование требований к цифровой модели рельефа, используемой в современных технологиях аэрофототопографической съемки [Текст] / С. А. Кадничанский // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 2. – С. 58–62.

45 Кадничанский, С. А. Цифровые перспективные аэрофотоснимки и возможности их применения в визуальных информационных системах [Текст] / С. А. Кадничанский // Геопрофи. – 2009. – № 6. – С. 42–47.

46 Карпик, А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий [Текст] : монография / А. П. Карпик. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 260 с.

47 Карпик, А. П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе [Текст] : монография / А. П. Карпик, А. Г. Осипов, П. П. Мурзинцев. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 280 с.

48 Карпик, А. П. Электронное геопространство: сущность и концептуальные основы [Текст] / А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 1. – С. 55–60.

49 Кацко, С. Ю. Неогеография и картография [Текст] / С. Ю. Кацко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 102–106.

50 Концепция геопространственного представления и анализа экологической ситуации в регионе [Текст] / С. И. Биденко, А. В. Зиновьев, И. А. Казьмин, П. Н. Кравченко // Вестник ТвГУ. Сер. «Биология и экология». – 2015. – № 2. – С. 133–143.

51 Косиков, А. Г. Идеальные модели реальности для географических исследований [Текст] / А. Г. Косиков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 81–87.

52 Костюк, А. С. Особенности аэрофотосъемки со сверхлегких беспилотных летательных аппаратов [Текст] / А. С. Костюк // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (104). – С. 236–240.

53 Костюк, А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА [Текст] / А. С. Костюк // 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. 83–87.

54 Котельников, В. А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи [Текст] / В. А. Котельников // УФН, 2006. – Т. 176, № 7 (приложение). – С. 762–770.

55 Краснопевцев, Б. В. Основные события в истории создания съемочной и обрабатывающей фотограмметрической аппаратуры [Текст] / Б. В. Краснопевцев // Инф. Бюллетень ГИС. – 2004.– № 3 (45).– С. 21–23.

56 Лазерко, М. М. Совместная обработка материалов аэрокосмических и наземных съемок для создания 3D-моделей городских территорий [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Лазерко Мария Михайловна. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 21 с.

57 Лобанов, А. Н. Автоматизация фотограмметрических процессов [Текст] / А. Н. Лобанов, И. Г. Журкин. – М. : Недра, 1980. – 240 с.

58 Лобанов, А. Н. Фотограмметрия [Текст] / А. Н. Лобанов, М. И. Буров, Б. В. Краснопевцев. – М. : Недра, 1987. – 309 с.

59 Лобанов, А. Н. Фотограмметрия [Текст] / А. Н. Лобанов. – М. : Недра, 1984. – 552 с.

60 Макаров, А. А. Построение трехмерных моделей зданий и сооружений для целей паспортизации объектов недвижимости [Текст] / А. А. Макаров // Геодезия и картография. – 2007. – № 11. – С. 40–42.

61 Минько, В. Ю. Технологическое проектирование аэрофотосъемки : справочник [Текст] / В. Ю. Минько. – М. : Недра, 1991. – 154 с.

62 Михайлов, А. П. Фотограмметрия [Текст] / А. П. Михайлов, А. Г. Чибуничев ; под общ. редакцией А. Г. Чибуничева. – М. : МИИГАИК, 2016. – 292 с.

63 Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования [Текст] / В. А. Середович, Т. А. Широкова, Д. В. Комиссаров и др. // Геодезия и картография. – 2006. – № 6. – С. 12–14.

64 Мышляев, В. А. О цифровой картографической продукции нестандартных масштабов [Текст] / В. А. Мышляев // Геодезия и картография. – 2009. – № 7. – С. 62–63.

65 Национальная технологическая инициатива: программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://asi.ru/nti/>. – Загл. с экрана.

66 Нехин, С. С. Автоматизация фотограмметрического сбора трехмерной информации на ЦФС [Текст] / С. С. Нехин, С. В. Олейник // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 70–74.

67 Нехин, С. С. Геоинформация, соединяющая континенты [Текст] / С. С. Нехин // Геодезия и картография. – 2004. – № 10. – С. 19–28.

68 Нехин, С. С. Шелковый путь информации из изображений [Текст] / С. С. Нехин // Геодезия и картография. – 2009. – № 2. – С. 36–48.

69 Никитин, В. Н. Опыт построения ортофотоплана по данным крупномасштабной аэрофотосъемки, выполненной с использованием неметрической цифровой камеры [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // 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. 12–17.

70 О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс] : федеральный закон от 30.12.2015 № 431–ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

71 О значении критерия точности построения модели местности [Текст] / Р. М. Хрущ, А. Н. Гринь, А. В. Соловьев, А. В. Левадный // Информация и космос. – 2016. – № 2. – С. 98–101.

72 О реализации преимуществ цифровых технологий при создании картографической продукции [Текст] / В. Н. Филатов, В. А. Авдеев, Р. С. Мухудинов, В. А. Радионов // Геодезия и картография. – 2008. – № 4. – С. 19–20.

73 О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы : указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

74 О цифровой топографии [Текст] / В. Н. Филатов, В. А. Авдеев, Р. С. Мухудинов, В. А. Радионов // Геодезия и картография. – 2008. – № 5. – С. 19–21.

75 Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» : распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

76 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 или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения и помещения : приказ Минэкономразвития России от 01.03.2016 № 90 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

77 Обиденко, В. И. Об определении метрических параметров больших по площади территорий средствами программного обеспечения геоинформационных систем [Текст] / В. И. Обиденко, О. А. Оприцова // Геодезия и картография. – 2016. – Вып. 3. – С. 41–49.

78 Обиденко, В. И. Разработка методики получения нормальных высот на территории Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 [Текст] / В. И. Обиденко, О. А. Оприцова, А. П. Решетов // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 14–25.

79 Оприцова, О. А. Исследование возможностей применения беспилотных авиационных систем для моделирования объектов недвижимости [Текст] / О. А. Оприцова // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 248–258.

80 Основные проблемы пространственного представления местности в цифровых картографических изделиях [Текст] / В. Н. Филатов и др. // Геодезия и картография. – 2007. – № 4. – С. 35–38.

81 Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем [Текст] / Е. И. Аврунев, Х. К. Ямбаев, О. А. Оприцова, А. В. Чернов, Д. В. Гоголев // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 211–228.

82 Павленко, А. В. Разработка методики создания фотограмметрических 3D-моделей местности по аэрокосмическим снимкам [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Павленко Анна Васильевна. – Новосибирск : СГГА, 2006. – 23 с.

83 Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в инновационных проектах [Электронный ресурс] / Т. Д. Хуснутдинов, А. В. Щербатова, П. А. Комарова, Е. В. Рублевская, А. Ю. Решетников // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – № 13. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-innovatsionnyh-proektah> (дата обращения: 30.05.2018).

84 План мероприятий («дорожная карта») «АэроНет» Национальной технологической инициативы, приложение № 2 к протоколу заседания Межведомственной рабочей группы по разработке и реализации Национальной технологической инициативы при президиуме Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://aeronet.aero/documents/dorozhnaya_karta_aeronet_nti/.

85 Повышение качества цифровых пространственных моделей местности [Текст] / А. Н. Гринь, Р. М. Хрущ, К. П. Виноградов, С. В. Ронжин // Геодезия и картография. – 2007. – № 5. – С. 32–35.

86 Прохоров, Д. О. Создание цифровой модели породного отвала угольной шахты на основе съемки беспилотным летательным аппаратом [Текст] / Д. О. Прохоров // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. – 2018. – Вып. 1. – С. 64–72.

87 Раков, Д. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса [Текст] / Д. Н. Раков, В. Н. Никитин //

Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 27–36.

88 Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях (РАФ-89), утвержденное начальником Военно-топографического управления Генерального штаба и начальником Главного штаба Военно-Воздушных Сил в 1989 г. [Текст]. – М., 1989.

89 Руководство по аэрофотосъемочным работам [Текст] – М. : Воздушный транспорт. – 1988. – 334 с.

90 Рыльский, И. А. Сравнение пригодности данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БПЛА для обеспечения проектных работ [Электронный ресурс] / И. А. Рыльский // Геоматика. – Режим доступа : <http://geomatika.ru/clauses/sravnenie-prigodnosti-dannyh-vozdushnogo-lazernogo-skanirovaniya-i-aerofotosmki-s-bpla-dlya-obespecheniya-proektnyh-rabot/>.

91 Савиных, В. П. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования [Текст] / В. П. Савиных, В. Я. Цветков. – М. : Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. – 228 с.

92 Скубиев, С. И. Использование беспилотных летательных аппаратов для целей картографии [Текст] / С. И. Скубиев // От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии : тезисы X Юбилейной международной научно-технической конференции. – Гаета, Италия, 2010.

93 Современные тенденции и направления в развитии геодезии: прогноз на ближайшие пять-семь лет [Текст] / А. П. Карпик, И. А. Мусихин, Ф. Швигер, О. В. Горобцова // Геодезия и картография. – 2016. – № 10. – С. 2–11.

94 Стешин, И. С. Технология создания трехмерной модели местности на основе данных дистанционного зондирования Земли с беспилотного летательного аппарата в сервисе Maps Made Easy [Текст] / И. С. Стешин // Научное обозрение. Раздел III. Слово молодым ученым. – 2017. – № 1. – С. 1–8.

95 Студитский, А. С. Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Студитский Александр Сергеевич. – М., 2013. – 112 с.

96 Трехмерное моделирование и фотореалистическая визуализация городских территорий [Текст] / А. Гречищев, В. Бараниченко, С. Монастырев, А. Шпильман // ArcREView. – 2003. – № 2 (25). – С. 12–13.

97 Трубина, Л. К. Цифровая фотограмметрическая обработка снимков для получения геопространственных данных при оценке состояния экосистем [Текст] : дис. ... док. техн. наук / Трубина Людмила Константиновна. – Новосибирск : СГГА, 2002. – 186 с.

98 Уханёва, А. В. Создание цифровых топографических карт с использованием цифровой аэрофотокамеры UltraCavX [Текст] / А. В. Уханёва, Г. П. Хремли // Геодезия и картография. – 2010. – № 5. – С. 42–46.

99 Филатов, В. Н. Многомерные цифровые модели местности и подповерхностных объектов [Текст] / В. Н. Филатов, С. П. Присяжнюк // Информация и космос. – 2005. – № 1. – С. 5–8.

100 Фирсов, Ю. Г. Цифровые модели рельефа дна в электронной гидрографии [Текст] / Ю. Г. Фирсов // Геодезия и картография. – 2008. – № 4. – С. 45–53.

101 Фототриангуляция в режиме реального времени на ЦФС [Текст] / И. Т. Антипов, Г. А. Зотов, С. С. Нехин, Ю. И. Кучинский // Геодезия и картография. – 2003. – № 11. – С. 32–37.

102 Хлебникова, Т. А. Анализ методов создания трехмерных моделей объектов в ЦФС и ГИС [Текст] / Т. А. Хлебникова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 157–162.

103 Хлебникова, Т. А. Анализ точности получения измерительных трехмерных видеосцен по материалам аэрокосмических съемок в различных 3D-ГИС [Текст] / Т. А. Хлебникова // 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.

104 Хлебникова, Т. А. Возможности использования трехмерных видеосцен в экологической оценке состояния городских территорий [Текст] / Т. А. Хлебникова, Л. К. Трубина // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 170–174.

105 Хлебникова, Т. А. О создании цифровых ортофотопланов по материалам аэрофотосъемки для территориального кадастра [Текст] / Т. А. Хлебникова, В. И. Юрченко // Геодезия и картография. – 2001. – № 5. – С. 23–26.

106 Хлебникова, Т. А. Создание трехмерной цифровой модели местности по материалам аэрофотосъемки на ЦФС для использования в 3D-ГИС [Текст] / Т. А. Хлебникова, Н. И. Шушлебина // Геодезия и картография. – 2006. – № 5. – С. 13–18.

107 Хлебникова, Т. А. Технология и опыт создания цифровых топографических карт, планов, ортофотопланов по материалам аэрофотосъемки [Текст] / Т. А. Хлебникова, С. В. Колосков // Геодезия и картография. – 2003. – № 1. – С. 36–39.

108 Хлебникова, Т. А. Технология построения измерительных трехмерных видеосцен по данным ЦММ: проблемы и пути решения [Текст] / Т. А. Хлебникова // Геодезия и картография. – 2008. – № 2. – С. 44–46.

109 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования современных программных продуктов для моделирования геопространства [Текст] / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 119–131.

110 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования современных программных продуктов для моделирования геопространства по материалам БПЛА [Текст] / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэко-

логия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 3–6.

111 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования технологии моделирования геопространства по материалам аэрофотосъемки [Текст] / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 16–20.

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

113 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА [Текст] / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова, С. М. Аубакирова // 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, 25–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 32–37.

114 Хлебникова, Т. А. Комбинированный способ создания цифровых топографических планов для инженерно-геодезических изысканий инженерных сооружений [Текст] / Т. А. Хлебникова, О. Б. Архипова // Геодезия и картография. – 2014. – № 5. – С. 15-19. DOI: 10.22389/0016-7126-2014-887-5-15-19.

115 Хрущ, Р. М. О построении геометрической модели местности по стереопаре аэрокосмических снимков [Текст] / Р. М. Хрущ, А. Н. Гринь, А. В. Соловьев // Информация и космос. – 2016. – № 1. – С. 80–84.

116 Чибуничев, А. Г. Калибровка цифровых фотокамер [Текст] / А. Г. Чибуничев, А. П. Михайлов, А. В. Говоров // Вторая научно-практическая конференция РОФДЗ : тезисы докладов. – М., 2001. – С. 38–39.

117 Шевня, М. С. Использование беспилотных летательных аппаратов для получения материалов дистанционного зондирования Земли [Текст] / М. С. Шевня // Геодезия и картография. – 2013. – Вып. 1. – С. 44–50.

118 Экспериментальные исследования по созданию картографических моделей компонентов экосистем, вовлеченных в природопользование [Рукопись] : отчет о НИР (заключительный) / СГУГиТ ; рук. работы Л. К. Трубина; исполн. О. Н. Николаева [и др.]. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 70 с.

119 Яне, Б. Цифровая обработка изображений [Текст] / Б. Яне. – М. : Техносфера, 2007. – 584 с.

120 Agisoft PhotoScan Professional Edition : руководство пользователя. Версия 1.2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf.

121 Arango, C. Comparison Between Multicopter UAV and Total Station [Electronic resource] / C. Arango, C. A. Morales // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015, Toronto, Canada, Pages 131–134. – Mode of access : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/131/2015/isprsarchives-XL-1-W4-131-2015.pdf>.

122 Colomina, I. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review [Electronic resource] / I. Colomina, P. Molina // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 92, June 2014, Pages 79–97. – Mode of access : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>.

123 Development and Evaluation of a UAV Based Mapping System for Remote Sensing and Surveying Applications [Electronic resource] / C. Eling, M. Wieland, C. Hess, L. Klingbeil, H. Kuhlmann // The International Archives of the Photogramme-

try, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015, International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015, Toronto, Canada, Pages 233–239. – Mode of access : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/233/2015/isprsarchives-XL-1-W4-233-2015.pdf>.

124 Direct Georeferencing on Small Unmanned Aerial Platforms for Improved Reliability and Accuracy of Mapping Without the Need for Ground Control Points [Electronic resource] / O. Mian, J. Lutes, G. Lipa, J. J. Hutton, E. Gavelle, S. Borghinic // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015, Toronto, Canada, Pages 397–401. – Mode of access : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/397/2015/isprsarchives-XL-1-W4-397-2015.pdf>.

125 Homainejad, N. Application of Multiple Categories of Unmanned Aircraft Systems (UAS) in Different Airspaces for Bushfire Monitoring and Response [Electronic resource] / N. Homainejad, C. Rizos // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015, Toronto, Canada, Pages 55–59. – Mode of access : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/55/2015/isprsarchives-XL-1-W4-55-2015.pdf>.

126 PHOTOMOD : руководство пользователя. Версия 5.3 [Электронный ресурс]. – М. : Ракурс, 2014. – 181 с. – 1 электр. опт. диск (DVD+R).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

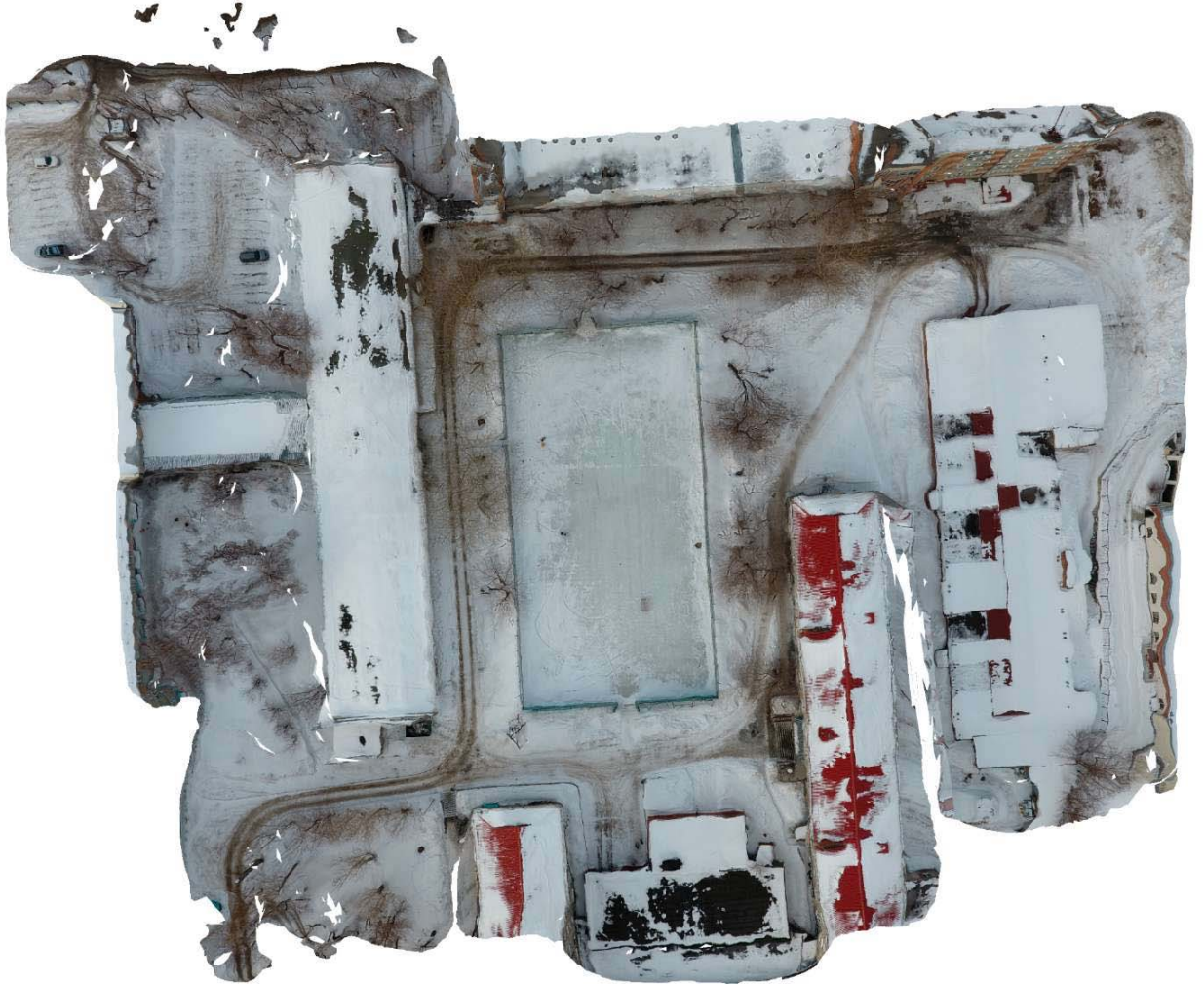
РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

№	Координаты пунктов тест-объекта			Определение точности тест-объекта		
	x , м	y , м	H , м	$S_{x,y,H}$, м	$L_{изм}$, м	$ \Delta_i $, м
1	483272,779	4194381,370	115,393			
				13,478	13,490	-0,012
2	483273,428	4194394,832	115,388			
				12,421	12,400	0,021
3	483272,927	4194407,243	115,394			
				16,232	16,240	-0,008
4	483256,711	4194407,952	115,430			
				11,711	11,710	0,001
5	483256,548	4194396,242	115,404			
				12,484	12,510	-0,026
6	483256,115	4194383,766	115,428			
				16,018	16,010	0,008
7	483240,149	4194385,056	115,426			
				12,394	12,400	-0,006
8	483240,320	4194397,449	115,367			
				11,048	11,040	0,008
9	483240,633	4194408,493	115,367			
				15,834	15,860	-0,026
10	483224,836	4194409,574	115,424			
				10,813	10,780	0,033
11	483224,614	4194398,763	115,396			
				12,852	12,890	-0,038
12	483224,504	4194385,911	115,387			
Оценка математического ожидания -0,004 м						
Средняя квадратическая ошибка координат пунктов эталонного полигона 0,02 м						

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
В ПО AGISOFT PHOTOSCAN (ТЕСТ-ОБЪЕКТ)



Исходные данные



Рис. 1. Позиции камер и перекрытие изображений.

Всего изображений:	6	Позиций съёмки:	6
Высота полёта:	82.3 м	Связующих точек:	6,595
Разрешение съёмки:	3.56 см/пикс	Проекций:	17,883
Площадь покрытия:	2.02e+04 кв. м	Ошибка репр-я:	0.153 пикс

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя	Калибровка
FC330 (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 мм	1.56 x 1.56 мкм	Нет

Таблица 1. Камеры.

Калибровка камеры

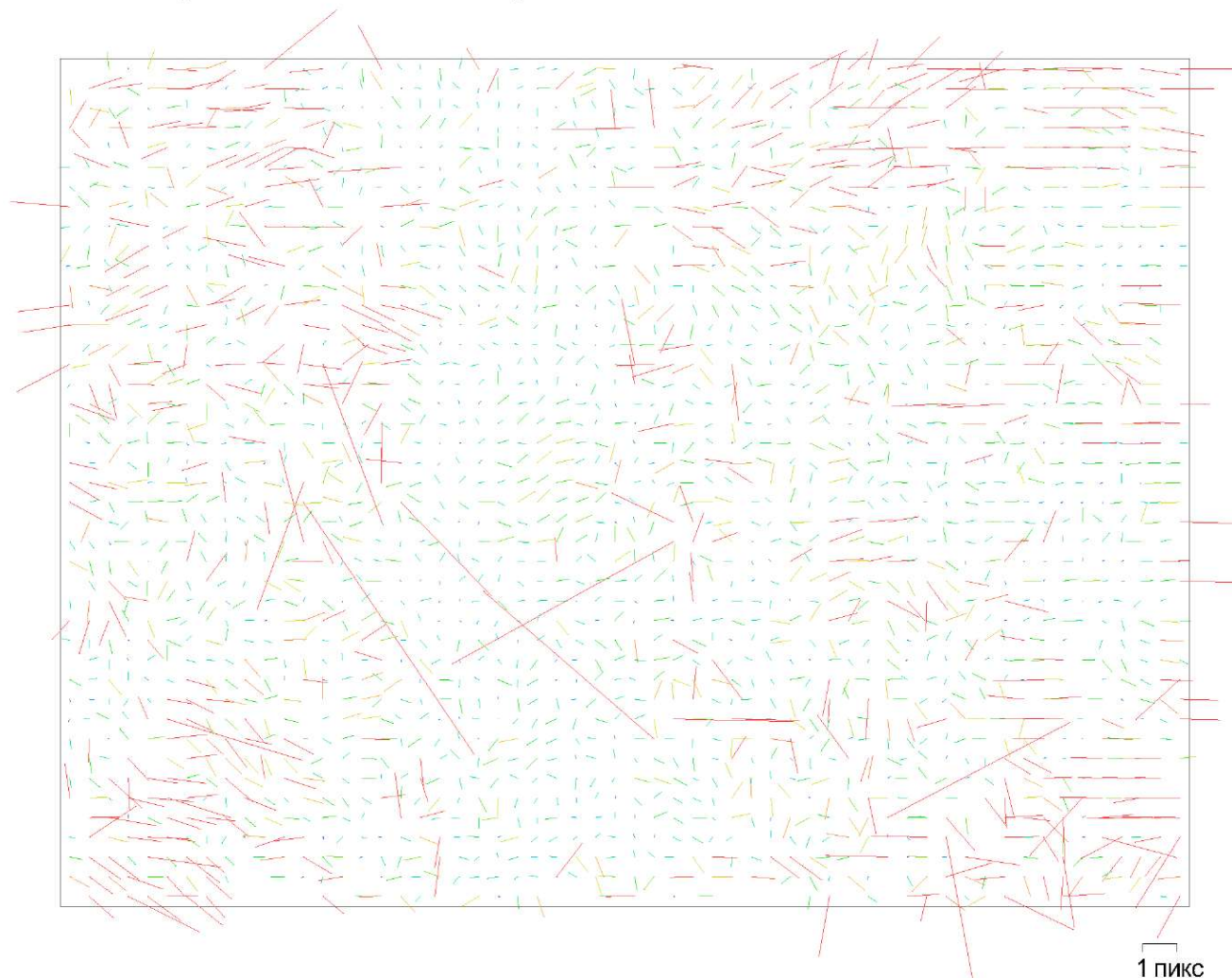


Рис. 2. Невязка по связующим точкам для FC330 (3.61 mm).

FC330 (3.61 mm)

Разрешение 4000 x 3000	Фокусное р-е 3.61 мм	Размер пикселя 1.56 x 1.56 мкм	Калибровка Нет
Тип:	Кадровая	К1:	0.00187299
Fx:	1937.98	К2:	-0.00237404
Fy:	1939.98	К3:	0.000846281
Cx:	1983.16	К4:	0
Sy:	1429.08	P1:	-4.70884e-05
Skew:	3.18222	P2:	0.000209748

Опорные точки

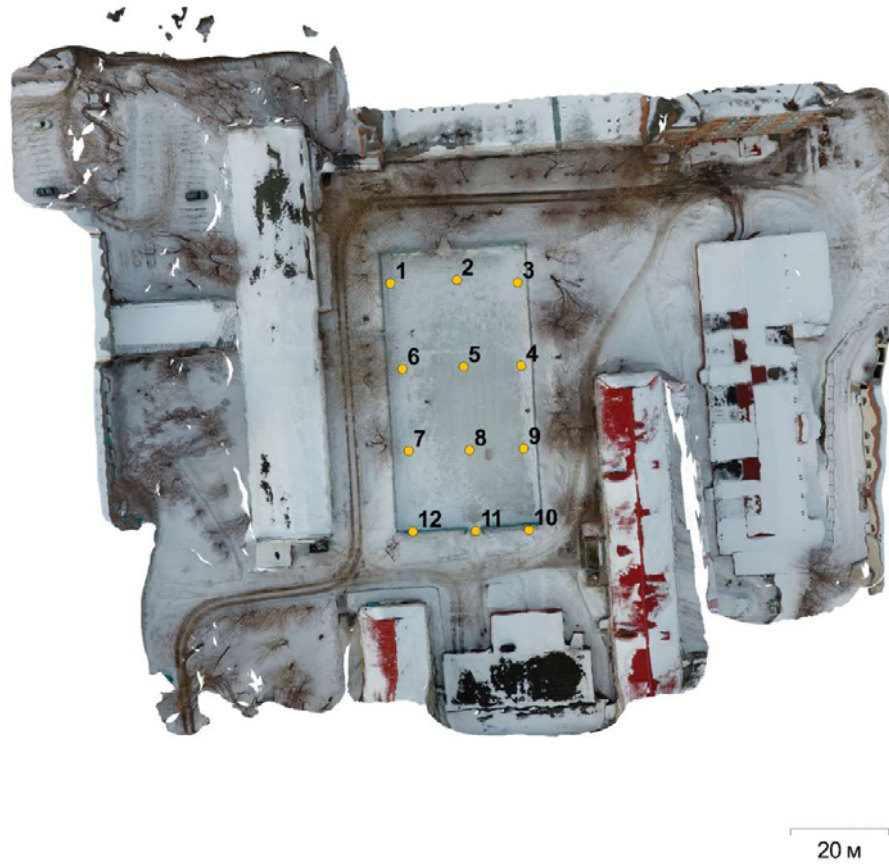


Рис. 3. Позиции опорных точек.

Название	Ошибка X (м)	Ошибка Y (м)	Ошибка Z (м)	Ошибка (м)	Проекции	Ошибка (пикс)
1	-0.0289495	-0.0178249	0.00648092	0.0346093	6	0.338816
10	-0.0180548	-0.0163759	-0.0149325	0.0285854	5	0.243498
12	0.00519387	0.00701977	0.0249347	0.0264195	5	0.234734
3	-0.000259097	-0.00870036	0.00783322	0.0117099	6	0.315346
4	0.0190746	0.0205193	0.00312384	0.0281893	6	0.325789
6	0.0242412	0.0155885	-0.0236542	0.0372848	6	0.298002
Общая	0.0188969	0.0151378	0.0159026	0.0289679		0.29838

Таблица 2. Опорные точки.

Название	Ошибка X (м)	Ошибка Y (м)	Ошибка Z (м)	Ошибка (м)	Проекции	Ошибка (пикс)
11	-0.0238544	0.0129067	0.0267969	0.0381273	5	0.268757
2	0.0644299	-0.0243315	0.0309886	0.0755217	6	0.304025
5	0.0169547	0.00931871	0.0350227	0.0400112	6	0.373327
7	0.0213916	0.0117035	-0.0032182	0.0245953	6	0.164595
8	0.00791264	0.0194183	0.100988	0.103142	6	0.277553
9	-0.000607811	0.0163641	0.0685268	0.0704562	5	0.331356
Общая	0.0303543	0.0164685	0.054482	0.0645049		0.293344

Таблица 3. Проверочные точки.

Цифровая модель местности

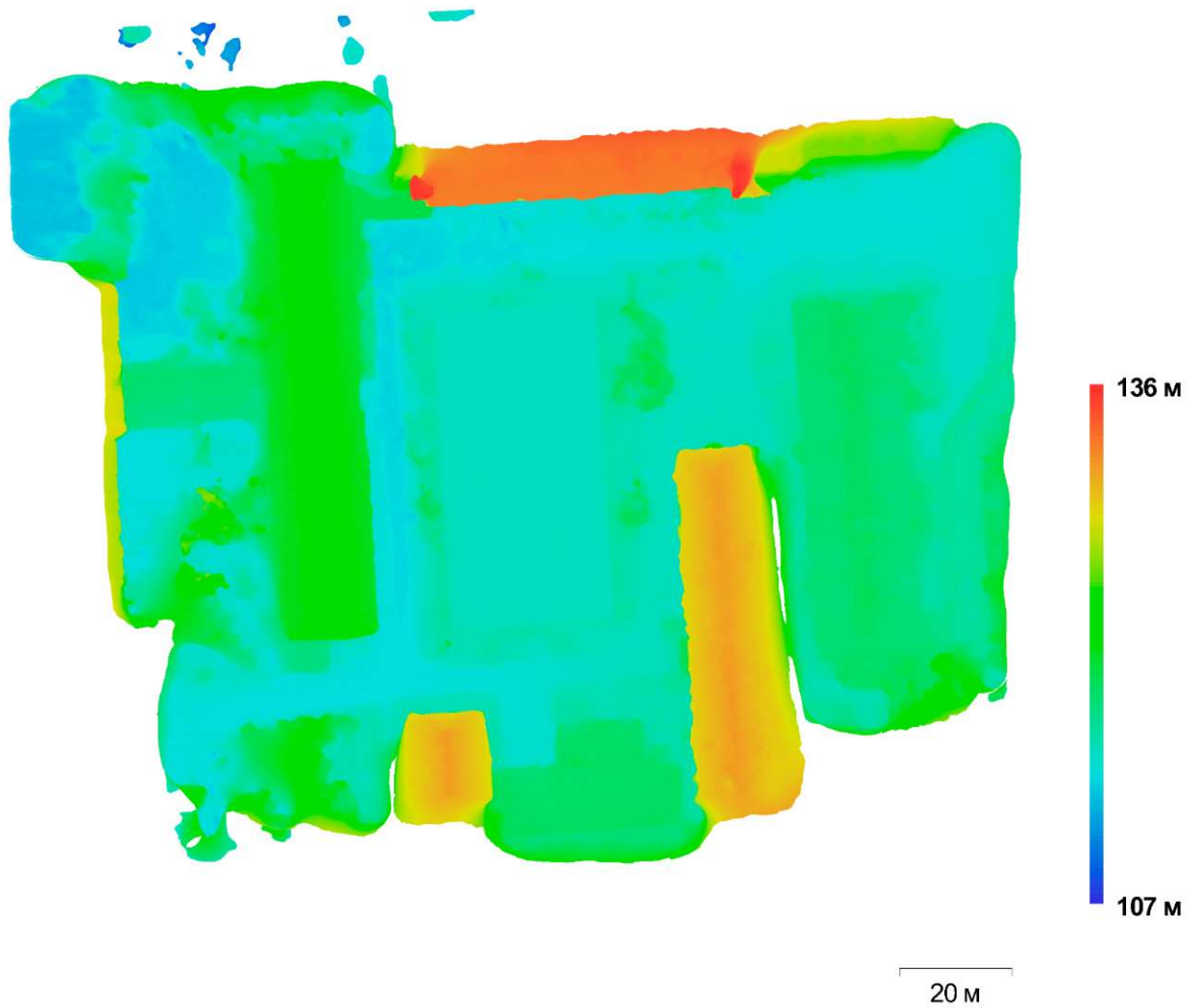


Рис. 4. Рассчитанная цифровая модель местности.

Разрешение: 14.2 см/пикс
Плотность точек: 49.3363 точек на кв. м

Параметры обработки

Основные	
Камеры	6
Выровненные камеры	6
Маркеры	12
Облако точек	
Точек	6,595 из 7,730
СК ошибка репроецирования	0.152547 (1.37361 пикс)
Макс. ошибка репроецирования	0.789186 (4.64408 пикс)
Средний размер точек	8.00574 пикс
Эффективное перекрытие	2.80505
Параметры выравнивания	
Точность	Средняя
Преселекция пар	Отключена
Макс. количество точек	40,000
Макс. количество проекций	4,000
Фильтровать соответствия по маске	Нет
Время поиска соответствий	5 секунд
Время выравнивания	1 секунда
Параметры оптимизации	
Параметры	fx, fy, cx, cy, skew, k1-k3, p1, p2
Время оптимизации	0 секунд
Карты глубины	
Количество	6
Параметры реконструкции	
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Время обработки	23 секунды
Плотное облако точек	
Точек	1,410,341
Параметры реконструкции	
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Время обработки	2 секунды
Модель	
Полигонов	63,308
Вершин	32,358
Текстура	4,096 x 4,096, uint8
Параметры реконструкции	
Тип поверхности	Произвольный
Исходные данные	Плотное облако точек
Интерполяция	Включена
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Количество полигонов	63,309
Время обработки	51 секунда
Параметры текстурирования	
Режим параметризации	Ортофото
Режим смешивания	Мозаика
Размер текстуры	4,096 x 4,096
Время параметризации	0 секунд
Время смешивания текстур	10 секунд
Карта высот	
Размер	1,571 x 1,199
Ортофотоплан	
Размер	5,212 x 4,288
Каналы	3, uint8
Режим смешивания	Мозаика

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

№ точки	x , м	y , м	H , м	$x_{\text{расч.}}$, м	$y_{\text{расч.}}$, м	$H_{\text{расч.}}$, м	Δx , м	Δy , м	ΔH , м
1	483272,779	4194381,37	115,39	483272,777	4194381,369	115,390	-0,002	-0,001	0,000
2	483273,428	4194394,832	115,39	483273,405	4194394,908	115,428	-0,023	0,076	0,038
3	483272,927	4194407,243	115,39	483272,904	4194407,237	115,433	-0,023	-0,006	0,043
4	483256,711	4194407,952	115,43	483256,712	4194407,954	115,430	0,001	0,002	0,000
5	483256,548	4194396,242	115,4	483256,551	4194396,258	115,402	0,003	0,016	0,002
6	483256,115	4194383,766	115,43	483256,137	4194383,805	115,361	0,022	0,039	-0,069
7	483240,149	4194385,056	115,43	483240,159	4194385,081	115,378	0,010	0,025	-0,052
8	483240,32	4194397,449	115,37	483240,325	4194397,444	115,434	0,005	-0,005	0,064
9	483240,633	4194408,493	115,37	483240,624	4194408,465	115,429	-0,009	-0,028	0,059
10	483224,836	4194409,574	115,42	483224,788	4194409,517	115,418	-0,048	-0,057	-0,002
11	483224,614	4194398,763	115,4	483224,607	4194398,715	115,415	-0,007	-0,048	0,015
12	483224,504	4194385,911	115,39	483224,505	4194385,909	115,390	0,001	-0,002	0,000
СКП определения координат точек фотограмметрической модели							0,028	0,029	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СНИМКОВ
В ПО AGISOFT PHOTOSCAN (ЖСК «ВОСТОЧНЫЙ»)



Исходные данные

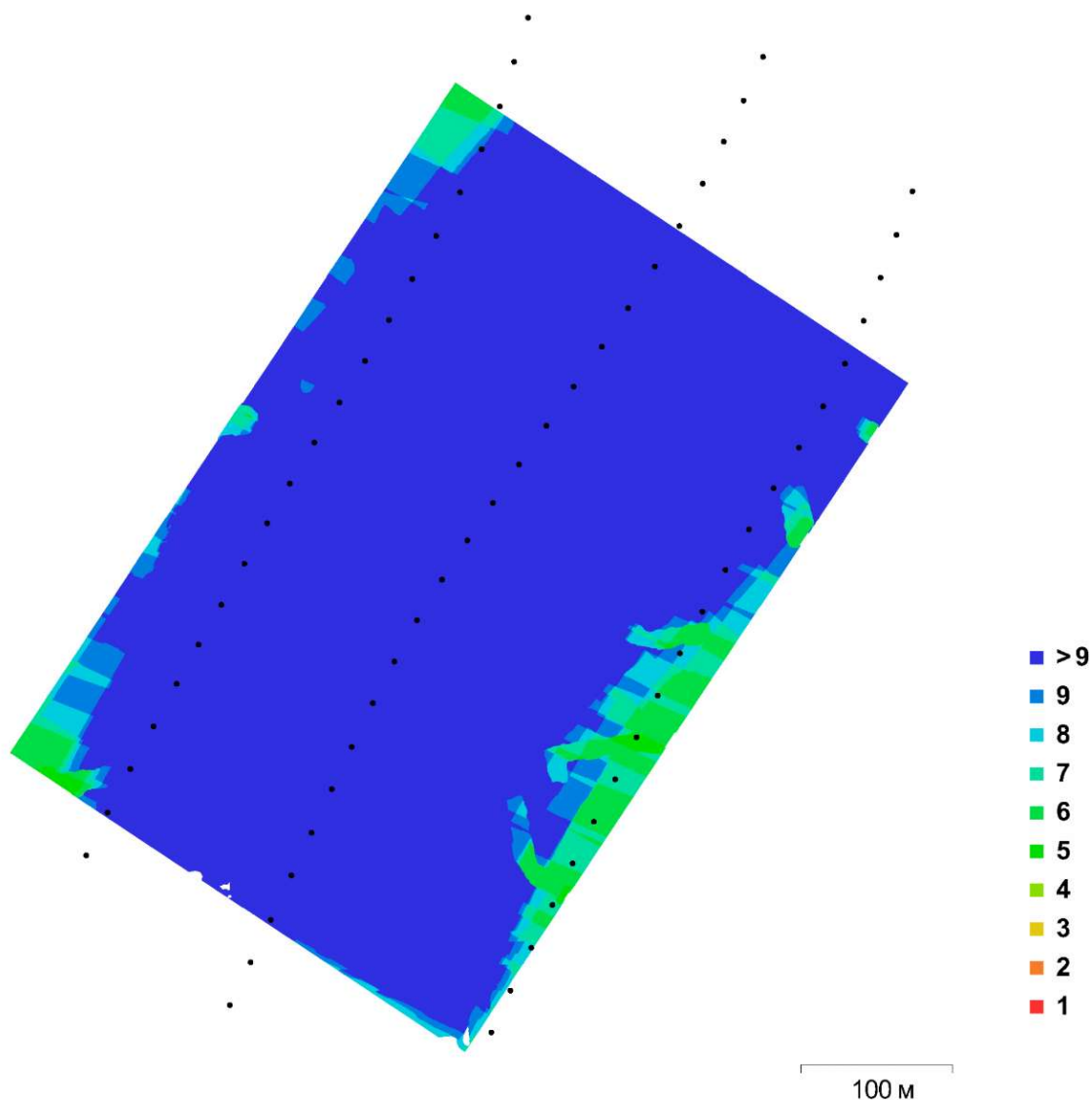


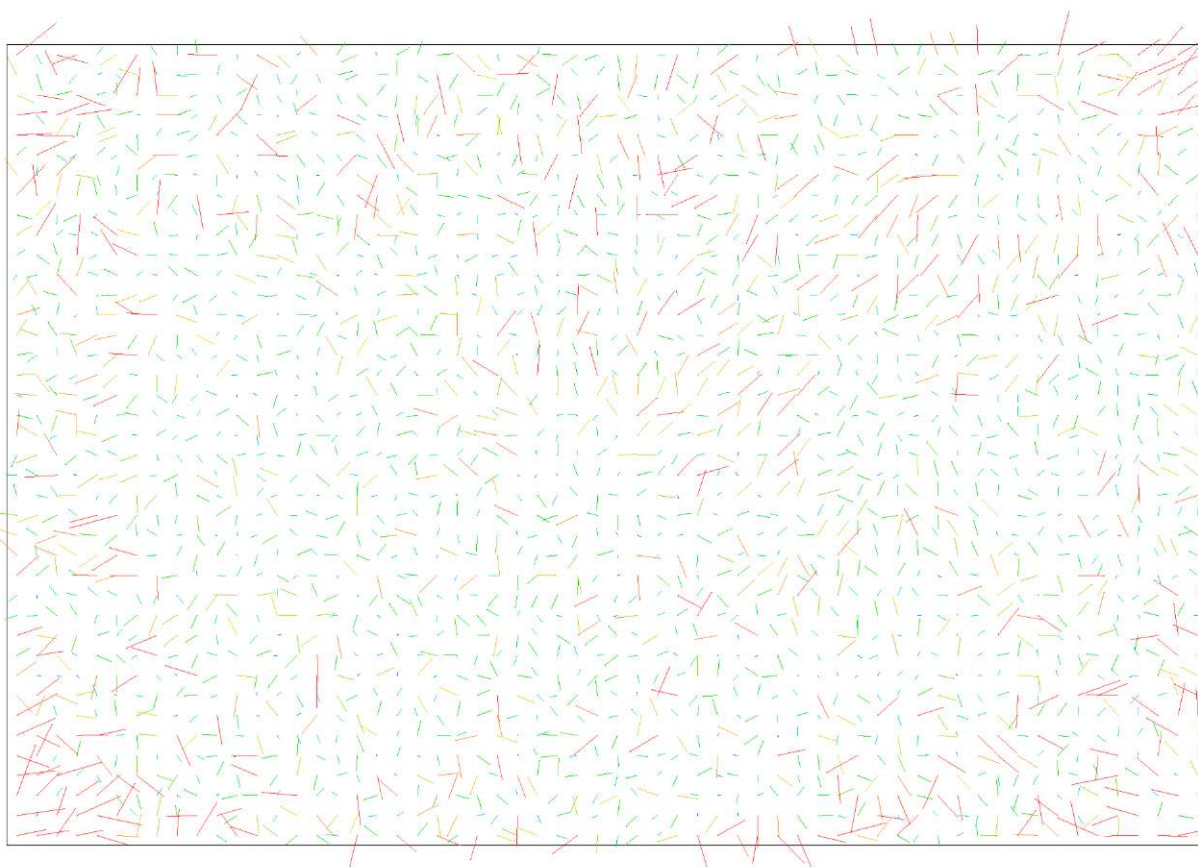
Рис. 1. Положиции камер и перекрытие изображений.

Всего изображений:	66	Позиций съёмки:	66
Высота полёта:	283 м	Связующих точек:	33,412
Разрешение съёмки:	4.98 см/пикс	Проекций:	199,970
Площадь покрытия:	1.9e+05 кв. м	Ошибка репр-я:	0.163 пикс

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя	Калибровка
ILCE-6000 (20 mm)	6000 x 4000	20 мм	4 x 4 мкм	Нет

Таблица 1. Камеры.

Калибровка камеры



1 пикс

Рис. 2. Невязка по связующим точкам для ILCE-6000 (20 mm).

ILCE-6000 (20 mm)

Разрешение 6000 x 4000	Фокусное р-е 20 мм	Размер пикселя 4 x 4 мкм	Калибровка Нет
Тип:	Кадровая	K1:	-0.15701
Fx:	5263.34	K2:	0.135972
Fy:	5265.86	K3:	0.0169443
Cx:	2919.86	K4:	0
Cy:	2001.79	P1:	-0.000144596
Skew:	2.09875	P2:	-0.00102707

Позиции съёмки

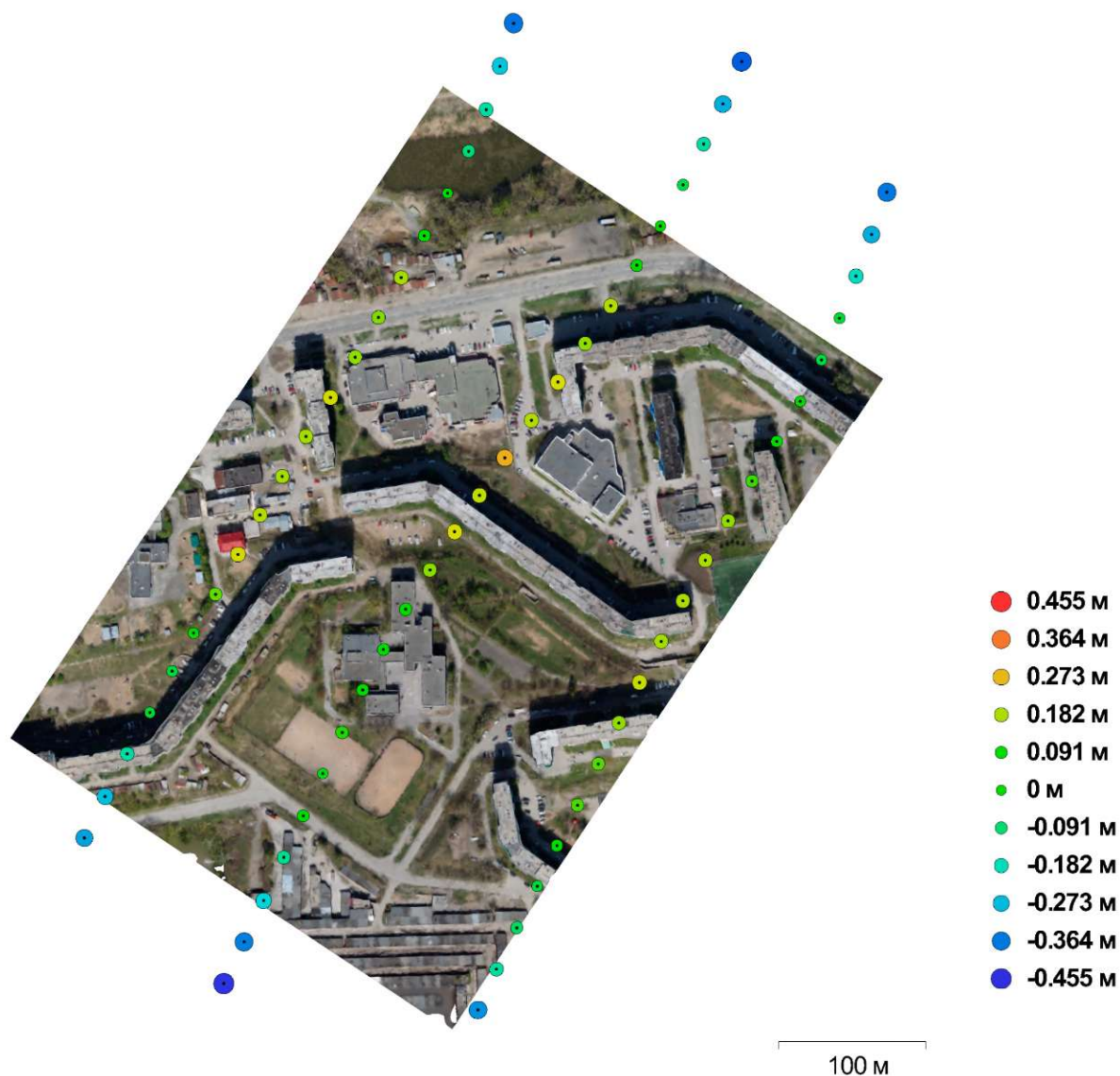


Рис. 3. Позиции съёмки и оценка ошибок.

Ошибка по Z отображается цветом эллипса. Ошибки в плане отображаются формой эллипса.

Рассчитанные позиции съёмки отмечены чёрной точкой.

Ошибка X (м)	Ошибка Y (м)	Ошибка Z (м)	Общая ошибка (м)
0.0905104	0.145811	0.1908	0.256627

Таблица 2. Средняя ошибка положений камер.

Цифровая модель местности

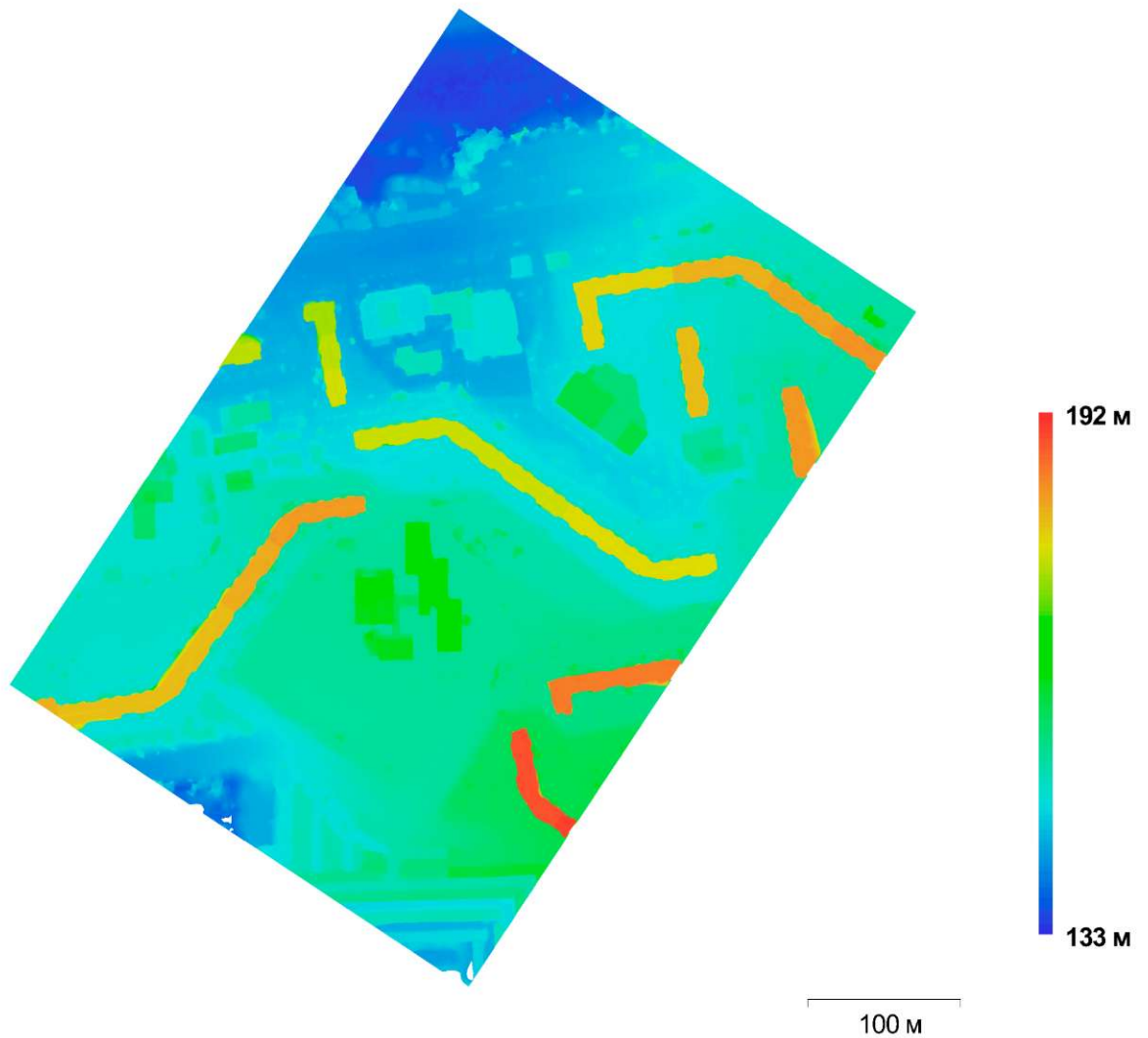


Рис. 4. Рассчитанная цифровая модель местности.

Разрешение: 19.9 см/пикс
Плотность точек: 25.2054 точек на кв. м

Параметры обработки

Основные	
Камеры	66
Выровненные камеры	66
Облако точек	
Точек	33,412 из 41,983
СК ошибка репроецирования	0.162639 (0.865402 пикс)
Макс. ошибка репроецирования	0.798406 (3.96563 пикс)
Средний размер точек	5.04669 пикс
Эффективное перекрытие	6.71093
Параметры выравнивания	
Точность	Средняя
Преселекция пар	Отключена
Макс. количество точек	40,000
Макс. количество проекций	4,000
Фильтровать соответствия по маске	Нет
Время поиска соответствий	17 минут 2 секунды
Время выравнивания	13 секунд
Параметры оптимизации	
Параметры	fx, fy, cx, cy, skew, k1-k3, p1, p2
Время оптимизации	1 секунда
Карты глубины	
Количество	66
Параметры реконструкции	
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Время обработки	38 минут 51 секунда
Плотное облако точек	
Точек	19,877,147
Параметры реконструкции	
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Время обработки	1 минута 18 секунд
Модель	
Полигонов	419,486
Вершин	211,432
Параметры реконструкции	
Тип поверхности	Произвольный
Исходные данные	Плотное облако точек
Интерполяция	Включена
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Количество полигонов	419,487
Время обработки	13 минут 53 секунды
Карта высот	
Размер	6,858 x 7,329
Ортофотоплан	
Размер	17,581 x 18,191
Каналы	3, uint8
Режим смешивания	Мозаика

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПОРНЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК
В ПО AGISOFT PHOTOSCAN (ЖСК «ВОСТОЧНЫЙ»)



Исходные данные

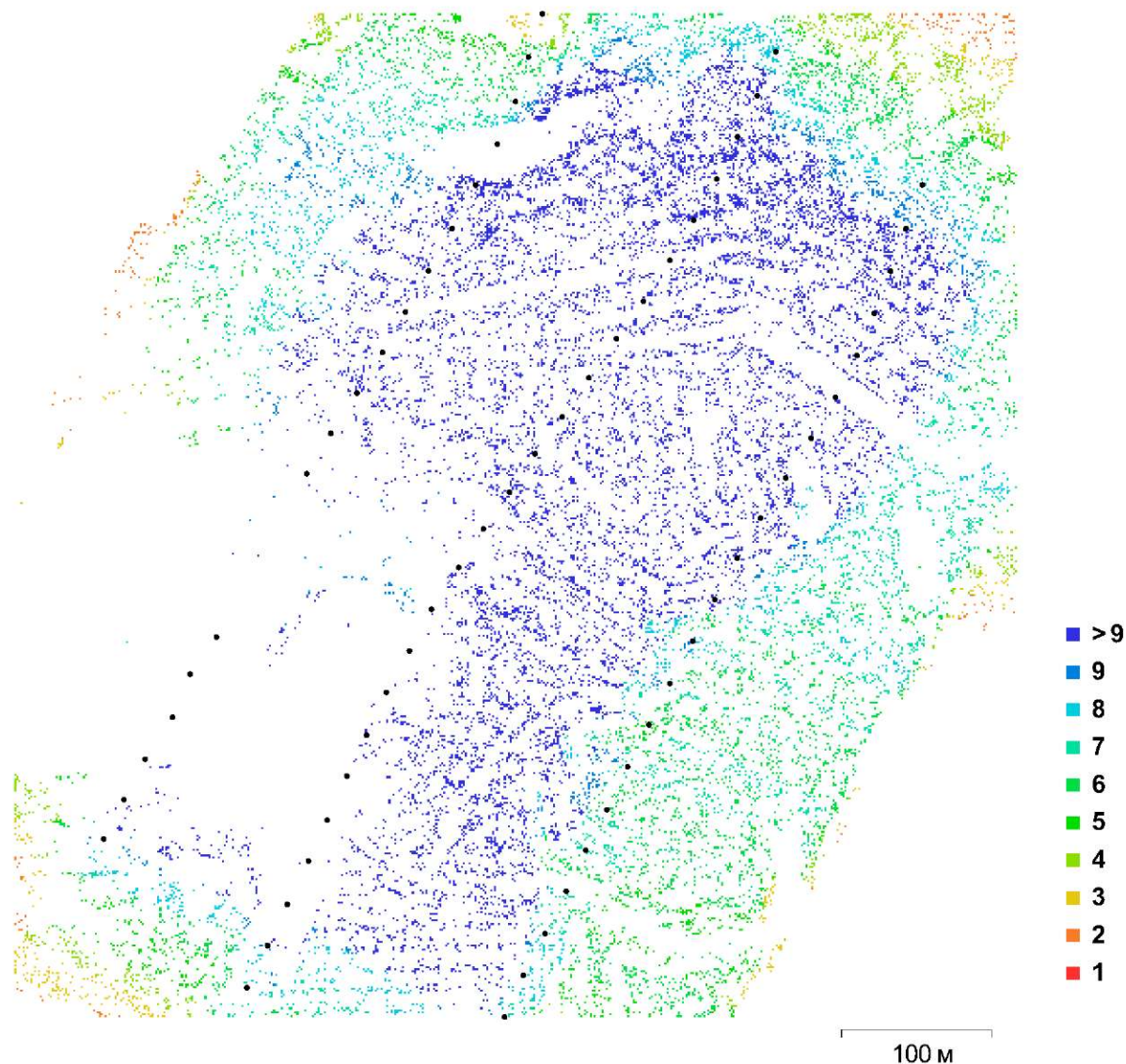


Рис. 1. Положиции камер и перекрытие изображений.

Всего изображений:	66	Позиций съёмки:	63
Высота полёта:	282 м	Связующих точек:	27,763
Разрешение съёмки:	5 см/пикс	Проекций:	157,742
Площадь покрытия:	3.39e+04 кв. м	Ошибка репр-я:	0.29 пикс

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя	Калибровка
ILCE-6000 (20 mm)	6000 x 4000	20 мм	4 x 4 мкм	Нет

Таблица 1. Камеры.

Калибровка камеры

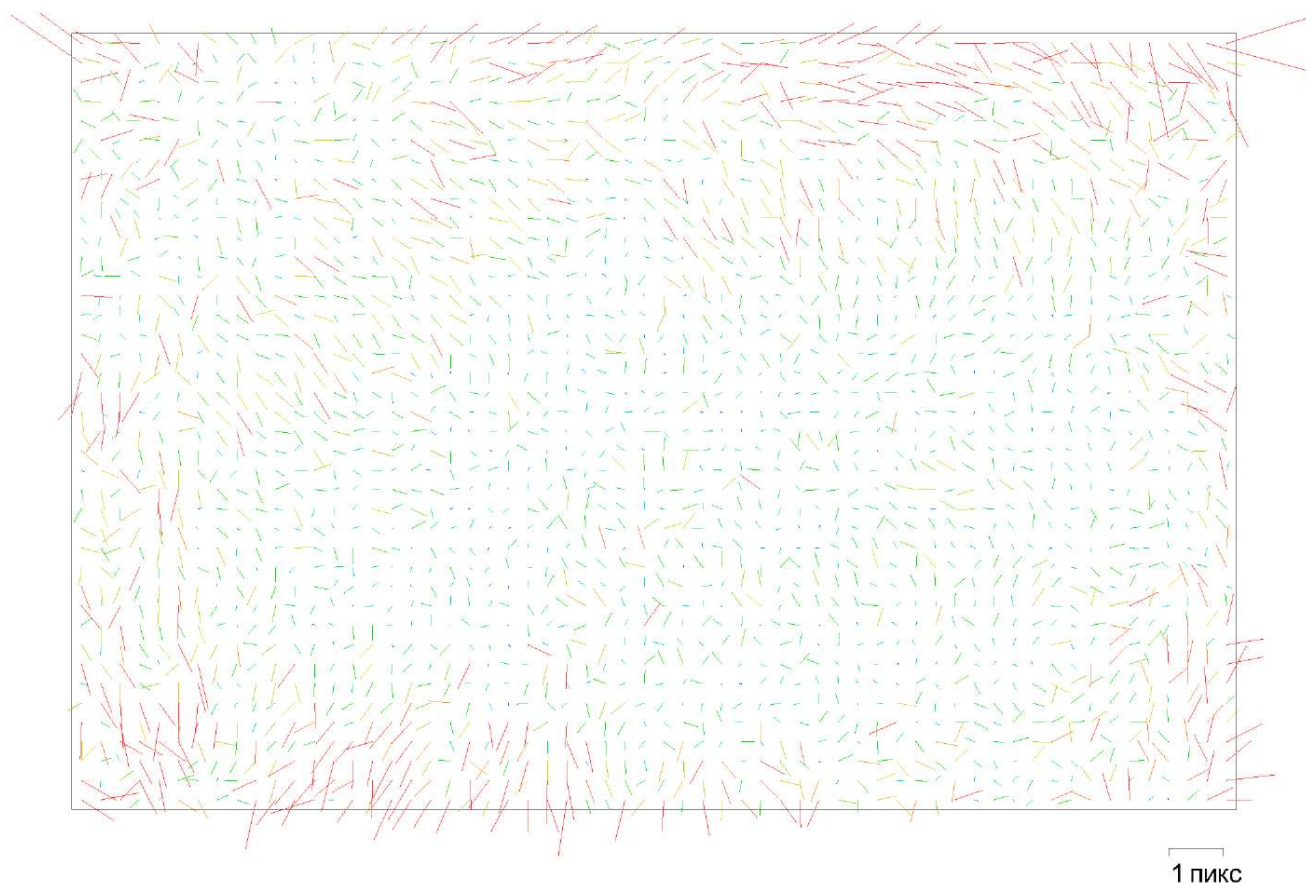


Рис. 2. Невязка по связующим точкам для ILCE-6000 (20 mm).

ILCE-6000 (20 mm)

Разрешение 6000 x 4000	Фокусное р-е 20 мм	Размер пикселя 4 x 4 мкм	Калибровка Нет
Тип:	Кадровая	K1:	-0.149283
Fx:	5164.09	K2:	0.11754
Fy:	5162.21	K3:	0.0219468
Cx:	2930.9	K4:	0
Sy:	2005.73	P1:	2.13826e-05
Skew:	-5.33298	P2:	-0.000794064

Опорные точки

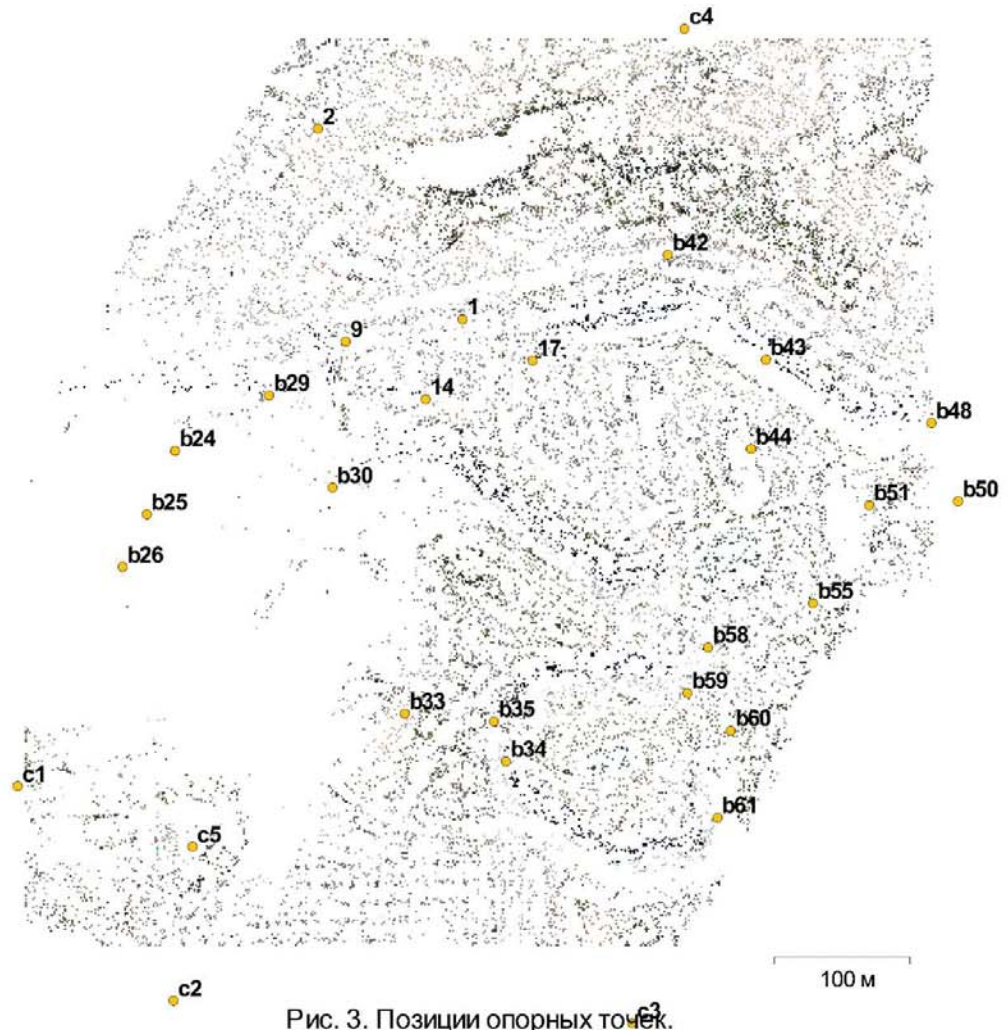


Рис. 3. Позиции опорных точек.

Название	Ошибка X (м)	Ошибка Y (м)	Ошибка Z (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
17	0.11259	0.0247802	-0.00675317	0.115483	14	0.487595
2	-0.0405403	0.0125896	0.0227373	0.0481559	8	0.203306
b24	-0.156378	-0.0441658	-0.324119	0.362571	4	0.400775
b35	0.104941	0.0504821	0.0279368	0.119756	13	0.465048
b48	-0.0620729	0.0127161	0.0869567	0.107593	7	0.872565
b61	-0.071443	0.212837	0.300732	0.37529	2	0.372033
c1	-0.0540762	0.0446393	0.139231	0.155892	4	0.461128
c2	0.0796484	-0.051315	-0.116461	0.150134	3	0.666696
c3	-0.136445	-0.0414913	0.0734122	0.1604	5	0.33277

Название	Ошибка X (м)	Ошибка Y (м)	Ошибка Z (м)	Ошибка (м)	Проекции	Ошибка (пикс)
с4	-0.0222331	-0.0441143	-0.0208126	0.0536055	6	0.491697
Общая	0.0933399	0.0768285	0.155938	0.197311		0.506141

Таблица 2. Опорные точки.

Название	Ошибка X (м)	Ошибка Y (м)	Ошибка Z (м)	Ошибка (м)	Проекции	Ошибка (пикс)
1	0.0968026	-0.104877	-0.232013	0.272396	15	0.374867
14	-0.0579631	0.0547623	0.199654	0.214989	6	0.355073
9	0.559807	0.019399	0.0775591	0.565487	12	0.553628
b25	0.209365	-0.247645	-0.378029	0.498064	4	0.52348
b26	0.228774	0.056641	-0.791755	0.826089	7	0.601287
b29	-0.406908	-0.240134	-0.167004	0.501127	9	0.534308
b30	0.0993251	0.0032924	0.0819113	0.128786	10	0.526109
b33	-0.357231	-0.233804	-0.132333	0.446979	13	0.600701
b34	0.0441853	0.0438382	0.0450879	0.0768573	10	0.540772
b42	0.29605	-0.261276	-0.0628373	0.399824	17	0.574127
b43	0.0263766	-0.188153	-0.0907824	0.210568	8	0.58
b44	-0.470195	-0.171647	0.255608	0.562034	13	0.798097
b50	-0.116927	-0.107491	0.25429	0.299816	5	0.601607
b51	-0.0743501	-0.262043	0.108842	0.293328	7	0.69812
b55	-0.427591	-0.0626598	1.20652	1.28158	6	0.771388
b58	-0.351935	0.0540985	0.345704	0.496282	6	0.496752
b59	-0.29795	-0.0676739	0.578758	0.654458	4	0.354771
b60	-0.246366	0.0587689	0.801419	0.84049	7	0.421792
с5	0.463165	0.118275	-1.12296	1.22047	11	0.579526
Общая	0.301453	0.151379	0.507375	0.609277		0.570925

Таблица 3. Проверочные точки.

Цифровая модель местности

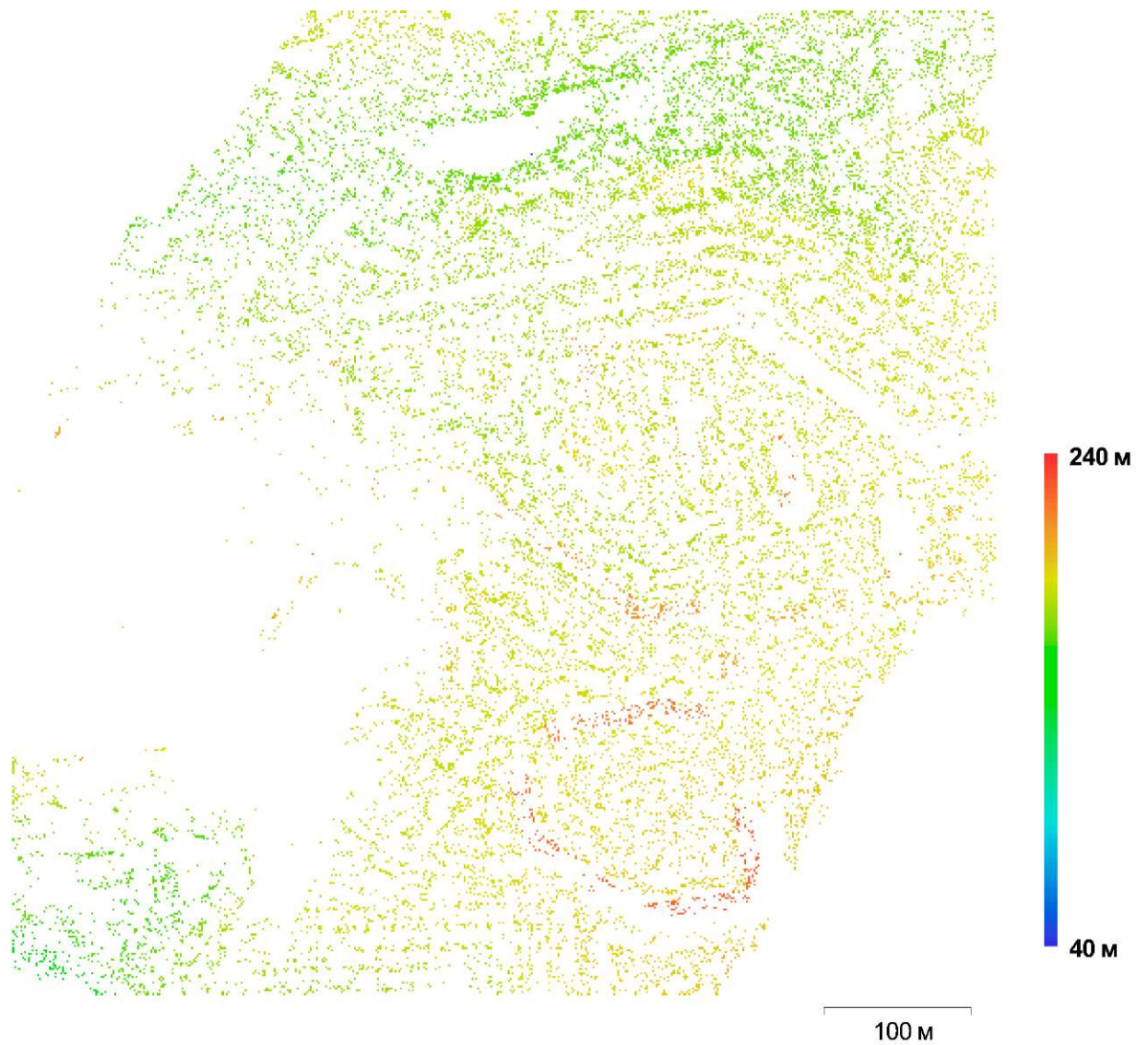


Рис. 4. Рассчитанная цифровая модель местности.

Разрешение: неизвестно

Плотность точек: неизвестно

Параметры обработки

Основные

Камеры	66
Выровненные камеры	63
Маркеры	29

Облако точек

Точек	27,763 из 41,903
СК ошибка репроецирования	0.290311 (1.50251 пикс)
Макс. ошибка репроецирования	2.77588 (7.11508 пикс)
Средний размер точек	5.12579 пикс
Эффективное перекрытие	6.71339

Параметры выравнивания

Точность	Средняя
Преселекция пар	Отключена
Макс. количество точек	40,000
Макс. количество проекций	4,000
Фильтровать соответствия по маске	Нет
Время поиска соответствий	18 минут 1 секунда
Время выравнивания	24 секунды

Параметры оптимизации

Параметры	fx, fy, cx, cy, skew, k1-k3, p1, p2
Время оптимизации	1 секунда

Карты глубины

Количество	63
------------	----

Параметры реконструкции

Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Время обработки	27 минут 6 секунд

Плотное облако точек

Точек	19,459,491
-------	------------

Параметры реконструкции

Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Время обработки	1 минута 25 секунд

Карта высот

Размер	5,946 x 7,049
--------	---------------

Ортофотоплан

Размер	17,535 x 18,231
Каналы	3, uint8
Режим смешивания	Мозаика

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
 ФРАГМЕНТА ТЕРРИТОРИИ ЖСК «ВОСТОЧНЫЙ» ГОРОДА НОВОСИБИРСКА
 (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СНИМКОВ)

№ снимка	x , м	y , м	H , м	$x_{\text{расч.}}$, м	$y_{\text{расч.}}$, м	$H_{\text{расч.}}$, м	Δx , м	Δy , м	ΔH , м
DSC00787.JPG	6103125,47	14628533,35	443,04	6103125,88	14628533,43	442,68	0,08	0,41	-0,37
DSC00788.JPG	6103096,14	14628525,11	442,88	6103096,55	14628525,06	442,63	-0,05	0,41	-0,25
DSC00789.JPG	6103066,61	14628516,39	442,19	6103066,83	14628516,48	442,03	0,08	0,22	-0,16
DSC00790.JPG	6103038,14	14628505,42	443,84	6103038,29	14628505,33	443,74	-0,09	0,15	-0,10
DSC00791.JPG	6103009,41	14628491,92	445,31	6103009,43	14628491,91	445,32	0,00	0,02	0,01
DSC00792.JPG	6102980,12	14628477,06	445,59	6102980,15	14628476,97	445,68	-0,09	0,03	0,09
DSC00793.JPG	6102951,28	14628462,08	445,87	6102951,28	14628462,00	446,04	-0,08	0,00	0,17
DSC00794.JPG	6102923,73	14628447,45	445,70	6102923,78	14628447,37	445,84	-0,08	0,05	0,14
DSC00795.JPG	6102896,23	14628432,43	445,86	6102896,36	14628432,40	446,01	-0,02	0,13	0,15
DSC00796.JPG	6102868,53	14628416,41	445,82	6102868,55	14628416,32	446,03	-0,09	0,02	0,21
DSC00797.JPG	6102841,41	14628400,53	444,33	6102841,60	14628400,54	444,50	0,01	0,18	0,17
DSC00798.JPG	6102814,09	14628385,15	444,54	6102814,07	14628385,16	444,71	0,01	-0,03	0,17
DSC00799.JPG	6102787,48	14628370,96	444,60	6102787,49	14628370,88	444,78	-0,08	0,01	0,18
DSC00800.JPG	6102760,16	14628356,72	444,06	6102760,25	14628356,66	444,27	-0,07	0,09	0,21
DSC00801.JPG	6102732,66	14628342,14	443,29	6102732,78	14628342,24	443,41	0,09	0,12	0,12
DSC00802.JPG	6102706,11	14628328,09	445,14	6102706,07	14628327,97	445,16	-0,12	-0,03	0,02
DSC00803.JPG	6102679,89	14628314,34	447,61	6102679,79	14628314,27	447,58	-0,07	-0,10	-0,04
DSC00804.JPG	6102651,49	14628299,92	448,14	6102651,34	14628299,88	448,11	-0,04	-0,14	-0,02
DSC00805.JPG	6102622,90	14628285,38	447,60	6102622,85	14628285,30	447,44	-0,08	-0,06	-0,15

DSC00806.JPG	6102593,64	14628271,17	445,35	6102593,54	14628271,16	445,09	-0,01	-0,10	-0,26
DSC00807.JPG	6102564,97	14628257,92	446,02	6102564,95	14628257,92	445,73	-0,01	-0,02	-0,30
DSC01011.JPG	6102469,10	14628355,39	445,39	6102468,92	14628355,44	444,95	0,05	-0,18	-0,44
DSC01012.JPG	6102497,74	14628368,31	445,01	6102497,61	14628368,37	444,66	0,06	-0,13	-0,35
DSC01013.JPG	6102526,13	14628380,71	444,74	6102525,95	14628380,83	444,51	0,11	-0,18	-0,24
DSC01014.JPG	6102555,74	14628393,62	445,64	6102555,67	14628393,66	445,51	0,04	-0,08	-0,13
DSC01015.JPG	6102584,19	14628405,93	446,18	6102584,18	14628406,11	446,25	0,18	-0,01	0,07
DSC01016.JPG	6102613,38	14628418,42	445,92	6102613,32	14628418,60	445,91	0,18	-0,07	-0,01
DSC01017.JPG	6102641,50	14628430,74	446,49	6102641,52	14628430,94	446,59	0,20	0,02	0,10
DSC01018.JPG	6102670,86	14628443,84	445,97	6102670,81	14628444,02	446,03	0,19	-0,05	0,07
DSC01019.JPG	6102698,86	14628457,22	445,06	6102698,71	14628457,39	445,12	0,17	-0,14	0,06
DSC01020.JPG	6102726,52	14628471,46	443,67	6102726,34	14628471,58	443,76	0,12	-0,19	0,09
DSC01021.JPG	6102753,75	14628487,21	443,44	6102753,56	14628487,33	443,58	0,12	-0,19	0,14
DSC01022.JPG	6102780,17	14628503,32	444,17	6102779,96	14628503,31	444,38	-0,01	-0,21	0,21
DSC01023.JPG	6102805,32	14628519,37	444,88	6102805,13	14628519,48	445,07	0,11	-0,18	0,19
DSC01024.JPG	6102831,14	14628536,01	445,76	6102831,00	14628535,93	446,04	-0,08	-0,14	0,28
DSC01025.JPG	6102857,28	14628553,22	445,67	6102857,07	14628553,27	445,85	0,06	-0,21	0,18
DSC01026.JPG	6102883,60	14628570,55	445,86	6102883,42	14628570,52	446,08	-0,03	-0,17	0,21
DSC01027.JPG	6102910,37	14628588,23	446,54	6102910,19	14628588,29	446,69	0,05	-0,19	0,15
DSC01028.JPG	6102936,43	14628604,88	446,65	6102936,22	14628604,88	446,83	0,00	-0,20	0,18
DSC01029.JPG	6102964,33	14628621,74	445,37	6102964,17	14628621,80	445,45	0,05	-0,17	0,08
DSC01030.JPG	6102991,52	14628636,95	443,96	6102991,33	14628637,09	443,98	0,14	-0,19	0,02
DSC01031.JPG	6103019,85	14628651,52	443,16	6103019,72	14628651,66	443,11	0,14	-0,13	-0,04
DSC01032.JPG	6103047,94	14628664,76	443,20	6103047,79	14628664,85	443,05	0,08	-0,15	-0,15
DSC01033.JPG	6103075,41	14628676,97	443,46	6103075,32	14628677,12	443,17	0,15	-0,08	-0,29
DSC01034.JPG	6103104,59	14628688,95	443,51	6103104,50	14628689,13	443,12	0,18	-0,09	-0,39
DSC01105.JPG	6103018,56	14628790,19	442,96	6103018,63	14628790,15	442,60	-0,04	0,06	-0,36

DSC01106.JPG	6102989,60	14628780,53	442,21	6102989,65	14628780,50	441,92	-0,03	0,05	-0,29
DSC01107.JPG	6102961,12	14628770,83	443,43	6102961,10	14628770,81	443,24	-0,02	-0,02	-0,19
DSC01108.JPG	6102932,27	14628760,54	445,30	6102932,28	14628760,43	445,27	-0,11	0,00	-0,03
DSC01109.JPG	6102903,62	14628748,96	446,27	6102903,65	14628748,99	446,23	0,03	0,02	-0,04
DSC01110.JPG	6102875,12	14628735,47	445,71	6102875,09	14628735,37	445,72	-0,10	-0,03	0,02
DSC01111.JPG	6102847,42	14628720,33	446,88	6102847,45	14628720,21	446,93	-0,12	0,03	0,05
DSC01112.JPG	6102820,17	14628704,29	447,37	6102820,16	14628704,23	447,47	-0,06	-0,01	0,10
DSC01113.JPG	6102792,57	14628688,79	447,00	6102792,59	14628688,74	447,16	-0,05	0,02	0,16
DSC01114.JPG	6102765,33	14628674,13	446,74	6102765,39	14628674,09	446,92	-0,05	0,06	0,18
DSC01115.JPG	6102737,28	14628659,67	446,30	6102737,42	14628659,61	446,47	-0,07	0,14	0,17
DSC01116.JPG	6102709,32	14628645,69	446,06	6102709,47	14628645,67	446,23	-0,02	0,15	0,17
DSC01117.JPG	6102681,00	14628631,83	446,10	6102681,22	14628631,77	446,30	-0,06	0,22	0,20
DSC01118.JPG	6102653,17	14628618,58	445,63	6102653,31	14628618,52	445,78	-0,06	0,14	0,16
DSC01119.JPG	6102625,07	14628605,40	445,59	6102625,16	14628605,34	445,71	-0,07	0,09	0,12
DSC01120.JPG	6102596,57	14628592,07	445,37	6102596,75	14628592,02	445,48	-0,05	0,18	0,11
DSC01121.JPG	6102568,72	14628578,91	445,37	6102568,90	14628578,86	445,44	-0,05	0,18	0,07
DSC01122.JPG	6102540,89	14628566,39	444,26	6102541,07	14628566,28	444,23	-0,11	0,18	-0,03
DSC01123.JPG	6102512,17	14628553,32	443,38	6102512,40	14628553,20	443,31	-0,13	0,23	-0,07
DSC01124.JPG	6102483,70	14628540,38	443,07	6102483,85	14628540,20	442,92	-0,19	0,15	-0,15
DSC01125.JPG	6102455,77	14628528,61	444,31	6102455,88	14628528,38	443,99	-0,22	0,11	-0,32

115

СКП определения координат центров проектирования	0,37	0,32
--	------	------

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ФРАГМЕНТА ТЕРРИТОРИИ ЖСК «ВОСТОЧНЫЙ» ГОРОДА НОВОСИБИРСКА
(С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПОРНЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК)

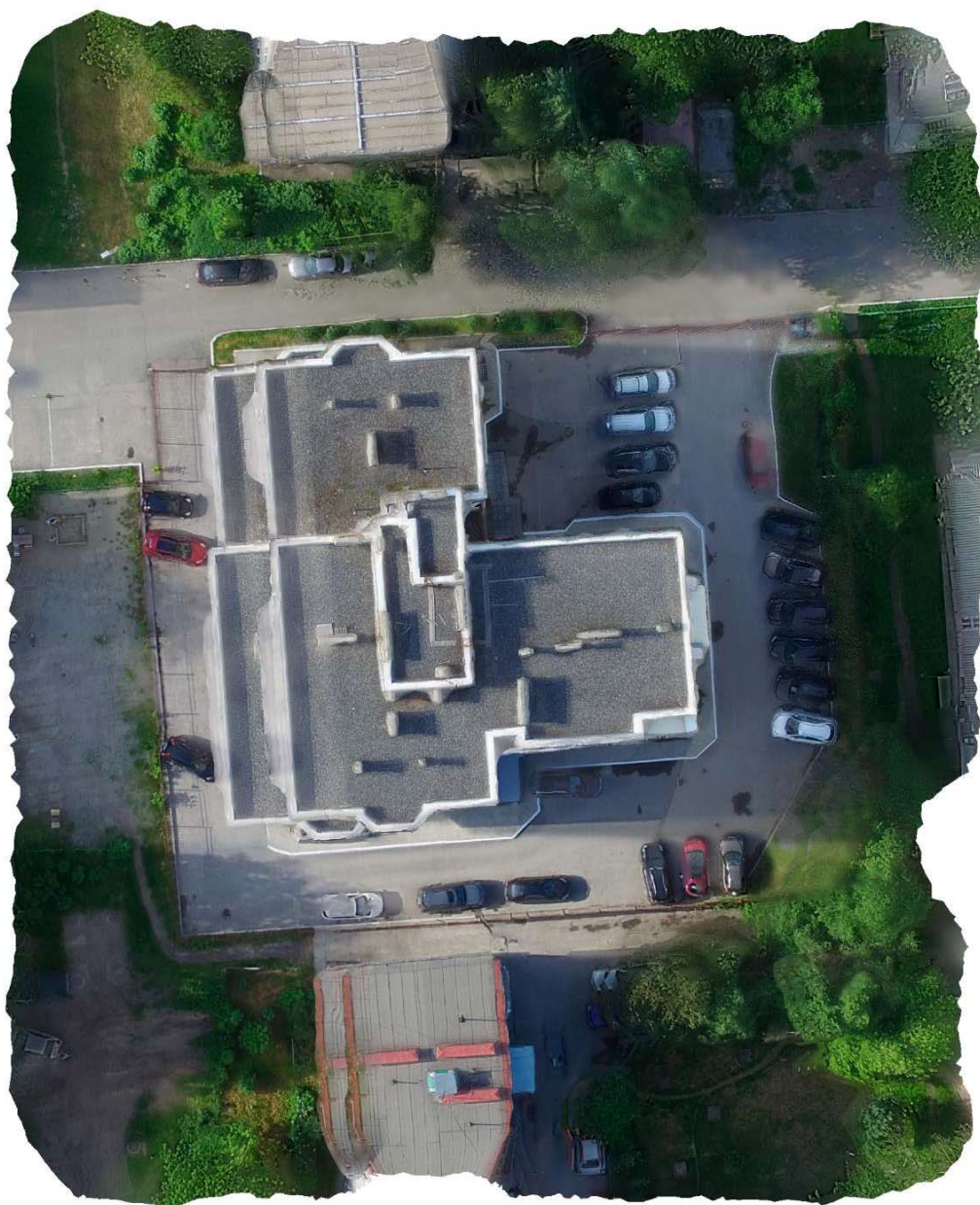
№ точки	x , м	y , м	H , м	$x_{расч.}$, м	$y_{расч.}$, м	$H_{расч.}$, м	Δx , м	Δy , м	ΔH , м
1	21756,11	23517,69	175,24	21756,20	23517,58	175,01	0,10	-0,10	-0,23
14	21729,17	23461,26	174,82	21729,11	23461,31	175,02	-0,06	0,05	0,20
9	21669,84	23501,81	174,24	21670,40	23501,83	174,32	0,56	0,02	0,08
b25	21523,74	23380,84	181,36	21523,95	23380,59	180,98	0,21	-0,25	-0,38
b26	21505,90	23343,63	181,78	21506,13	23343,69	180,99	0,23	0,06	-0,79
b29	21614,29	23464,32	175,74	21613,89	23464,08	175,57	-0,41	-0,24	-0,17
b30	21660,54	23399,39	179,19	21660,64	23399,40	179,27	0,10	0,00	0,08
b33	21714,20	23241,06	185,81	21713,84	23240,83	185,68	-0,36	-0,23	-0,13
b34	21788,23	23207,17	190,70	21788,27	23207,22	190,75	0,04	0,04	0,05
b42	21907,14	23562,99	181,10	21907,44	23562,72	181,04	0,30	-0,26	-0,06
b43	21979,61	23489,37	184,26	21979,63	23489,18	184,17	0,03	-0,19	-0,09
b44	21969,17	23426,95	184,65	21968,70	23426,78	184,91	-0,47	-0,17	0,26
b50	22121,26	23389,86	191,05	22121,14	23389,76	191,30	-0,12	-0,11	0,25
b51	22055,80	23387,29	187,16	22055,73	23387,02	187,27	-0,07	-0,26	0,11
b55	22014,74	23318,29	186,96	22014,31	23318,22	188,17	-0,43	-0,06	1,21
b58	21937,40	23287,25	188,07	21937,05	23287,31	188,42	-0,35	0,05	0,35
b59	21922,08	23255,36	187,69	21921,79	23255,30	188,27	-0,30	-0,07	0,58
b60	21954,00	23228,74	189,58	21953,75	23228,80	190,38	-0,25	0,06	0,80
c5	21557,05	23147,32	165,73	21557,51	23147,44	164,61	0,46	0,12	-1,12

СКП определения координат опорных точек							0,11		0,15
2	21650,00	23651,28	171,66	21649,96	23651,30	171,68	-0,04	0,01	0,02
17	21807,86	23488,40	179,01	21807,97	23488,43	179,00	0,11	0,02	-0,01
b35	21779,39	23235,26	186,81	21779,49	23235,31	186,84	0,10	0,05	0,03
b24	21544,87	23425,24	176,70	21544,71	23425,20	176,38	-0,16	-0,04	-0,32
b48	22101,59	23444,74	188,10	22101,53	23444,75	188,19	-0,06	0,01	0,09
b61	21944,14	23167,58	194,22	21944,07	23167,79	194,52	-0,07	0,21	0,30
c1	21428,85	23189,80	185,95	21428,80	23189,84	186,09	-0,05	0,04	0,14
c2	21543,46	23039,44	168,04	21543,54	23039,39	167,92	0,08	-0,05	-0,12
c3	21881,39	23023,79	193,66	21881,26	23023,75	193,73	-0,14	-0,04	0,07
c4	21919,73	23721,32	178,53	21919,71	23721,28	178,51	-0,02	-0,04	-0,02
СКП определения координат контрольных точек							0,32		0,51

ПРИЛОЖЕНИЕ И

(обязательное)

ОТЧЕТ О ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
В ПО AGISOFT PHOTOSCAN (ОБЪЕКТ НЕДВИЖИМОСТИ)



Исходные данные

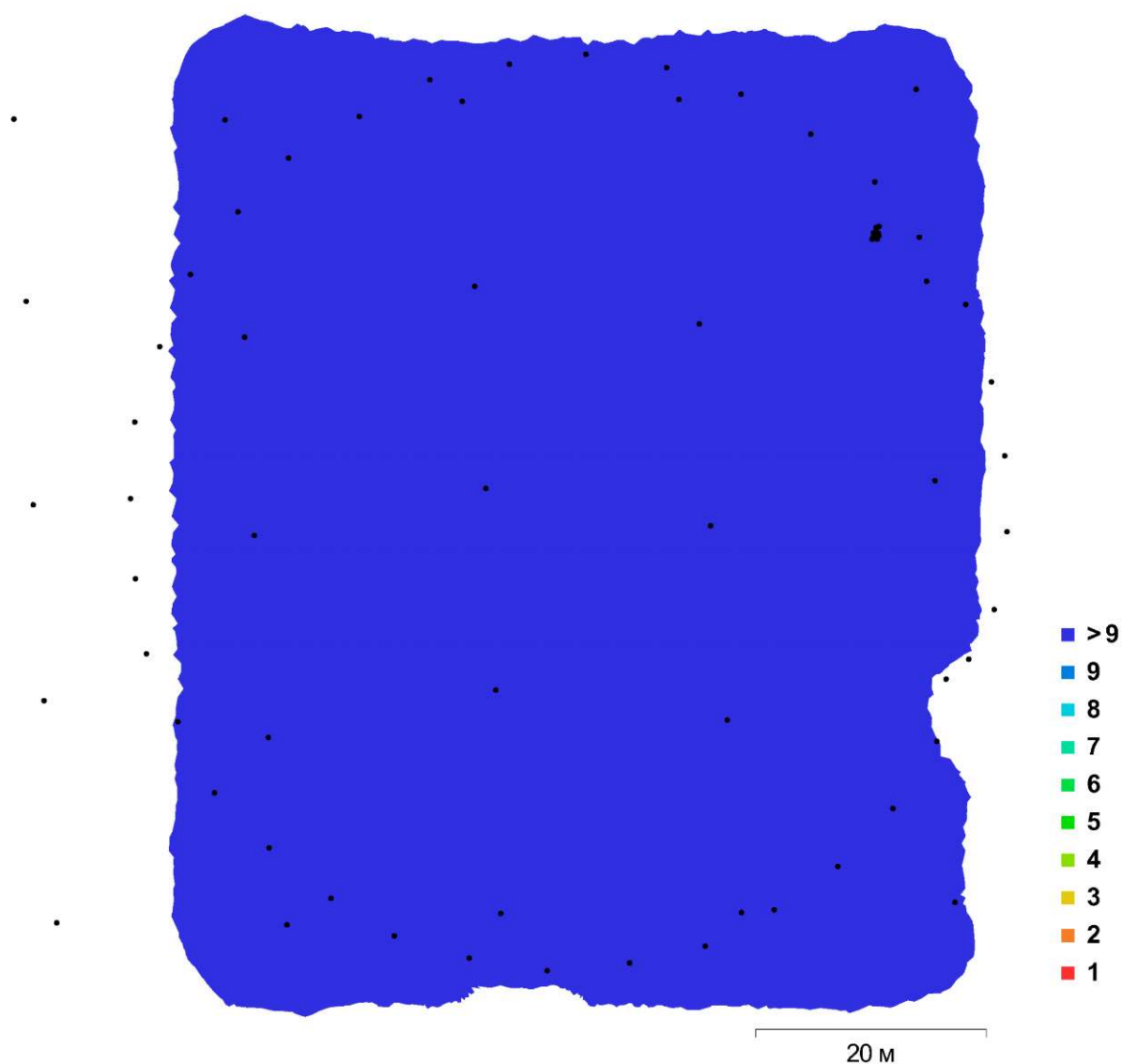


Рис. 1. Положениа камер и перекрытие изображений.

Всего изображений:	79	Позиций съёмки:	79
Высота полёта:	76.5 м	Связующих точек:	54,572
Разрешение съёмки:	2.7 см/пикс	Проекций:	212,823
Площадь покрытия:	5.79e+03 кв. м	Ошибка репр-я:	0.27 пикс

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя	Калибровка
FC300X (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 мм	1.56 x 1.56 мкм	Нет

Таблица 1. Камеры.

Калибровка камеры

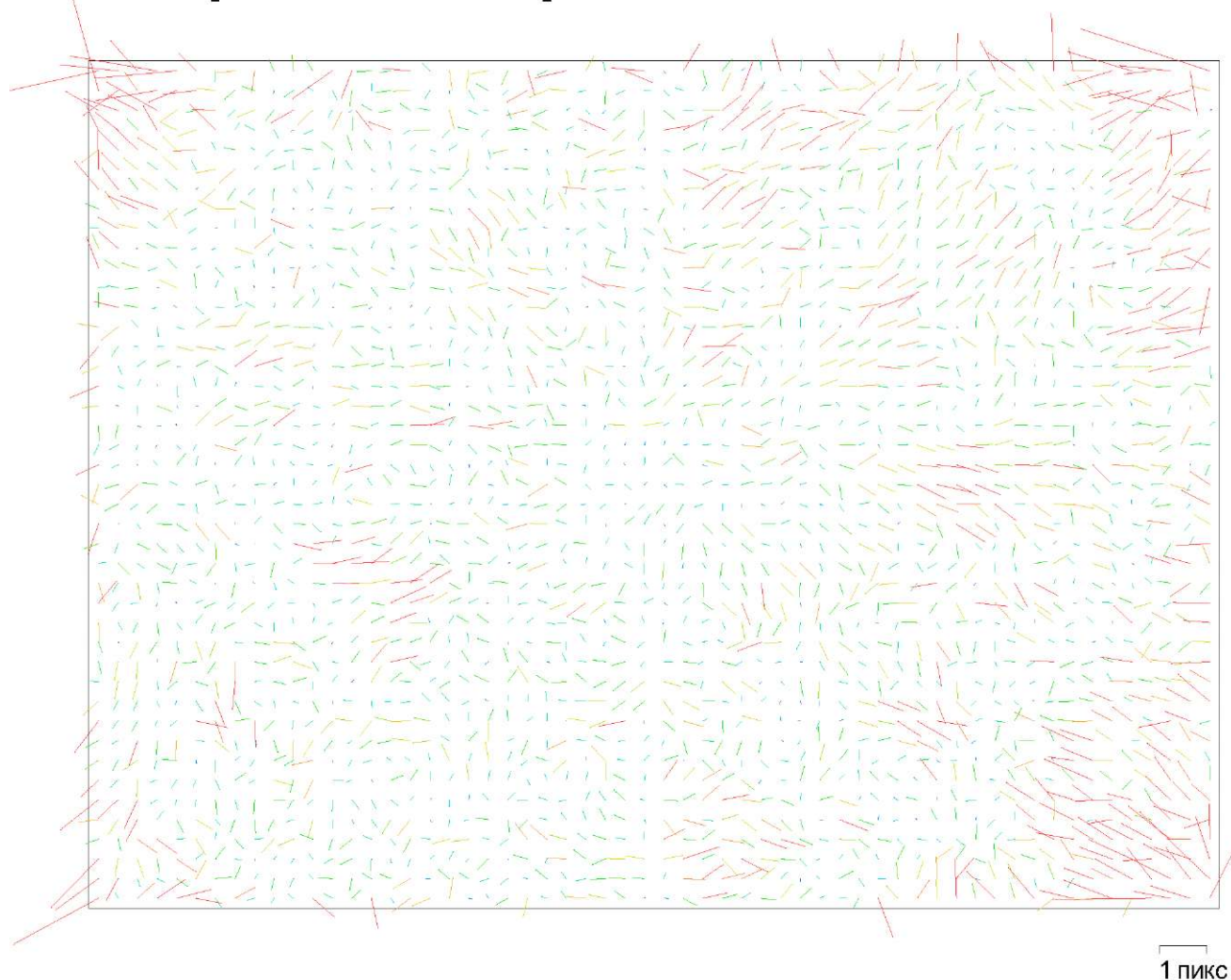


Рис. 2. Невязка по связующим точкам для FC300X (3.61 mm).

FC300X (3.61 mm)

Разрешение 4000 x 3000	Фокусное p-e 3.61 мм	Размер пикселя 1.56 x 1.56 мкм	Калибровка Нет
Тип:	Кадровая	K1:	-0.0096786
Fx:	2335.23	K2:	0.0100477
Fy:	2339.52	K3:	0.00272646
Cx:	1976.73	K4:	0
Cy:	1493.85	P1:	-8.15134e-05
Skew:	-0.738265	P2:	0.000259198

Опорные точки

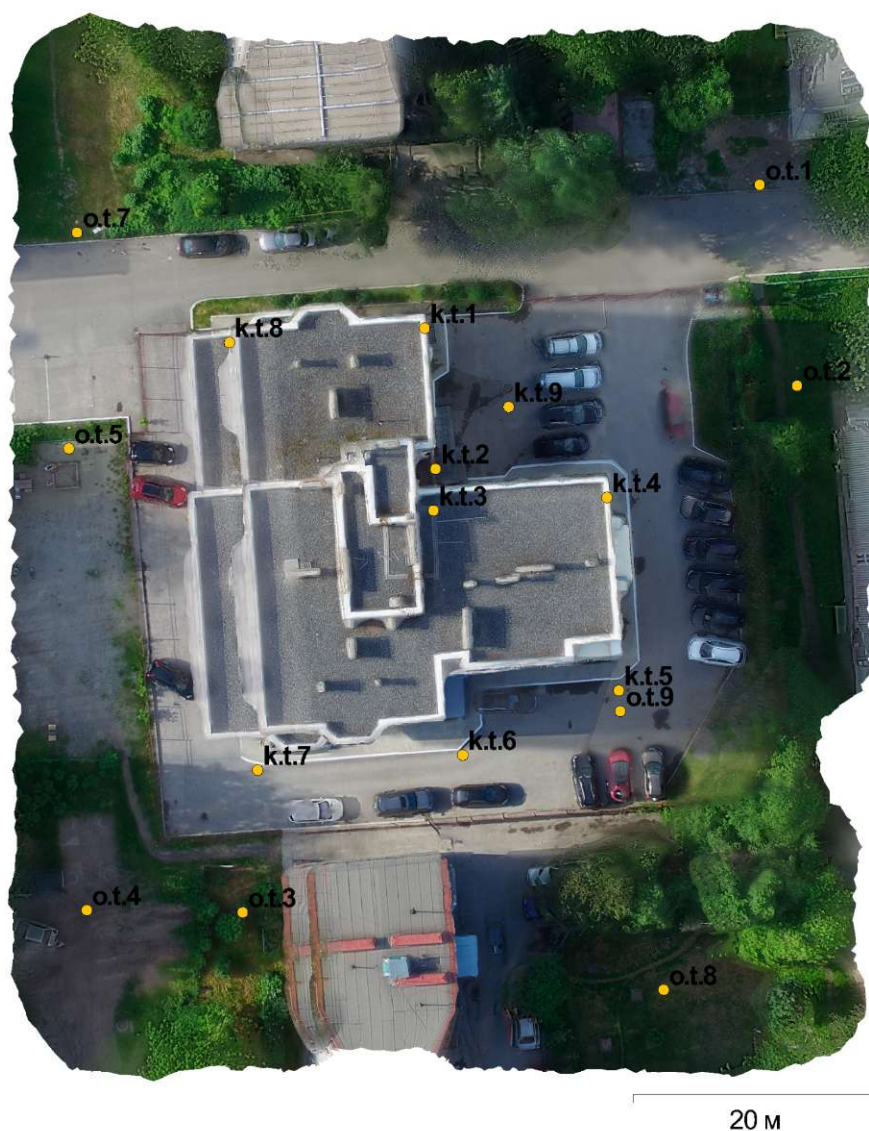


Рис. 3. Позиции опорных точек.

Название	Ошибка X (м)	Ошибка Y (м)	Ошибка Z (м)	Ошибка (м)	Проекции	Ошибка (пикс)
o.t.1	-0.00633983	0.0177477	-0.00799815	0.020473	45	0.668478
o.t.2	0.0205548	-0.0134353	-0.0667188	0.0710944	28	0.663803
o.t.3	0.00396902	-0.00921816	0.0208826	0.0231692	36	0.645108
o.t.4	0.00121411	-0.028426	-0.0975221	0.101588	45	0.631824
o.t.5	0.0331163	0.00901998	-0.00389441	0.034543	37	0.65135
o.t.7	-0.0154263	0.00415455	0.0675203	0.0693846	51	0.673342
o.t.8	-0.0374988	0.0199292	0.0949101	0.103977	19	1.22864
Общая	0.0214501	0.0164068	0.0632954	0.0688156		0.713565

Таблица 2. Опорные точки.

Название	Ошибка X (м)	Ошибка Y (м)	Ошибка Z (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
k.t.1	0.124133	0.0336909	-0.308589	0.334322	45	1.23793
k.t.2	0.253544	0.046685	-0.154238	0.300422	32	1.38736
k.t.3	-0.166181	-0.072076	-0.165071	0.24507	29	1.33222
k.t.4	0.174947	0.000402195	-0.258081	0.311789	40	1.37658
k.t.5	0.16644	-0.0635865	-0.340044	0.383895	46	1.10765
k.t.6	0.164077	-0.0820455	-0.191406	0.265121	22	1.24857
k.t.7	0.0362252	-0.169928	-0.432331	0.465938	22	0.785208
k.t.8	-0.00738049	-0.0058563	-1.43226	1.43229	32	1.0825
o.t.9	0.164047	-0.13648	-0.373329	0.430015	48	0.795505
k.t.9	-0.0537995	0.0649801	-0.530336	0.537004	41	1.00646
Общая	0.14957	0.0842872	0.549913	0.57609		1.14926

Таблица 3. Проверочные точки.

Цифровая модель местности

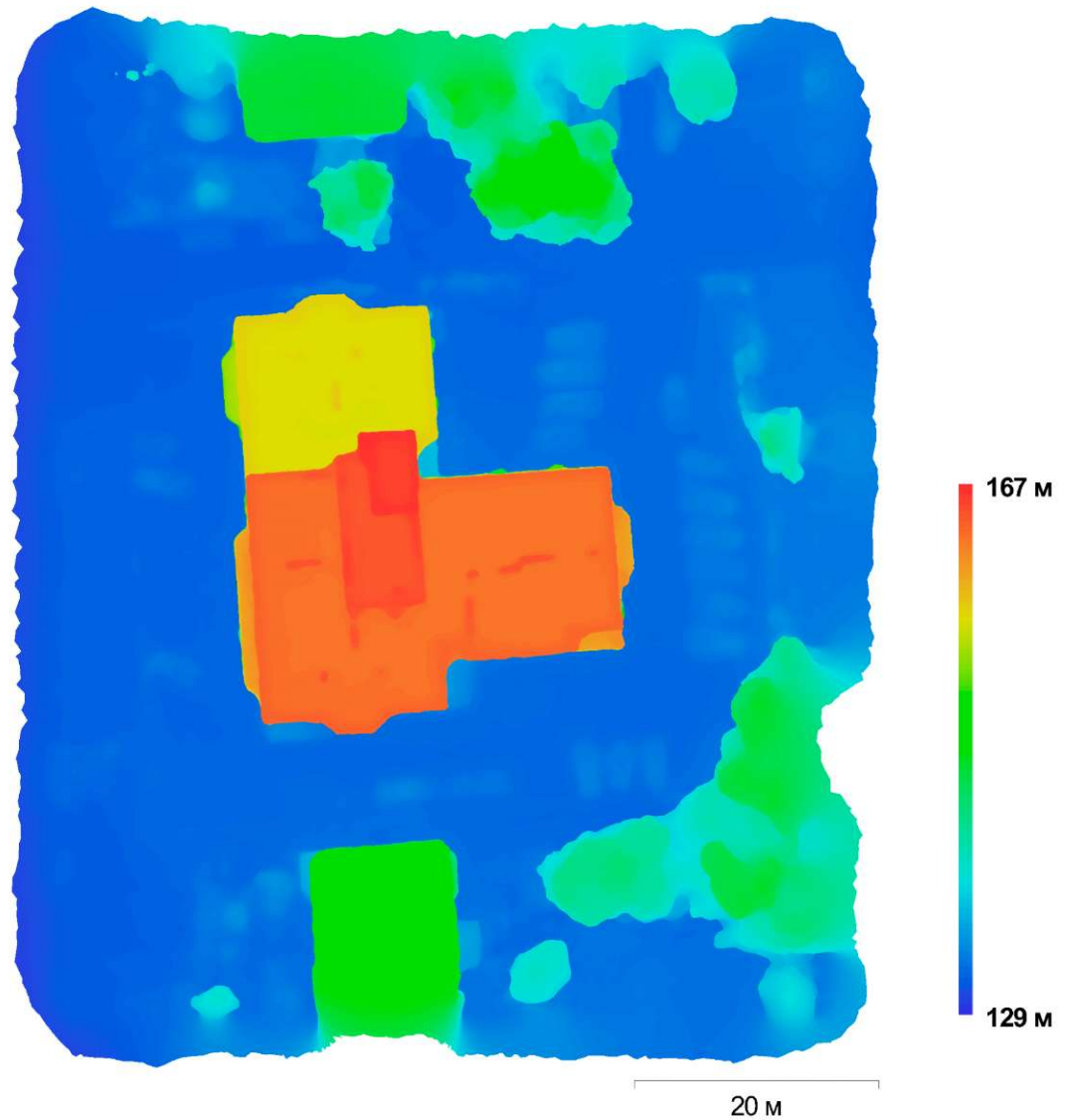


Рис. 4. Рассчитанная цифровая модель местности.

Разрешение: 10.8 см/пикс
Плотность точек: 85.6686 точек на кв. м

Параметры обработки

Основные	
Камеры	79
Выровненные камеры	79
Маркеры	17
Облако точек	
Точек	54,572 из 68,682
СК ошибка репроецирования	0.269646 (2.26583 пикс)
Макс. ошибка репроецирования	1.58783 (6.94639 пикс)
Средний размер точек	7.70528 пикс
Эффективное перекрытие	4.56061
Параметры выравнивания	
Точность	Средняя
Преселекция пар	Отключена
Макс. количество точек	40,000
Макс. количество проекций	4,000
Фильтровать соответствия по маске	Нет
Время поиска соответствий	7 минут 32 секунды
Время выравнивания	15 секунд
Параметры оптимизации	
Параметры	fx, fy, cx, cy, skew, k1-k3, p1, p2
Время оптимизации	1 секунда
Карты глубины	
Количество	79
Параметры реконструкции	
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Время обработки	1 час 57 минут
Плотное облако точек	
Точек	1,503,027
Параметры реконструкции	
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Время обработки	4 минуты 22 секунды
Модель	
Полигонов	70,949
Вершин	35,917
Текстура	4,096 x 4,096, uint8
Параметры реконструкции	
Тип поверхности	Произвольный
Исходные данные	Плотное облако точек
Интерполяция	Включена
Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Количество полигонов	70,950
Время обработки	48 секунд
Параметры текстурирования	
Режим параметризации	Ортофото
Режим смешивания	Мозаика
Размер текстуры	4,096 x 4,096
Время параметризации	0 секунд
Время смешивания текстур	56 секунд
Карта высот	
Размер	2,543 x 2,662
Ортофотоплан	
Размер	4,035 x 3,938
Каналы	3, uint8
Режим смешивания	Мозаика

ПРИЛОЖЕНИЕ К

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ОБЪЕКТА НЕДВИЖИМОСТИ

№ точки	x , м	y , м	H , м	$x_{расч.}$, м	$y_{расч.}$, м	$H_{расч.}$, м	Δx , м	Δy , м	ΔH , м
o.t.1	482476,11	4195015,03	132,08	482476,13	4195015,01	132,37	0,02	-0,01	0,29
o.t.2	482460,57	4195018,05	132,54	482460,56	4195018,07	132,30	-0,01	0,02	-0,24
o.t.3	482419,76	4194972,89	131,85	482419,75	4194972,90	131,61	-0,01	0,01	-0,24
o.t.4	482419,95	4194960,20	131,35	482419,92	4194960,19	131,72	-0,03	-0,01	0,37
o.t.5	482455,69	4194958,71	131,36	482455,69	4194958,74	131,16	0,01	0,04	-0,20
o.t.7	482472,41	4194959,41	131,14	482472,42	4194959,40	131,13	0,01	-0,01	-0,01
o.t.8	482413,73	4195007,24	132,39	482413,75	4195007,20	132,38	0,02	-0,03	-0,01
СКП определения координат опорных точек							0,029		0,033
k.t.1	482464,98	4194987,61	132,12	482465,01	4194987,73	131,72	0,03	0,13	-0,40
k.t.2	482454,06	4194988,36	132,62	482454,10	4194988,63	131,23	0,04	0,28	-1,39
k.t.3	482450,96	4194988,61	132,62	482450,88	4194988,47	131,27	-0,08	-0,14	-1,35
k.t.4	482451,90	4195002,40	132,42	482451,90	4195002,57	132,10	0,00	0,17	-0,32
k.t.5	482437,00	4195003,38	132,26	482436,94	4195003,54	132,55	-0,06	0,16	0,29
k.t.6	482432,02	4194990,66	132,33	482431,94	4194990,83	131,90	-0,08	0,17	-0,43
k.t.7	482430,95	4194974,08	132,06	482430,78	4194974,11	131,77	-0,17	0,03	-0,29
k.t.8	482463,91	4194971,82	133,02	482463,90	4194971,82	131,34	-0,01	0,00	-1,68
СКП определения координат контрольных точек							0,046		0,061