

На правах рукописи

Опритова Ольга Анатольевна



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

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2018

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

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
Хлебникова Татьяна Александровна.

Официальные оппоненты:

Чибуничев Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», заведующий кафедрой фотограмметрии;

Быков Леонид Васильевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина», доцент кафедры геодезии и дистанционного зондирования землеустроительного факультета.

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

Защита состоится 20 декабря 2018 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

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

Автореферат разослан 26 октября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.  
Подписано в печать 17.10.2018. Формат 60 × 84 1/16.  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 156.  
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*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 геопространственные 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 геопространственных 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 геопространства, 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

*В первом разделе* выполнен анализ современной нормативно-технической литературы в области проведения аэрофотосъемочных работ и создания пространственных моделей местности.

На основании анализа выявлены проблемы, препятствующие эффективно-му использованию БПЛА для решения задач геодезии и картографии. Проблемы заключаются в том, что в нормативных документах приведены требования к материалам, полученным пленочными аэрофотоаппаратами, которые в настоящее время не используются. Анализ показал, что нормативные требования к аэрофотосъемочной системе, ее составу и техническим характеристикам, к проектированию АФС и выбору ее параметров; к фотографическому и фотограмметрическому качеству материалов АФС; к комплектности и оформлению материалов топографической АФС не соответствуют современному измерительному технологическому оборудованию и нуждаются в актуализации.

В существующих документах сформулированы требования к созданию пространственных моделей местности 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 геоинформационных технологий требует иного подхода при формировании требований к сбору и обработке исходных данных для создания цифровых моделей геопространства.

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

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

Этапы сбора и обработки данных	Отсутствующие требования
1 Аэрофотосъемочные работы	– размер проекции пикселя на местности; – допустимая максимальная высота фотографирования; – максимальный эффективный угол поля зрения объектива съемочной камеры
2 Создание планово-высотного обоснования	– наличие, количество и расположение опознаков
3 Фотограмметрическая обработка снимков	– системы координат и проекции
4 Моделирование геопространства	– термины и определения; – состав элементов модели; – математическая основа моделирования; – форматы выходных данных

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 снимков, пространственная фототриангуляция, построение цифровой модели рельефа.

В результате фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки получают: стереомодели, точечные цифровые модели поверхности, ортофотопланы и др., которые служат источником для последующей векторизации и формирования пространственных данных на территорию съемки.

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 наблюдения 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.

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;
- содержат информацию о вертикальных и наклонных элементах объекта съемки.

Таким образом, в результате анализа современной нормативно-технической литературы в области проведения аэрофотосъемочных работ и создания пространственных моделей местности установлено, что наиболее приемлемыми пространственными данными для формирования геопространства являются точечные цифровые модели поверхности и выявлены проблемы применения существующих норм и требований для моделирования геопространства с использованием современных технических и программных средств сбора и обработки данных АФС.

*Во втором разделе* разработаны требования к сбору и обработке данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов для моделирования геопространства, обеспечивающие заданную точность и де-

тельность построения фотограмметрических моделей, используемых для моделирования геопространства.

Характеристики цифровых камер и параметры АФС связаны между собой и влияют на качество и экономическую эффективность АФС. Для решения конкретных задач в определенных условиях необходим обоснованный выбор значений этих параметров.

На выбор оптимальных значений параметров АФС влияют: точность и детальность создаваемой модели геопространства, характер моделируемой местности, ограничения, связанные с использованием того или иного беспилотного летательного аппарата (например, метеоусловия, максимальная высота полета), характеристики используемой съемочной камеры.

При проектировании работ по созданию моделей геопространства необходимо обосновать выбор следующих параметров АФС: высота фотографирования и фокусное расстояние камеры. Так как на практике выбор вариантов фокусного расстояния ограничен определенным набором имеющегося в распоряжении оборудования, то задача сводится к расчету высоты фотографирования при использовании конкретной камеры.

Известно, что точность определения координат точек фотограмметрических моделей связана с измерительной способностью исходных снимков – пространственным разрешением. Существующие требования к созданию цифровых топографических карт и планов содержат только формулы для расчета оптимального элемента сканирования исходных аналоговых аэрофотоснимков в зависимости от масштаба создаваемой карты (плана) или ортофотоплана.

Анализ информационно-аналитических материалов показал, что в настоящее время требования к точности моделей геопространства отличаются от требований, предъявляемых к картографическим материалам.

Достоверность моделей геопространства характеризуется их точностью, детальностью, информативностью и др. и зависит от точности и детальности

фотограмметрических моделей, обеспечение которых возможно при соблюдении определенных требований к сбору и обработке данных АФС.

На основании анализа научно-технической литературы разработаны и сформулированы требования для обеспечения заданного качества построения фотограмметрической модели по снимкам с БПЛА в зависимости от характерных особенностей территории съемки и назначения модели геопространства:

– для обеспечения заданной точности модели величина пространственного разрешения снимков должна быть не менее чем в два раза меньше заданной погрешности измерения координат точек объекта;

– для обеспечения заданной детальности модели, позволяющей обнаружить, определить ориентацию, распознать и идентифицировать объект, величина пространственного разрешения снимков должна быть соответственно не менее чем в 2, 4, 8, 13 раз меньше минимального геометрического элемента создаваемой модели.

Для обоснования требований к параметрам АФС с БПЛА предложена формула для расчета пространственного разрешения снимков в зависимости от заданной средней квадратической погрешности (СКП) определения координат точек модели

$$R = 0,7 \cdot \text{СКП}_{\text{на местности}} \cdot \quad (1)$$

Для обеспечения требуемого пространственного разрешения на местности при фиксированном фокусном расстоянии объектива цифровой съемочной камеры высота съемки не должна превышать

$$H = \frac{0,7 \cdot f \cdot \text{СКП}_{\text{на местности}}}{p}, \quad (2)$$

где  $f$  – фокусное расстояние съемочной камеры;

$p$  – физический размер пикселя светочувствительной матрицы цифровой камеры.

В результате исследований выявлено, 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 объектов это требование не всегда обеспечивается, в результате чего построенная фотограмметрическая модель имеет недостаточную плотность, что не позволяет оператору уверенно распознать часть конструктивных элементов и определить их местоположение. Для решения этой проблемы необходимо дополнительно к плановой выполнять перспективную АФС, что позволит обеспечить достаточное количество отображения точек вертикальных и наклонных объектов для их уверенной идентификации.

В результате исследований установлено, что использование перспективных снимков для построения фотограмметрических моделей позволяет дополнительно определить состояние объекта, форму, протяженность и пространственное взаимное расположение конструктивных элементов на вертикальных и наклонных объектах. На основании этого сделан вывод о необходимости совместной фотограмметрической обработки плановых и перспективных снимков для обеспечения достоверности фотограмметрической модели как основы для моделирования различных объектов геопространства.

Для моделирования геопространства в работе предложена технологическая схема сбора и совместной фотограмметрической обработки данных плановой и перспективной АФС с использованием БПЛА (рисунок 1).

В отличие от существующей технологии сбора и обработки материалов АФС в предложенной технологической схеме на подготовительном этапе на основе предложенных формул выполняется расчет параметров АФС с использованием БПЛА в зависимости от требований к точности и детальности модели геопространства. В случае моделирования вертикальных и наклонных объектов кроме плановой производится перспективная АФС. В результате совместной фотограмметрической обработки плановых и перспективных снимков строится точечная цифровая модель, которая служит основой для моделирования объектов местности в геоинформационных системах.

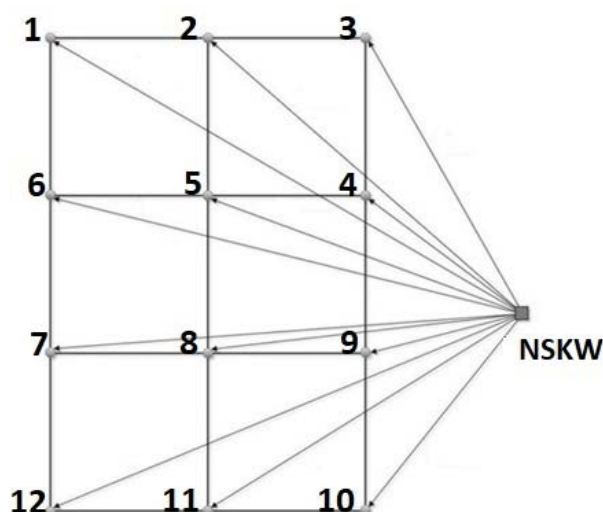


Рисунок 1 – Технологическая схема сбора и обработки данных АФС с использованием БПЛА для моделирования геопространства

В третьем разделе приведены результаты экспериментального исследования по построению фотограмметрических моделей с учетом разработанных требований к сбору и обработке данных АФС с использованием БПЛА для моделирования геопространства, выполнена оценка точности полученных фотограмметрических моделей.

Для оценки эффективности предложенных требований выполнены экспериментальные исследования, в результате которых построены фотограмметрические модели тест-объекта, фрагмента территории жилищно-строительного комплекса (ЖСК) «Восточный» г. Новосибирска, объекта недвижимости.

Эксперимент 1. Для построения фотограмметрической модели тест-объекта выполнен расчет параметров плановой АФС с учетом характеристик цифровой камеры DJI FC330, установленной на БПЛА DJI Phantom 4; разработан проект планово-высотного обоснования, предусматривающий равномерное расположение опознаков по всей площади объекта. Координаты опознаков получены с помощью ГНСС-приемника Topcon Hyper SR лучевым методом, схема которого приведена на рисунке 2. СКП определения плановых координат и высот опознаков составила 0,02 м.



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

—————> – измеряемый вектор

Рисунок 2 – Схема определения плановых координат и высот опознаков тест-объекта лучевым методом

Продольное и поперечное перекрытие плановых снимков составило 80 %. Для фотограмметрической обработки снимков использовано программное обеспечение Agisoft PhotoScan.

Оценка точности построения фотограмметрической модели выполнена по плановым координатам и высотам опорных и контрольных точек.

Результаты оценки точности построения фотограмметрической модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты оценки точности построения фотограмметрической модели по координатам опорных и контрольных точек

Назначение точек	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;

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

Эксперимент 2. Для построения фотограмметрической модели участка территории ЖСК «Восточный» вычислены параметры плановой АФС с учетом характеристик цифровой камеры SONY ILCE-6000, установленной на БПЛА Supercam S350.

Съемка выполнена на высоте около 280 м. Площадь съемки – 0,44 км<sup>2</sup>. В обработке участвовало 66 снимков, входящих в три маршрута.

Фотограмметрическая обработка снимков и оценка точности построенной модели выполнена в двух вариантах:

- с использованием координат центров проектирования снимков и контрольных точек;
- с использованием координат опорных и контрольных точек.

Результаты оценки точности различных вариантов построения фотограмметрических моделей приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Точность построения фотограмметрической модели с использованием координат центров проектирования

Назначение точек	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 4 – Результаты оценки точности построения фотограмметрической модели с использованием координат опорных точек

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 точность построения фотограмметрической модели с использованием координат опорных точек выше, чем с использованием центров проектирования. Поэтому для повышения точности определения координат точек фотограмметрических моделей, построенных по данным АФС с БПЛА, необходимо наряду с центрами проектирования использовать опорные точки.

Эксперимент 3. Для построения фотограмметрической модели геопространства на территорию объекта городской инфраструктуры на примере 9-этажного жилого строения рассчитаны параметры плановой АФС с учетом

характеристик цифровой камеры DJI FC330, установленной на БПЛА DJI Phantom 4.

Продольное и поперечное перекрытие плановых снимков составило 80 %. Дополнительно к плановой выполнена перспективная АФС по круговому маршруту вокруг строения с величиной базиса, соответствующей  $10^\circ$  дуги окружности, и углом наклона снимков около  $30^\circ$ . Схема расположения маршрутов и центров проектирования снимков относительно строения при плановой и перспективной АФС приведена на рисунке 3.



⊙ – центр проектирования снимка; ——— – линия маршрута

Рисунок 3 – Схема расположения маршрутов и центров проектирования снимков: а) при плановой съемке; б) при перспективной съемке

Характеристики плановой и перспективной съемки приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики плановой и перспективной АФС

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  $30^\circ$ , поперечные – от  $0,2$  до  $3,8^\circ$ .

Проектирование опознаков выполнено в соответствии с Инструкцией по топографической съемке в масштабах  $1 : 5\,000$ ,  $1 : 2\,000$ ,  $1 : 1\,000$ ,  $1 : 500$ . В качестве контрольных точек использованы характерные точки объекта недвижимости – углы строения. Плановые координаты и высоты опорных и контрольных точек получены с помощью ГНСС-приемника Topcon Hyper SR, средняя квадратическая погрешность определения координат составила  $0,02$  м.

Построение точечных цифровых моделей средствами Agisoft PhotoScan выполнено по координатам соответственных точек перекрывающихся снимков на основе их автоматической идентификации. В построении модели по плановым снимкам участвовало около  $900$  точек в пределах перекрытия соседних снимков и около  $400$  точек – в зоне тройного перекрытия, а по перспективным снимкам –  $1\,500$  и  $1\,000$  точек, соответственно.

В результате фотограмметрической обработки плановых и перспективных снимков получены точечные цифровые модели поверхности (рисунок 4).



*a)*

*б)*

*в)*

Рисунок 4 – Изображения точечных моделей, полученных:

*a)* по плановым снимкам; *б)* по перспективным снимкам; *в)* в результате совместной обработки данных плановой и перспективной съемки

Для оценки точности различных вариантов построения фотограмметрических моделей вычислены СКП определения координат и высот опорных и контрольных точек (таблица 6).

Таблица 6 – Результаты оценки точности построения фотограмметрических моделей объекта недвижимости

Вид АФС	СКП координат, м							
	опорных точек				контрольных точек			
	$m_x$	$m_y$	$m_l$	$m_h$	$m_x$	$m_y$	$m_l$	$m_h$
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 перспективных снимков, полученных с БПЛА, в процесс совместной обработки с плановыми снимками повышает достоверность построенной фотограмметрической модели и обеспечивает возможность определения местоположения конструктивных элементов в составе вертикальных и наклонных объектов. При этом СКП определения планового положения точек модели не превышает 0,1 м, что соответствует требованиям к точности координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства, утвержденным приказом Минэкономразвития России от 01.03.2016 № 90.

Таким образом, при формировании моделей геопространства на застроенных территориях по данным АФС с использованием БПЛА целесообразно выполнять совместную фотограмметрическую обработку плановых и перспективных снимков, что позволяет получить достоверные фотограмметрические модели для решения задач в различных областях экономики Российской Федерации – строительстве, проектировании, территориальном планировании, кадастре, градостроительстве и др.

## 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 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

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

3 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.

4 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной сис-

темы [Текст] / Т. А. Хлебникова, О. А. Оприцова // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 119–129.

5 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.

6 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.

7 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования технологии моделирования геопространства по материалам аэрофотосъемки [Текст] / Т. А. Хлебникова, О. А. Оприцова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Международ. науч. конгр. : Международ. 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.

8 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. Оприцова // Международ. научно-методическая конференция «Актуальные вопросы образования. Инновационные подходы в образовании» : сб. материалов в 2 ч. (Новосибирск, 23–27 января 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Ч. 1. – С. 210–214.

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

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

10 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-2018. 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.