

На правах рукописи

Акель Мохаммад Амин



Разработка методики оценки влияния вариаций навигационных параметров
съемочной системы беспилотного воздушного судна на точность создания
цифровой модели местности

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК).

Научный руководитель –
кандидат технических наук Алтынов Александр Ефимович.

Официальные оппоненты:

Воронин Евгений Геннадьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Филиал акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс», Закрытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Оптические и электронные комплексы и системы», заместитель главного конструктора;

Алтынцев Максим Александрович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Ведущая организация – Акционерное общество «Научно-исследовательский институт точных приборов» (г. Москва).

Защита диссертации состоится 20 июня 2023 г. в 14.00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, ауд. 402.

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

Автореферат разослан 27 апреля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 17.04.2023. Формат 60 × 84 1/16.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 46.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Цифровые модели местности и рельефа (ЦММ и ЦМР) играют жизненно важную роль в создании и поддержании военной и гражданской инфраструктур каждой страны. Методы получения этих моделей и обработки их исходных данных для получения окончательных результатов различаются в зависимости от методов съемки, качества съемочного обоснования, используемого инструментально-программного обеспечения, а также требований нормативных документов, на основании которых создаются эти модели.

В Сирии, как в любой развивающейся стране, всегда была высокая востребованность со стороны гражданского и военного секторов страны в получении качественных цифровых 2D- и 3D-моделей территории и рельефа. Поэтому специалисты стремятся получить самые качественные исходные данные с использованием доступных технологий, которые появляются в связи с бурным технологическим и информационным развитием микроэлектроники, оптоэлектронных технологий и информационно-вычислительных средств.

Как известно, в этой области идет интенсивное развитие методов, и в особенности, средств получения исходных пространственных данных о местности, но зачастую они труднодоступны для государственных предприятий современной Сирии, поскольку это связано не только с бюджетными ограничениями, но и с политикой. Последнее обстоятельство, к сожалению, в частности в Республике Сирия, имеет решающее значение.

В этой связи автор ставит задачу провести сравнительное изучение методов и технологий получения первичных пространственных данных о местности и для выявления доступных вариантов при условии обеспечения необходимой точности построения ЦММ с ориентацией на технологии применения беспилотных воздушных носителей бюджетного ценового уровня. Кроме того, ставится задача использования современных методов 3D цифрового имитационного моделирования процессов съемки для выявления наиболее значимых источников возникновения ошибок на точность создания ЦММ и ЦМР и возможности их компенсации при условии фиксации всех вариаций навигационных параметров съемочной системы во время выполнения съемок.

Актуальность темы продиктована чрезвычайно высокой степенью заинтересованности военного и гражданского секторов экономики Российской Федера-

ции (РФ), Сирийской Арабской Республики (САР) и других стран в создании актуальных трехмерных цифровых моделей местности для целей проектирования и развития инфраструктуры территории, в первую очередь – труднодоступных районов. Так как в настоящее время существует много различных способов создания цифровых моделей местности, автором были изучены наиболее передовые и рентабельные, из которых особое внимание уделено аэрофототопографическому методу с использованием беспилотных воздушных судов (БВС), которые определяют технологическую революцию для многих технических приложений, в том числе, топогеодезического обеспечения.

Актуальными также являются ряд вопросов, связанных с внедрением технологий для создания цифровых моделей местности и рельефа в некоторых стратегических важных районах страны, а именно трудности, которые возникнут при решении этих проблем, и возможности их преодоления и перспективы получения соответствующих топографических документов. Важным аспектом решения этих проблем является практическое применение современных технологий.

Степень разработанности темы. Необходимо отметить, что не существует универсального решения, которое можно было использовать с целью создания трехмерных цифровых моделей территорий для решения широкого спектра задач в различных отраслях экономики Сирии.

Ограниченные финансовые ресурсы сдерживают возможности большинства частных лиц и малых предприятий в проведении научных и технических исследований. Тем не менее, большинство стран стремится предоставить новейшие технологии и специалистов для ведения крупного бизнеса и проектов с целью повышения научного уровня и структуры знаний, но для принятия правильных решений требуется множество статистических исследований и многочисленные меняющиеся критерии, которые необходимо учитывать. Следовательно, можно сказать, что:

– ни одна из современных технологий 3D-моделирования не является универсальным решением для моделирования (проектирования) и практического использования ЦММ в инженерных решениях;

– практически все современные методы, позволяющие в конечном итоге получить приемлемое качество 3D-модели сегодня, почти всегда требуют «ручного» вмешательства для корректировки модели высококвалифицированными специалистами в области геодезии, геоинформатики и фотограмметрии.

В мире проводятся исследования и эксперименты по расширению возможностей «оцифровки» местности, созданию моделей для использования в научных и государственных целях. Объединение усилий научно-исследовательских вычислительных центров с высокопроизводительными компьютерами и специалистами в области геодезии, математики и аэрофотограмметрии способствует оптимальному решению задач, связанных с созданием высокоточных моделей местности.

Большой вклад в разработку этого направления внесли российские ученые Журкин И. Г., Грузинов В. С., Чибуничев А. Г., Новаковский Б. А., Пермяков Р. В., Хромых В. В., Хромых О. В., Никонов А. В., Елшина Т. Е., Прасолов С. В., Прасолова А. И., Крыленко М. В, а также их зарубежные коллеги – Серхио Иван Хименес, Вальдо Охеда Бустаманте, Марина де Хесус Марциал-Пабло, Хуан Энсисо Мора (Мексика), Сулейман О. Е., Дж. А. Чен (Китай), Окубо М. Н (Япония), Йозенханс, Серифоглу Йылмаз (США) и др.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационного исследования заключается в разработке методики оценки влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы на платформе БВС на точность создания крупномасштабных цифровых моделей местности и рельефа и других документов о местности в рамках аэрофототопографического метода съемок.

Поставленная цель достигается путем последовательного решения следующего комплекса *задач*:

– анализ приоритетных направлений создания цифровых 2D- и 3D-моделей местности для различных секторов экономики (сельскохозяйственных, политических, социальных и др.) Сирии в соответствующих условиях республики;

– обоснование наиболее приемлемой технологии получения моделей местности из числа современных методов создания ЦММ в существующих условиях Сирийской Арабской Республики;

– изучение влияния вариаций навигационных и аэрофотосъемочных параметров в рамках аэрофототопогеодезического метода на основе применения БВС на точность создания моделей местности и рельефа в крупных масштабах;

– разработка методики цифрового имитационного моделирования процессов аэрофототопографической съемки в специализированном ПО для выбора и обоснования оптимальной технологии получения ЦММ, минуя натурные летно-съемочные эксперименты.

Объектом исследования являются вариации навигационных и аэросъемочных параметров при аэрофототопографической съемке, влияющие на точность построения ЦММ (ЦМР).

Предметом исследования являются методы, средства создания цифровых моделей местности (и рельефа) для эффективного их использования при восстановлении разрушенных войной промышленной и социальной инфраструктуры городов и населенных пунктов Республики Сирия.

Научная новизна диссертационных исследований заключается в том, что разработанная методика оценки влияния навигационных и съемочных параметров, влияющих на точность создания ЦММ, основана на имитационном моделировании процесса аэрофотосъемки с использованием БВС, что позволяет с высокой достоверностью для различных условий воспроизводить, изучать и анализировать механизмы влияния навигационных и съемочных параметров с целью установления оптимальных сочетаний съемочных и навигационных элементов полета для выполнения аэрофототопографических съемок.

Теоретическая значимость состоит в усовершенствовании технологии имитационного компьютерного моделирования аэрофототопографической съемки, которая дает разностороннюю и объективную информацию о характере влияния погрешностей выдерживания навигационных параметров аэросъемки, элементов внешнего ориентирования съемочной системы и других факторов, влияющих на точность создания ЦММ.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанная методика оценки влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы БВС на точность создания ЦММ позволяет экономить время и средства за счет существенного сокращения числа натурных летно-съемочных экспериментов, обеспечивая при этом высокую технологичность и достоверность создания аэрофототопографическим методом различных типов цифровых документов о местности.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационной работы явились методы компьютерного имитационного 3D-моделирования и сравнительного анализа данных, полученных средствами моделирования и натурными экспериментами.

Положения, выносимые на защиту:

– методика оценки влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы БВС на точность создания ЦММ, позволяющая получать объективную информацию о влиянии навигационных и съемочных параметров топографической аэрофотосъемки и точности их фиксации в полете на точность создания моделей местности, а также существенно расширить диапазон анализируемых параметров и погрешностей их определения, влияющих на конечный результат;

– репрезентативный набор оценок, характеризующих влияние вариаций большого числа навигационных и съемочных параметров системы БВС на точность создания ЦММ;

– доказана возможность изучать и анализировать на основе разработанной методики механизмы влияния навигационных и съемочных параметров с целью установления оптимальных сочетаний съемочных и навигационных элементов полета при выполнении аэрофототопографических съемок в различных условиях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация Акель Мохаммад Амин «Разработка методики оценки влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы беспилотного воздушного судна на точность создания цифровой модели местности» соответствует областям исследований: 13 – Теория, методы и технологии создания трехмерных моделей объектов земной поверхности, инженерных и других объектов, на основе различных видов съемки (оптическая, радиолокационная, лазерно-локационная и др.); 14 – Теория, методы и технология решения задач дистанционного зондирования и фототопографических съемок с применением беспилотных летательных аппаратов паспорта научной специальности 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России по техническим наукам.

Степень достоверности. Достоверность представленных данных, рекомендаций и выводов обоснована тем, что полученные результаты не противоречат и подтверждаются данными, полученными известными исследованиями, большим количеством экспериментальных имитационных съемок, а также сравнением данных реальных натуральных съемок с результатами имитационного моделирования.

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались на следующих конференциях:

– 75-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК 6–10 апреля 2020 г., г. Москва;

– 76-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК 12–16 апреля 2021 г., г. Москва;

– II-й Международной научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов», 26–28 апреля 2022 г., г. Томск.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 4 научных статьи, 3 из которых – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 179 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 129 наименований, в том числе 62 зарубежных источника, содержит 16 таблиц, 56 рисунков, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, отражен современный уровень разработанности темы, сформулированы цель и задачи, определены основные методы исследования и научная новизна работы. В частности, автор ставит задачу провести сравнительное изучение методов и технологий получения первичных пространственных данных о местности для выявления доступных вариантов при условии обеспечения необходимой точности построения ЦММ с ориентацией на аэрофототопографические технологии с применением беспилотных воздушных носителей бюджетного ценового уровня. Кроме того, ставится задача использования современных методов 3D цифрового имитационного моделирования процессов съемки для выявления наиболее значимых источников возникновения ошибок, влияющих на точность создания ЦММ и ЦМР и возможности их компенсации при условии фиксации всех вариаций навигационных параметров съемочной системы во время выполнения съемок.

Первый раздел диссертационной работы посвящен анализу проблем, связанных с созданием планово-картографических 2D- и 3D-документов о местности в крупных масштабах для целей восстановления объектов и инфраструктуры территорий Сирии, подвергшихся разрушениям при ведении боевых действий.

В Сирии, как в любой развивающейся стране, всегда была высокая востребованность гражданского и военного секторов страны в получении качественных цифровых 2D- и 3D-моделей территории и рельефа. Поэтому специалисты стремятся получить самые качественные исходные данные с использованием доступных технологий, которые появляются в связи с бурным технологическим и информационным развитием микроэлектроники, оптоэлектронных технологий и информационно-вычислительных средств.

Автором показано, что в этой области идет интенсивное развитие методов и, в особенности, средств получения исходных пространственных данных о местности, но делает их труднодоступными для государственных предприятий современной Сирии, поскольку это контролируется не только бюджетными ограничениями, но и политикой. Последнее обстоятельство, к сожалению, в частности, в Республике Сирия имеет решающее значение.

В этой связи автор решает задачу сравнительного изучения методов и технологий получения первичных пространственных данных о местности для выявления доступных, реальных для Сирии вариантов при условии обеспечения необходимой точности построения ЦММ. Наиболее приемлемыми в этих условиях являются аэрофототопографические методы, реализуемые на платформах беспилотных воздушных носителей бюджетного ценового уровня.

По рассмотренным вопросам первого раздела были сделаны следующие выводы:

– с учетом неудовлетворительного состояния планово-высотной геодезической основы в Республике Сирия предполагается использовать местные, локальные системы координат для создания ЦММ (ЦМР) аэрофототопографическим методом на базе использования БВС;

– проблемы создания цифровых документов о местности для развития и восстановления хозяйственной деятельности Сирии в районах, откуда ушла война, чрезвычайно актуальны. В этой ситуации необходимо использовать современные технологии создания ЦТК, ЦММ и пр. в короткие сроки и при минимальных затратах, учитывая социально-экономическую ситуацию в Сирии.

Во втором разделе работы дана характеристика современного состояния топогеодезического производства в Республике Сирия, состояние опорных геодезических сетей и, в этой связи, рассматриваются возможности создания в сложившихся условиях картографических документов о местности, в том числе ЦММ и рельефа.

В этом разделе подробно изучены и оценены в сравнительном аспекте технологии использования БВС в аэрофототопографических работах в крупных и сверхкрупных масштабах, нацеленных на 3D-моделирование местности и рельефа. Анализ реализаций аэрофототопографического метода для создания ЦММ, ЦМР и других документов о местности показал, что наиболее приемлемым вариантом для условий современной Сирии является аэрофототопографический метод с использованием БВС с навигационным обеспечением приборами четвертого поколения. Более того, для повышения точности создания ЦМР, предназначенных для целей восстановления инженерного обеспечения территорий, разрушенных войной, целесообразно использовать «комбинированный» метод съемки, совмещающий топографическую АФС с лазерно-локационной съемкой.

Обобщенная схема создания ЦММ (ЦМР) по результатам воздушных съемок на основе аэрофототопографического метода с учетом практически всех обстоятельств и условий, определяющих точность конечного продукта, представлена на рисунке 1.

Анализ и опыт многих специалистов подсказывают, что наиболее приемлемым для нас вариантом следует признать сочетание АФС и лазерно-локационной съемки с борта БВС вертолетного типа, в частности платформы «Геоскан 401», как наиболее доступный в условиях современной Сирии.

Еще одним важным результатом исследований этого раздела является предложение, заключающееся в том, что для детального и эффективного выбора вариантов топографических съемок целесообразно использовать методы цифрового имитационного моделирования, позволяющие эмулировать все стадии создания ЦММ (ЦМР) с учетом практически всех факторов, влияющих на качество конечного продукта.

Ставя целью нахождение оптимального набора параметров и условий аэрофототопографической аэросъемки, мы предлагаем технологическую схему имитационного компьютерного моделирования аэрофототопографической съемки, позволяющего, с одной стороны, изучить влияние аэросъемочных

параметров и их изменчивости на конечный результат, то есть точность ЦММ, а с другой – подбирать наиболее подходящие варианты проведения аэрофототопографической съемки для определенной ситуации и съемочное оборудование – БВС платформу, съемочную камеру, условия съемки и т. д.

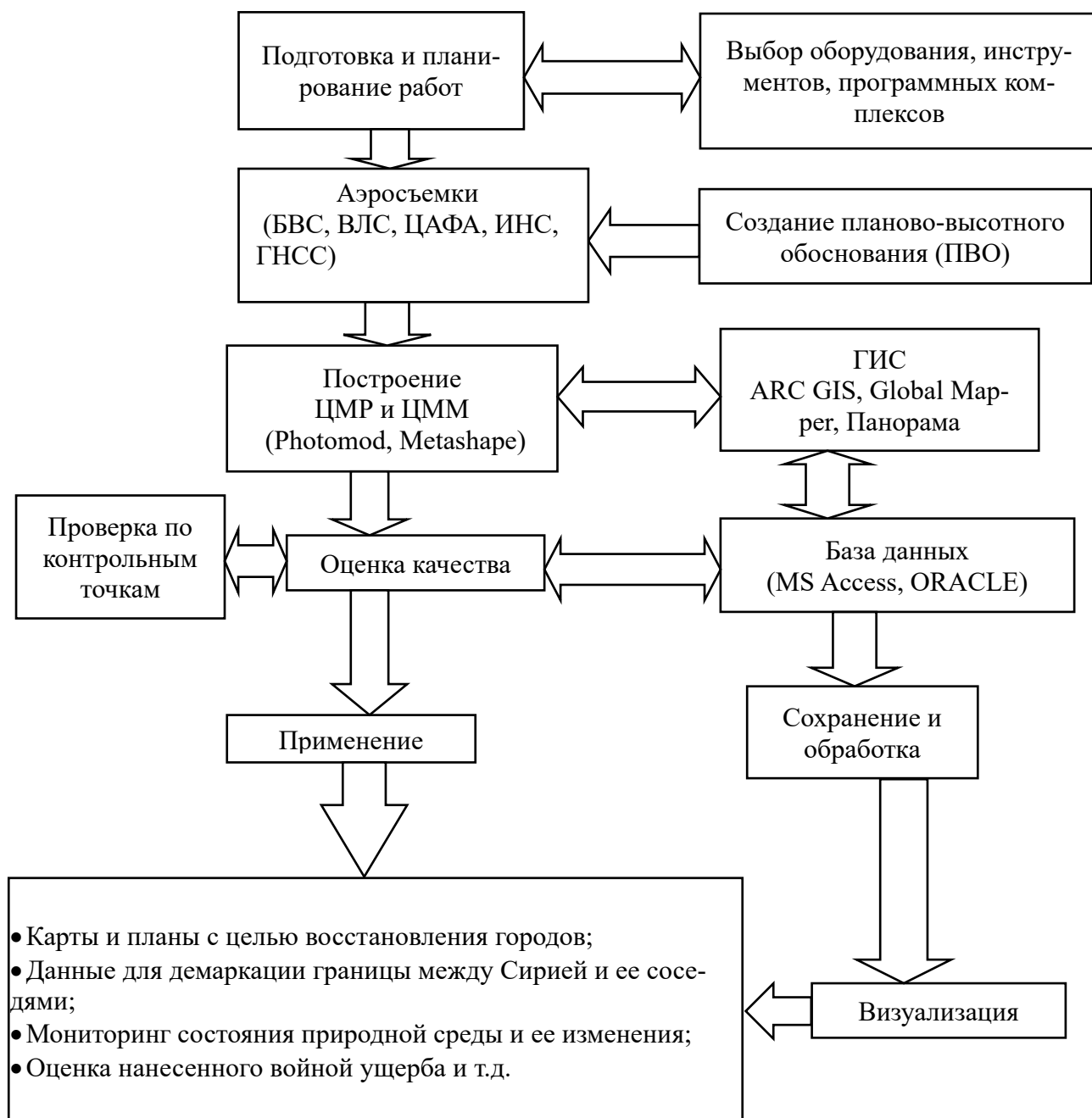


Рисунок 1 – Обобщенная схема создания ЦММ (ЦМР) по результатам воздушных съемок на платформе БАС

При имитационном компьютерном моделировании аэросъемочных процессов можно варьировать практически всеми параметрами съемки, составом

и параметрами съемочного оборудования и тем самым изучать их влияние на окончательный результат, сравнивая координаты характерных (контрольных) точек первичной модели (принятой за эталонную) с координатами вторичной – созданной по имитационным снимкам с принятыми параметрами внутреннего и внешнего ориентирования.

К переменным параметрам съемки, изменение которых должно влиять на точность вторичной финальной модели, относятся:

- координаты центров проекций снимков S_ϕ (X_s , Y_s , Z_s), высота фотографирования H_ϕ и угловые элементы внешнего ориентирования снимков $A(\alpha, \omega, \kappa)$;

- элементы внутреннего ориентирования снимков (фокусное расстояние камеры (f_k), координаты главной точки, параметры дисторсии и размер пикселя (p);

- метеорологические условия (M), которые влияют на изменения скорости и устойчивость носителя съемочной аппаратуры;

- точность ГНСС данных (координат точек фотографирования) получаемых на борту БВС, в том числе при использовании дифференциального метода позиционирования (DGPS) в режиме реального времени – real time kinematic (RTK);

- количество и расположение опорных точек (ОТ) и контрольных точек (КТ).

Представлена блок-схема (см. рисунок 3) имитационного моделирования аэрофототопографического процесса, в который включены возможности изучения влияния изменений заданных съемочных параметров и ошибок в их определении на конечную точность создания ЦММ.

Предполагается, что при моделировании процесса аэрофотосъемки точность измерения навигационных параметров будет изменяться оператором во время эмулирования вариантов аэросъемки.

Выводы по второму разделу:

- анализ реализаций аэрофототопографического метода для создания ЦММ, ЦМР и других документов о местности крупного и сверхкрупного масштабов показал, что наиболее приемлемым вариантом является использование БВС с навигационным обеспечением приборами четвертого поколения;

- для повышения точности создания ЦМР, предназначенных для целей восстановления инженерного обеспечения территорий, разрушенных войной, необ-

ходимо использовать аэросъемочные работы совмещающих АФС с лазерно-локационной съемкой;

– для детального и эффективного выбора вариантов топографических съемок необходимо использовать методы цифрового имитационного моделирования, позволяющего эмулировать все стадии создания ЦММ (ЦМР) с учетом практически всех факторов, влияющих на качество конечного продукта.

Третий раздел работы посвящен проблемам цифрового моделирования реальности и, в частности, имитационного моделирования производственных процессов 3D-картографирования. В этой части диссертационной работы обосновывается и разрабатывается методика цифрового имитационного моделирования всех этапов аэрофототопографического метода создания ЦММ (ЦМР) с учетом практически всех обстоятельств и условий, определяющих точность конечной продукции.

Из многочисленного семейства программных средств для трехмерного моделирования реальности, таких как Autodesk 3ds Max, ZBrush, DAZStudio, Cinema 4D и ряда других, нами выбрана среда 3D-моделирования Blender 3.0. Являясь профессиональным свободным и открытым программным обеспечением для создания трехмерных компьютерных моделей, среда Blender выделяется универсальностью применения и уникальными возможностями подключения программных средств для выполнения «внутренних» процедур при реализации необходимых процессов в цепочке моделируемой технологии и доступностью ее для широкого круга пользователей.

Реализация имитационного моделирования топографической АФС местности в ПО «Blender3.0» предполагает подготовку «первичной модели» территории с необходимыми морфологическими и тематическими (объектами на ней) характеристиками. В данной работе мы использовали две 3D-модели местности – кампус Московского университета геодезии и картографии (МИИГАиК) и кампус Государственного университета землеустройства (ГУЗ), расположенных в исторической застройке бывшей Басманной слободы. Общая площадь территории порядка 35 га с диапазоном превышений на модели с учетом высоты зданий и сооружений до 63 м (рисунок 2), а также территорию сельскохозяйственного назначения близ г. Дамаск Республики Сирия.

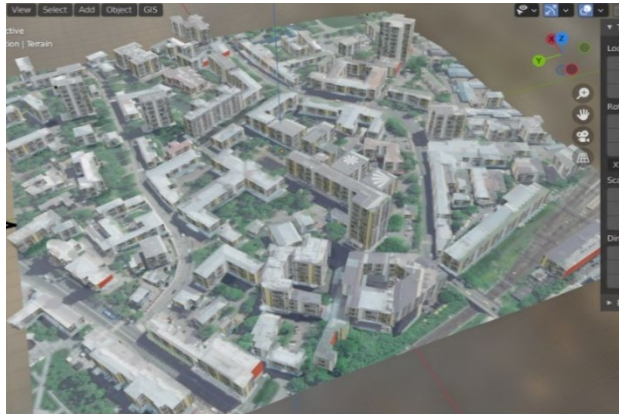


Рисунок 2 – Первичная 3D-модель территории кампуса МИИГАиК

Из полутора десятков программных продуктов для фотограмметрической обработки снимков, широко применяемых в России и за рубежом, таких как PhotoMod, ReCap 360, 3DF Zephyr Pro, ContextCapture, COLMAP, Agisoft MetaShape, Pix4Dmodel, RealityCapture, нами взяты для исследования три последних из этого списка в версиях на 2021 г.

Для экспериментальных исследований очень важно было использовать возможность имитирования как классической аэрофототопографической съемки, так и лазерно-локационной съемки. При этом среда моделирования давала возможность вносить как систематические, так и случайные погрешности в работу бортовой аппаратуры – во все параметры движения и ориентации съемочной платформы по время съемки. При этом закон распределения случайных погрешностей может быть задан. В наших исследованиях мы использовали модели БВС бюджетного уровня – DJI Phantom 4 Pro V2.0 с пилотажно-навигационным оборудованием четвертого поколения, а также профессиональную платформу – Геоскан 401, которая может нести как фотоаппаратуру, так и лазерно-локационный комплекс.

Особенность компьютерного моделирования аэросъемочных процессов в контексте нашей задачи заключается в возможности многовариантного выполнения аэрофотосъемочных работ с внесением систематических или случайных отклонений в заданные значения параметров аэрофотосъемки с фиксацией этих параметров для всех точек фотографирования. Это позволяет анализировать, какие именно группы аэрофотосъемочных параметров и их изменения существенно влияют на точность построения трехмерных моделей этой территории с помощью отмеченного выше фотограмметрического инструментария. Таким

образом, было произведено моделирование достаточно большого количества вариантов выполнения аэрофотосъемки, с различными параметрами, которые, по нашему мнению, могут существенно повлиять на точность итогового результата в построении ЦММ. Прежде всего, это точность определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков, точность выдерживания траектории движения БВС, выдерживание расчетных продольного и поперечного перекрытий снимков, количество, точность определения и расположение опорных и контрольных точек геодезического обоснования, особенности используемых программ фотограмметрической обработки, пространственное разрешение изображений и т. д. (рисунок 3).

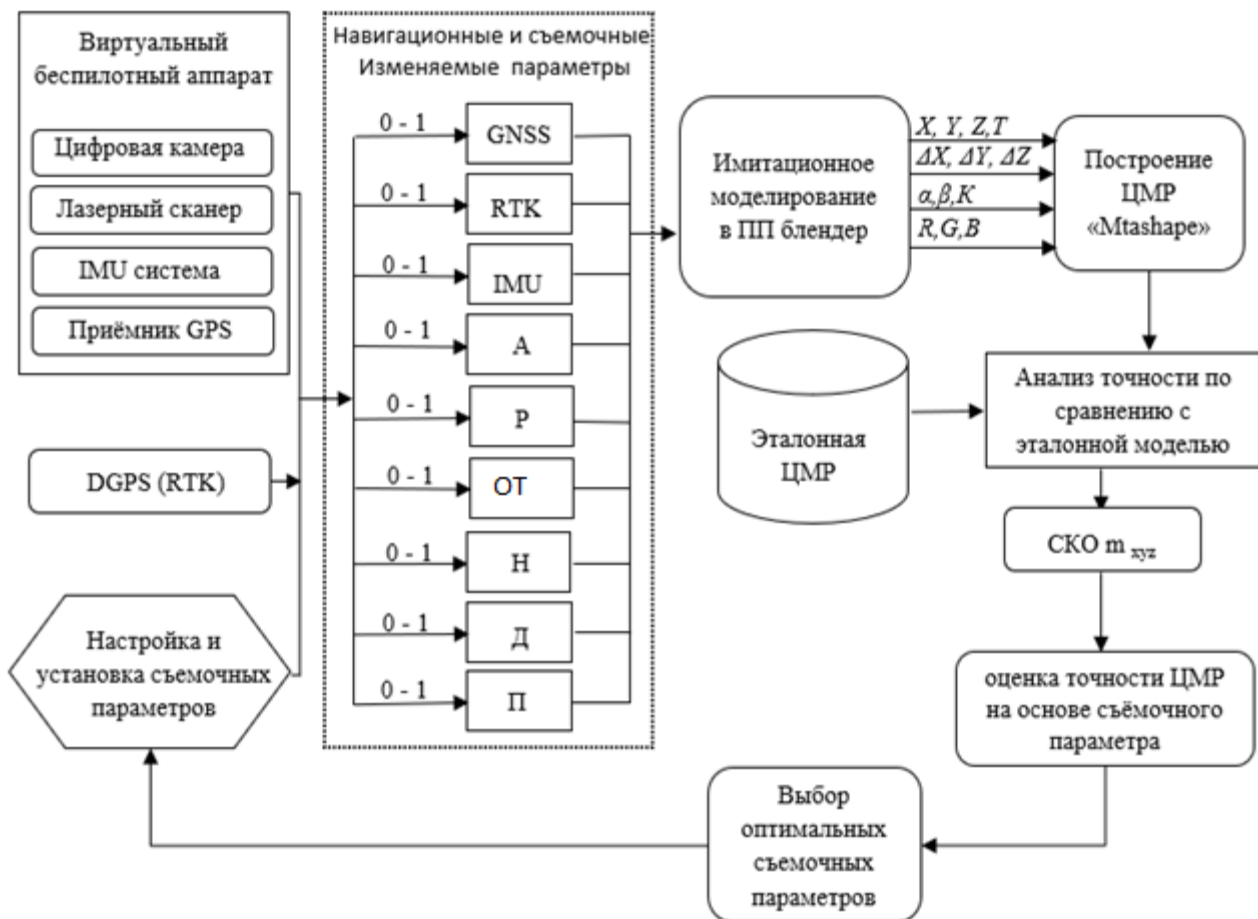


Рисунок 3 – Общая схема экспериментальных модельных аэрофото- и лазерно-локационных съемок

Формально, каждый имитационный эксперимент в этой схеме удобно описать функционалом – «статусом состояния» – $\bar{F} = [G, R, I, A, P, OT, H, Д, П]$,

в котором его составляющие отражают условия моделирования процесса создания ЦММ, как это представлено в таблице 1. Варианты значений или отсутствие одного или нескольких из этих составляющих, при записи полетных данных для дальнейшей обработки, представлены ниже.

Таблица 1 – Параметры, влияющие на точность создания ЦММ

	GNSS (<i>G</i>)	RTK (<i>R</i>)	IMU (<i>I</i>)	ЭВО снимка (<i>A</i>)	Метео- условия (<i>M</i>)	GSD (<i>P</i>)	...	Опорные точки (<i>OT</i>)
Да	1	1	1	1	1	1	...	1
Нет	0	0	0	0	0	0	...	0

Можно еще добавлять некоторые параметры, которые влияют на итоговый результат. Очевидно, что лучший результат должен иметь место, когда все компоненты вектора \bar{F} равны единице, то есть: $\bar{F} = [1, 1, 1, 1, 1, \dots, 1]$. Если один или несколько составляющих вектора \bar{F} будут равны нулю – это означает, что некоторые данные, необходимые для обработки, не будут использованы, что повлечет за собой снижение точности конечного продукта.

Позиционирование (привязка) и масштабирование производной модели осуществлялись по пяти опорным точкам, а оценка точности – по девяти контрольным точкам, положение и точность установки которых задавались на эталонной модели. В ходе имитационных экспериментов их положение менялось как в плане, так и по высоте.

Таким образом, оператор при симулировании аэросъемки в компьютерной среде имеет возможность регулировать и устанавливать изменение набора навигационных параметров для каждого варианта съемки в пределах одной и той же территории, в соответствии с тем, влияние какого фактора на точность построения ЦММ необходимо изучить.

Каждый раз, проводя сравнительный анализ между координатами контрольных точек первичной модели с координатами тех же точек модели, полученной по данным виртуальной АФС с искусственно введенными случайными отклонениями в навигационные параметры аэрофотографирования, нами объективно выявлялись зависимость точности получаемой модели от изменения этих параметров.

Выводы по третьему разделу:

– основной вывод исследования заключается в том, что имитационное моделирование аэрофототопографических работ в программных средствах типа «Blender-3» дает корректные, предсказуемые результаты и позволяет профессионально ставить экспериментальные работы по аэрофототопографической съемке местности, заменяя натурные сложные эксперименты, экономя время, затраты на оборудование и накладные расходы, как правило, сопровождающие реальные полевые аэрофотосъемочные работы;

– результаты моделирования позволяют сделать вывод, что различные программные средства для фотограмметрической обработки данных съемки дают весьма близкие по точности цифровые модели местности и могут влиять только на общую производительность аэрофототопографических работ в целом;

– предлагаемая методика имитационного моделирования может быть рекомендована как средство обучения по курсам, связанным с технологиями летно-съемочных работ для целей картографирования территорий в крупных масштабах аэрофототопографическим методом.

Четвертый раздел при наличии и отсутствии надежной геодезической сети отражает результаты комплексных экспериментов в программной среде трехмерного моделирования. Были проведены исследования различных вариантов влияния вариаций навигационных и аэрофотосъемочных параметров и ошибок в их определениях на точность построения ЦММ при различных условиях съемки.

Ниже приведены несколько примеров с результатами экспериментов.

Так, на рисунке 4 приведены результаты исследований варианта имитационного моделирования в изучении влияния ошибок в определениях линейных $S_{\phi}(X_s, Y_s, Z_s)$ и угловых $A(\alpha, \omega, \kappa)$ элементов внешнего ориентирования снимков, на точность построения ЦММ по невязкам на контрольных точках модели для трех вариантов высот съемки при наличии опорных точек.

Из графиков рисунка 4 следует, что погрешности в элементах внешнего ориентирования снимков не влияют существенно на точность создания ЦММ.

Во втором варианте условия моделирования съемки те же, но при отсутствии сети опорных точек. Этот эксперимент выявлял влияние погрешностей в определениях угловых ЭВО снимков на точность построения ЦММ, что обуславливало повышенные требования к точности определения координат точек фотографирования, поскольку они в этой ситуации становились «опорными точками» при фотограмметрических построениях (рисунок 5).

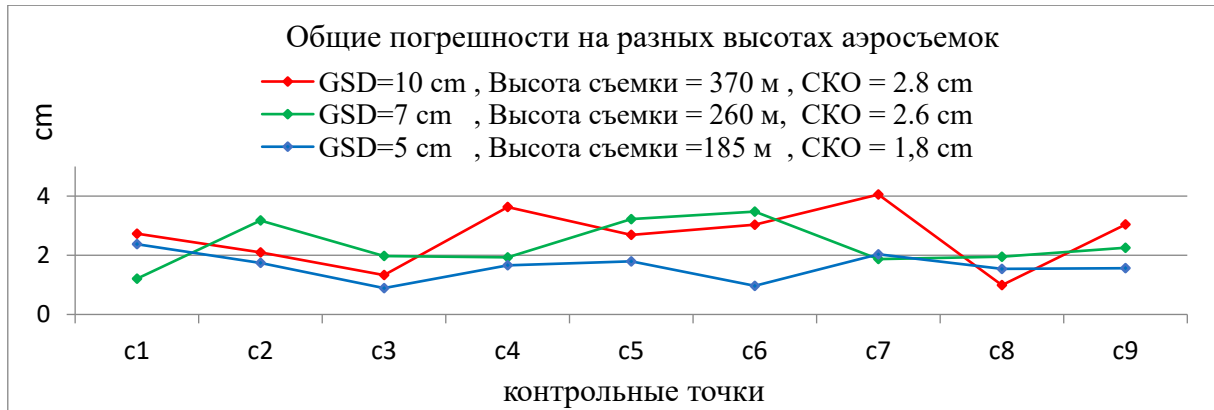


Рисунок 4 – Погрешности в построении модели, вызванные случайными погрешностями положений точек фотографирования с СКО для X, Y, Z, равным ± 5 м; и для углов наклона снимков α , ω к СКО, равным ± 5 градусам

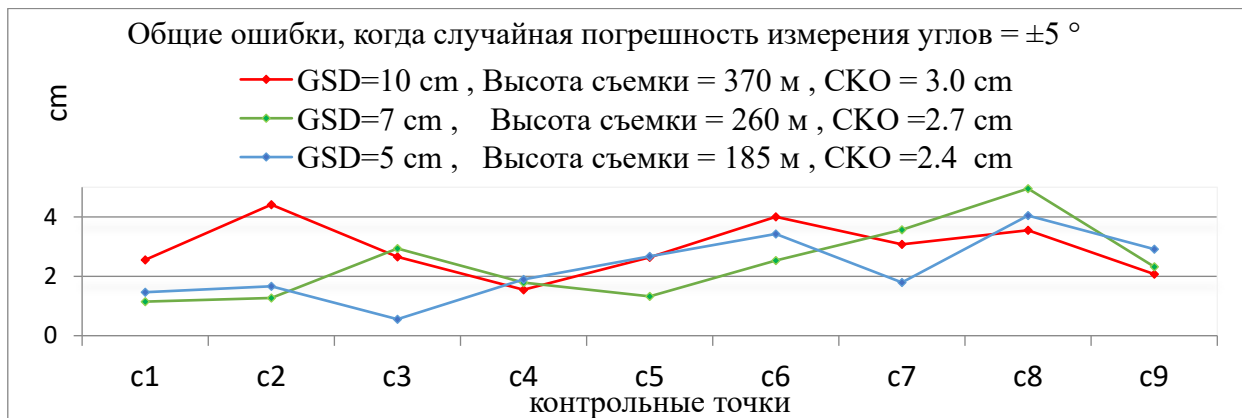


Рисунок 5 – Ошибки на контрольных точках ЦММ при введении погрешностей угловых наклонов снимков до ± 5 градусов

В этом случае влияние на точность фотограмметрической модели случайных ошибок только в углах наклона снимков, по результатам трех экспериментов на разных высотах съемки и с разным размером пикселя на местности, варьирует в диапазоне 2,4 – 3,0 см, что сопоставимо с точностью эталонной модели.

Очевидно, что погрешности в определении координат центров фотографирования будут оказывать более существенное влияние на точность построения ЦММ, поскольку они используются в качестве «воздушных» опорных точек. При этом величины погрешностей создаваемой по снимкам модели прямо пропорциональны погрешностями определения координат центров фотографирования.

Рисунок 6 отражает результаты четырех экспериментов, которые показывает характер зависимости увеличения ошибок (с установленной регрессионной зави-

симостью) в построении ЦММ по невязкам на контрольных точках, с ростом погрешностей определения координат центров точек фотографирования.

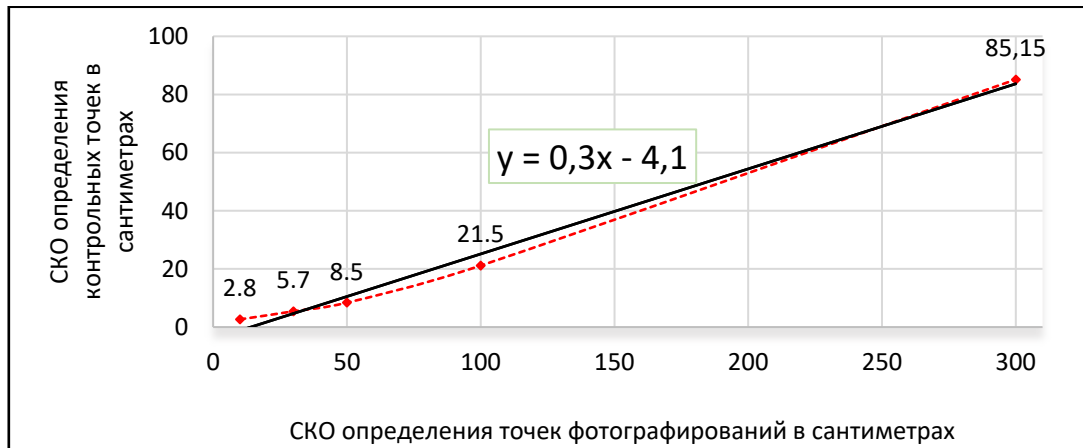


Рисунок 6 – Результаты пяти экспериментов с пятью диапазонами ошибок показывают влияние вариации навигационных параметров на результат создания цифровых моделей местности

Выявленное соотношение между изменением точности определения точек фотографирования и точностью построения модели во многих проведенных экспериментах составляет около трети, т. е. значение ошибки определения точности цифровой модели составляет около трети значения ошибки определения координат центров проекций снимков.

В таблице 2 представлены результаты имитационного моделирования аэрофототопографической съемки с данными о внесенных случайных погрешностях в определении координаты центров фотографирования и углов наклона снимков для четырех вариантов взаимных перекрытий снимков в маршрутах. При аэрофотосъемке эталонной модели с высоты 260 м это обеспечивало проекцию пикселя снимка на поверхности этой модели порядка 7 см.

Фотограмметрическая обработка данных моделирования аэросъемки осуществлялась в среде Agisoft MetaShape.

Из данных таблицы следует, что с увеличением перекрытия снимков точность создания конечной модели увеличивается незначительно и может быть оправдана тем, что при больших введенных колебаниях значений внешнего ориентирования снимков уменьшалась вероятность пропуска перекрытий в целом.

Но при этом резко возрастает количество снимков и, как следствие увеличение времени их фотограмметрической обработки.

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования с вариантами перекрытия

Вариант съемки	1	2	3	4
Перекрытие снимков – P_x/P_y , %	70/45	80/60	90/70	90/90
Количество маршрутов	5	5	7	10
Общее количество снимков	85	141	316	451
Время обработки в Metashape (час: минут: секунд)	0: 14: 05	0: 23: 13	0: 57: 24	1: 55: 26
СКО вносимых отклонений в плановые координаты точек фотографирования (δX_ϕ , δY_ϕ), метр	± 5 (15)*	± 5 (15)	± 5 (15)	± 5 (15)
СКО вносимых отклонений по высоте точек фотографирования (δZ_ϕ), метр	± 10 (30)*	± 10 (30)	± 10 (30)	± 10 (30)
СКО угловых элементов внешнего ориентирования - α , β , K , градусы	± 3 (10)	± 3 (10)	± 3 (10)	± 3 (10)
СКО на контрольных точках (в плане/высоте), метр	0,24/0,18	0,22/0,19	0,23/0,18	0,21/0,16
<i>Примечание – В скобках максимальное значение.</i>				

В этой связи (при моделировании) получен интересный результат относительно производительности выбранных трех ЦФС для обработки вариантов модельных съемок. В работе отмечено, что все три программные средства, используемые для фотограмметрической обработки снимков, дают очень близкие по точности построения модели результаты, но существенно различаются по скорости обработки (таблица 3).

С аналогичным подходом был привлечен для имитационного моделирования лазерно-локационной съемки местности бортовой лазерный сканер, приспособленный для использования на платформах малогабаритных БВС. При моделировании использованы параметры российского лазерного сканера АГМ-МС1 от компании «АГМ Системы». На рисунке 7 показан результат имитационного моделирования лазерного сканирования той же области (кампус МИИГАиК), который представляет собой облако точек, экспортированное инструментарием программы «Blender» в специализированное ПО «CloudCompare» для обработки и визуализации.

Таблица 3 – Сравнение точности построения модели и времени моделирования трех программ

	Количество точек	Точность на модели СКО (пиксель)	Время обработки
Agisoft Metashape	1 605 896	0,23	3 ^h 24 ^m 55 ^s
Pix4D	1 444 425	0,5	1 ^h 31 ^m 03 ^s
Reality Capture	590876	0,89	0 ^h 50 ^m 15 ^s

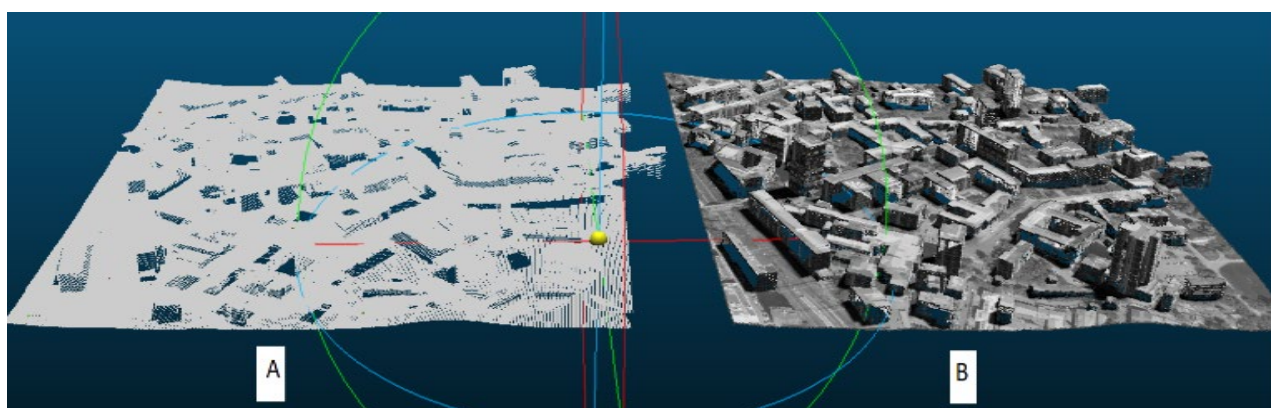


Рисунок 7 – Облака точек, сделанных с помощью: А) лазерного сканера, В) аэрофотосъемки

В результате моделирования процесса сканирования с высоты, как и при аэрофотосъемке 185 м, было получено облака ТЛО в количестве 9 513 469 точек, среднее расстояние между которыми равно 20 см, то есть порядка 25 точек на кв. м. Оценка точности полученной модели произведена по методу разности двойных измерений расстояний на модели ТЛО и эталонной модели местности.

Из этого был сделан вывод, что применение лазерно-локационного метода съемки может быть оправдано только высокими требованиями к конечной модели местности, что редко встречается в решении топографического картографирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровые модели местности и цифровые модели рельефа наряду с другими цифровыми документами территории играют особую роль в решении ряда задач, требующих точного позиционирования объектов на ней как по горизонтали, так

и по вертикали. В первом разделе работы нами отмечены картографо-топографические задачи, которые необходимо сегодня решать для восстановления разрушенной войной инфраструктуры, городских агломераций и промышленных объектов в Республике Сирия. Из основных технологий производства ЦММ (ЦМР) наше внимание было сосредоточено на самых передовых и в то же время доступных как в оперативном, так и в бюджетном отношении. Последнее означает, что топографические съемки приходится проводить в условиях военного времени и недоступности GSN сигналов, разреженной или полностью отсутствующей геодезической основы на безнадежно устаревших топографических картах.

Из анализа ситуации и условий в Сирии во втором разделе работы нами обосновывается использование технологии аэрофототопографической съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов легкого класса с пилотажно-навигационным оборудованием четвертого поколения. При этом рассматривался вариант использования комбинированного метода аэрофототопографической съемки с лазерно-локационной системой, существенно повышающей точность создания ЦММ по аппликату.

Для отработки методики аэрофототопографической съемки с целью создания ЦММ (ЦМР) обосновывается подход использования имитационного моделирования всех составляющих процесса создания трехмерных моделей местности, который позволяет выявлять влияние лётно-съёмочных и навигационных параметров съёмочной системы на точность построения результирующей модели. Обосновывается выбор среды трехмерного моделирования и подключаемые к этому процессу программно-технические средства его обеспечения – ГИС инструментарий, фотограмметрическое программное обеспечение, бортовые и наземные средства обеспечения съемки. Предлагается технологическая схема экспериментальных имитационных съемок, в которой предусмотрены исследования влияния вариаций навигационных параметров беспилотной съёмочной системы на точность создания цифровых 2D-3D документов о местности. Таким образом реализуется основная задача работы – разработка методики оценки влияния вариаций навигационных параметров съёмочной системы БВС на точность создания ЦММ.

В работе приведены многочисленные результаты экспериментальных имитационных съемок и анализ их результатов, подтверждающих выгодность и целесообразность предлагаемого в методике подхода имитационного моделирования аэрофототопографического метода создания ЦММ (ЦМР), позволяющего

выбирать оптимальные параметры методов съемки в зависимости от требований и условия создания цифровых документов о местности.

На основании проведенных экспериментальных работ в рамках имитационного моделирования аэрофототопографического метода создания ЦММ территории можно сделать следующие обобщенные выводы.

1 С учетом неудовлетворительного состояния планово-высотной геодезической основы в Республике Сирия при создании ЦТК, ЦММ и ЦМР аэрофототопографическим методом предполагается использовать местные, локальные системы координат. Эти системы могут быть получены современными методами (GPS), но, учитывая ситуацию с безопасностью, политическую ситуацию в Сирии и отсутствие больших возможностей, доступны альтернативные методы, обеспечивающие требуемую точность, наиболее важными из которых являются традиционные методы интенсификации геодезических сетей для ранее существовавших точек.

2 Для повышения точности создания ЦММ, предназначенных для целей восстановления инженерного обеспечения территорий, разрушенных войной, необходимо (предполагается) проводить аэросъемочные работы, совмещающие АФС с лазерно-локационной съемкой.

3 Разработана методика имитационного компьютерного моделирования для изучения (оценки) влияния вариаций большого числа навигационных и аэрофотосъемочных параметров аэрофототопографической съемки с платформы БВС на точность создания ЦММ.

4 Имитационное моделирование аэрофототопографических работ в программных средствах типа «Blender» дает корректные, объясняемые результаты и позволяет профессионально ставить экспериментальные работы по аэрофототопографической съемке местности, заменяя натурные сложные эксперименты, экономя время, затраты на оборудование и накладные расходы, как правило, сопровождающие реальные полевые аэрофотосъемочные работы.

5 Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что различные программные средства для фотограмметрической обработки данных съемки дают весьма близкие по точности цифровые модели местности и могут влиять только на общую производительность аэрофототопографических работ в целом.

Разработанная методика имитационного моделирования может быть рекомендована как эффективное средство обучения по курсам, связанным с техноло-

гиями летно-съёмочных работ для целей топографического картографирования территорий в крупных масштабах.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются более детальное изучение в этом же аспекте методов ВЛС, а также выявление взаимосвязи использования методов аэрофототопографии и методов воздушного лазерного сканирования на точность конечной продукции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Акель Мохаммад Амин. Создание крупномасштабных цифровых моделей местности и рельефа в условиях Сирийской Арабской Республики / Акель Мохаммад Амин. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2022. – Т. 66. – № 1. – С. 32–41. – DOI 10.30533/0536-101X-2022-66-1-32-41.

2 Алтынов, А. Е. Исследование влияния вариаций навигационных параметров съёмочной системы (аэрофотосъемки, лазерного сканера) на точность создания ЦММ с помощью имитационного моделирования / А. Е. Алтынов, Акель Мохаммад Амин. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 5. – С. 110–120.

3 Акель Мохаммад Амин. Использование методов имитационного моделирования для поиска наилучших решений получения трехмерных моделей местности по данным с беспилотных авиационных систем / Акель Мохаммад Амин, Акел Магер Нассер, А. Е. Алтынов. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 8. – С. 150–159. – DOI 10.17513/use.37882.

4 Акель Мохаммад Амин. Выбор соответствующих параметров аэрофотосъемки с БВС для получения ЦММ с необходимой точностью / Акель Мохаммад Амин. – Текст : непосредственный // Сборник докладов II Международной научно-практической конференции (Томск, 27–29 апреля 2021 г.). Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – 2022. – 880. – С. 391–396.