

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК)

На правах рукописи

Акель Мохаммад Амин



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

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Алтынов Александр Ефимович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОВРЕМЕННОЕ ТОПОГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В РЕСПУБЛИКЕ СИРИЯ И МЕТОДЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МЕСТНОСТИ	12
1.1 Современные документы о местности и задачи, решаемые с их помощью	12
1.2 Методы построения цифровых моделей местности и рельефа	15
1.3 Методы получения первичных пространственных данных о местности	20
1.3.1 Топогеодезический метод съемки рельефа	21
1.3.2 Фототопогеодезический метод	23
1.3.3 Лазерно-локационные методы съемок (наземная, мобильная и воздушная ЛС).....	24
1.3.4 Радиолокационный метод съемки (воздушный, космический)	28
1.4 Современное состояние геодезического обеспечения Республики Сирия и сложности, вызванные сложившейся ситуацией.....	31
1.4.1 Задачи, требующие использования ЦМР в Сирии	36
1.4.2 Перспективы создания ЦММ (ЦМР) в Сирии	40
Выводы по первому разделу	43
2 ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БВС ПРИ АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОМ МЕТОДЕ СОЗДАНИЯ ЦММ.....	44
2.1 Анализ параметров БВС, используемых в геодезии и топографии РФ	44
2.2 Обзор используемых вариантов полезной нагрузки для проведения съемочных работ с борта БВС	49
2.3 Особенности аэрофототопографической съемки с борта БВС	52
2.4 Особенности лазерно-локационной съемки с борта БВС	55
2.5 Сравнение использования аэрофотосъемки и лазерного сканирования для создания цифровых моделей местности	59
2.6 Создание ЦММ с помощью доступной и оптимальной методики в соответствии с ситуацией в Сирии.....	62
2.7 Совершенствование методов съемки с БВС для повышения точности ЦММ и ЦМР	64

Выводы по второму разделу	68
3 ЦИФРОВОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИХ И СКАНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. СОЗДАНИЕ ДОКУМЕНТОВ О МЕСТНОСТИ	70
3.1 Выбор программ и подготовка их к выполнению задачи	71
3.2 Подготовка исходных данных для имитационного моделирования съемки.....	75
3.3 Калибровка камеры	78
3.4 Моделирование процесса аэрофототопографической съемки	81
3.5 Моделирование процесса создания ЦММ по данным лазерного сканирования	85
3.6 Схема технологии изучения влияния вариаций навигационных параметров БВС на точность создания ЦММ в рамках имитационного моделирования воздушных съемок	88
Выводы по третьему разделу	89
4 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ БВС НА ТОЧНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЦММ	90
4.1 Исходные данные и расчет АФС элементов для процедур моделирования АФС с целью создания ЦММ.....	90
4.2 Экспериментальные исследования влияния навигационного оснащения БВС на точность результатов фотограмметрической обработки	95
4.2.1 Исследование вариантов создания ЦММ по данным АФС при наличии опорных точек	95
4.2.2 Исследование вариантов создания ЦММ по данным АФС при отсутствии наземных опорных точек геодезической сети	99
4.3 Сравнение погрешностей построения создаваемой модели при имитационном моделировании с результатами реальной аэросъемки одного и того же района	106
4.4 Исследование вариантов создания ЦММ по результатам ВЛС и АФС	107
4.4.1 Влияние высоты на окончательные модели (влияние плотности ТЛО).....	109
4.4.2 Сравнение точности с моделями по результатам АФС	110

4.5 Ступение геодезической сети четвертого класса для создания опорных и контрольных точек для проведения АФС	111
Выводы по четвертому разделу	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ОТЧЕТ AGISOFT METASHAPE ОБРАБОТКИ РЕАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПРИМЕРА	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ОТЧЕТ AGISOFT METASHAPE ОБРАБОТКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИМЕРА	138
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) ОТЧЕТ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЙ ПУНКТОВ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 (обязательное) МЕТОДИКА 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «BLENDER» ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ТОЧНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ	146

ВВЕДЕНИЕ

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 оши-

бок 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 Федерации (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 стратегически 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 ограничивают 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 реше-

ний 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 оп-

тимальных 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 съёмочной 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», г. Томск, 26–28 апреля 2022 г.

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.

1 СОВРЕМЕННОЕ ТОПОГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В РЕСПУБЛИКЕ СИРИЯ И МЕТОДЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МЕСТНОСТИ

1.1 Современные документы о местности и задачи, решаемые с их помощью

В настоящее время в России, как и во многих зарубежных странах, включая Сирию, основным документом о местности является цифровая топографическая карта – ЦТК (или топографический план – ЦТП) на участок земной поверхности в пределах границы номенклатурного листа в принятой разграфке. Цифровая топографическая карта ЦТК (англ. digital topographic map – DTM) – это совокупность векторных данных вместе с семантическим описанием объектов на конкретный участок земной поверхности (или акватории), которые хранятся на машинном носителе. Преимущество ЦТК в их компактности, высокой скорости обновления, возможности просмотра и редактирования карты на экране ПК и прочих устройств, редактирования и выполнения расчетов, вывода производной документации для печати [1]. В современной классификации – это двумерный (2D) документ о местности.

С развитием технологий трехмерной компьютерной графики появились трехмерные (3D) документы о местности в виде цифровых моделей местности и цифровых моделей рельефа [2–4].

Термин ЦМР был введен в 1970-х гг. с целью отличить двумерную форму моделирования рельефа местности в виде горизонталей от более сложных типов представления поверхности. Первоначально он использовался исключительно для ячеистых (растровых) моделей в виде пикетов высот, заданных в узлах пересечения регулярной сетки. В научной среде и сегодня нет единого мнения относительно того, что называть цифровой моделью рельефа. В зарубежной литературе ЦМР часто определяют как регулярный массив высот, отсчитываемых от какой-либо референсной поверхности [5–7]. Мы будем придерживаться такого определения: «ЦМР – совокупность (массив, файл) высотных отметок Z , взятых в узлах некоторой сети точек и закодированных в числовом формате» [8, 9].

Кроме того, не до конца урегулированным остается вопрос толкования и соотношения между собой схожих по своему смыслу терминов: цифровая модель рельефа ЦМР (DEM – digital elevation model), цифровая модель местности ЦММ (DTM - digital terrain model) и цифровая модель поверхности ЦМП (DSM – digital surface model). Мы будем придерживаться такого определения – ЦММ (DTM) – это цифровая модель местности, содержащая высоты точек земной поверхности и объектов естественного (например, растительность) и искусственного происхождения (например, здания и сооружения) [10].

ЦМП (DSM) — это непрерывная поверхность, которая помимо значений высот, сформированных в виде сетки (известной как цифровая модель рельефа (DEM)), также состоит и из других элементов, описывающих топографическую поверхность [6, 10].

В различных странах мира авторами предлагаются и иные формулировки: цифровая модель высот ЦМВ (DHM – digital height model), цифровая модель Земли ЦМЗ (DGM – digital ground model), цифровая модель высот местности ЦМВМ (DTEM – digital terrain elevation model) [10].

Очевидно, что создание 3D-документов о местности требует более сложных технологий сбора первичных данных о поверхности и объектов, находящихся на ней. Также потребовались инновационные решения в технологиях обработки массивов первичных пространственных данных, а также увеличения вычислительных мощностей для хранения, визуализации и работы с этим типом данных.

Особое внимание в нашей работе уделено технологическим прорывам в области сбора первичных данных о местности с борта беспилотных авиационных систем.

Эта передовая технология в сочетании с современным программным обеспечением дает наилучшие результаты в кратчайшие сроки [10].

Цифровое моделирование рельефа – одна из важных функций моделирования в геоинформационных системах. Работы с ЦМР включают две группы операций,

первая из которых создает модель рельефа, вторая – обеспечивает ее использование для решения научных и технических задач [2].

Каждую точку поверхности Земли невозможно отобразить в 2D-модели (топокарте), поэтому используются цифровые 3D-модели рельефа, на которых необходимые точки получают методом интерполяции [2–4].

Таким образом, за последние более чем тридцать лет технологии моделирования местности, наряду с развитием информационных технологий, произвели революцию в геодезии и картографии и внесли значительный вклад в точность, скорость и себестоимость сбора пространственных данных [11].

Резюмируя сказанное об основных 3D-документах о местности, перечислим кратко задачи, решаемые с помощью ЦММ и ЦТК, среди которых [12]:

- анализ поверхности рельефа;
 - построение различных карт в режиме реального времени;
 - расчет площадей и объемов;
 - генерация горизонталей;
 - построение гидросети;
 - анализ и вычисление уклонов и экспозиции склонов, а также других геометрических параметров рельефа местности;
 - просмотр данных в трех измерениях;
 - анализ зон видимости;
 - анализ освещенности территории и ветрового режима;
 - мониторинг и прогнозирования геологических и гидрологических процессов;
 - проведение проектно-изыскательных работ и мониторинга динамики рельефа;
 - создание модели возможного затопления,
- а также многие другие гражданские и военные задачи.

1.2 Методы построения цифровых моделей местности и рельефа

Способ построения ЦМР оказывает непосредственное влияние на зрительное восприятие рельефа, точность ЦМР и точность построенных по ним производных моделей [13, 14]. Для моделирования рельефа по данным, полученным в точках (пикетах), в зависимости от используемой схемы их размещения и типа математической модели, эти способы можно условно разделить на две группы.

Первая группа включает в себя методы построения модели рельефа на регулярной сетке, высоты в которых получаются линейной и нелинейной интерполяцией высот с применением корреляционных функций, сплайнов. Параметры используемой математической модели вычисляются по опорным точкам, а затем используются для интерполяции высот произвольных точек в области моделирования [15].

Вторая группа способов построения ЦМР включает в себя способы, основанные на построении геометрически упорядоченной модели, в состав которой входят либо определенным образом упорядоченные линии, либо поверхности многогранников (треугольников, квадратов или иных фигур) (рисунок 1).

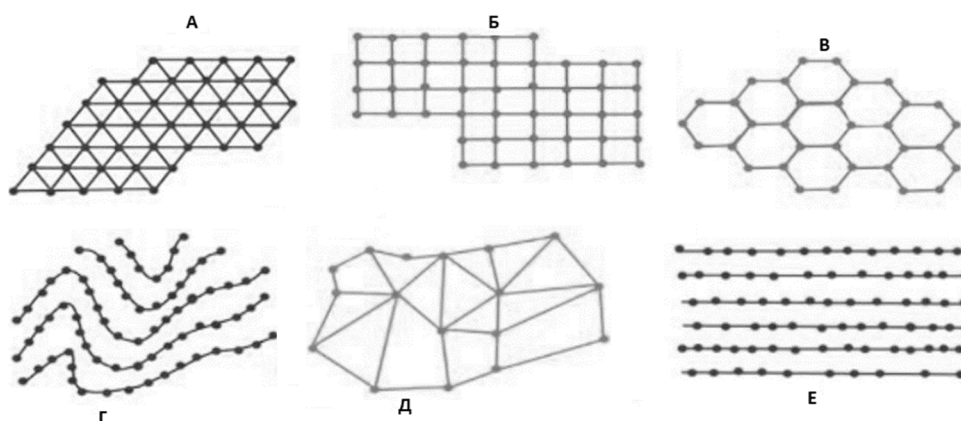


Рисунок 1 – Виды ЦМР: А – в узлах треугольных сеток; Б – в узлах правильных прямоугольных сеток; В – в узлах шестиугольных сеток (регулярные); Г – на горизонталях; Д – нерегулярные на структурных линиях; Е – на линиях, параллельных оси фотограмметрических координат

Создание ЦМР с использованием данных нерегулярной триангуляционной сети TIN **TIN–Triangulated Irregular Network**, включающей некоторую совокупность точек с высотными отметками, по которым проведена триангуляция с учетом линий разрыва непрерывности, сводится к построению оптимальной сети треугольников, которые стремятся быть как можно ближе к равносторонним. Использование модели TIN для получения высот новых точек не совсем удобно, поскольку для этого необходимо не только определить принадлежность точки конкретному треугольнику, но и определить ее барицентрические координаты и выполнить линейную интерполяцию высоты этой точки по отметкам вершин треугольника. В практических целях удобнее использовать модель сетки со сторонами, параллельными координатным осям X и Y системы местности. Такая модель называется регулярной и известна как модель DEM, или матрица высот.

Для ее построения используют либо TIN и горизонталы, предварительно созданные на основе опорных точек, либо полиномиальные методы. Регулярная модель (матрица высот) рассчитывается с помощью линейной интерполяции высот – по ближайшим точкам сети треугольников или горизонталей, а во втором случае – по известным параметрам полиномиальной функции [15]. Большинство современных цифровых фотограмметрических систем (ЦФС) и ГИС-пакетов так или иначе способны реализовать все представленные выше методы создания ЦМР. Наибольшее распространение из их числа получили алгоритмы построения геометрически упорядоченных моделей TIN и DEM. Точность воспроизведения особенностей рельефа местности в ЦМР зависит от выбора метода расчета [16].

Модель Grid (рисунок 2). В английском языке регулярная сетка квадратов называется GRID, поэтому в русскоязычной литературе часто используют слово «грид».

По способу вычисления значения уровней поля между узлами сетки различают решеточные и ячеистые сетки. В первой из них такие значения интерполируются по значениям высот в соседних точках, вторая модель рассматривает точки как центры ячеек с постоянным значением отметки высоты [17–19].

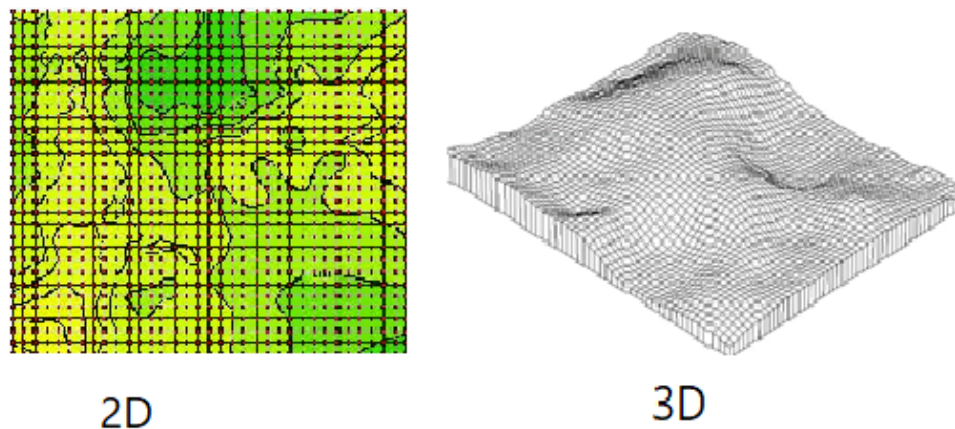


Рисунок 2 – ЦМР в виде Grid

Недостатком представления рельефа в виде регулярной матрицы является несоответствие координатной сетки (точек матрицы) структуре рельефа. Здесь предполагается равнозначность всех точек цифровой модели (иными словами, предполагается непрерывность и плавность рельефа) и допускается возможность игнорировать особые, наиболее значимые точки рельефа, находящиеся на линиях тальвегов и водоразделов, перегибах скатов. В связи с этим важным является выбор оптимального шага сетки, так как с его увеличением растут погрешности цифровой модели, а с уменьшением резко возрастают объемы данных.

Метод Grid в большинстве случаев дает хорошие результаты, даже когда плотность опорных точек невелика. Однако при некотором расположении опорных точек с соответствующими значениями в них возможно появление нежелательных осцилляций (резкие пики или впадины) [20, 21].

Сравнение методов интерполяции показывает, что моделирование на основе триангуляции является самым быстрым, еще на предварительной стадии создания цифровой модели позволяет оперативно обнаруживать ошибки в данных, оценивать распространение показателя.

Программы для обработки данных и визуализация ЦММ [22, 23]. Для обработки исходных данных, построения и работы ЦМР необходимо использовать специализированное программное обеспечение (ПО), которое является сложным комплексом, реализующим все операции обработки и визуализации на основе со-

ответствующих алгоритмов. Современное ПО для обработки данных геодезических съемок представлено в виде программных комплексов, позволяющих выполнять многие необходимые операции. К числу этих операций относятся: ввод данных с разных геодезических приборов; построение ЦМР; трехмерная визуализация; интерполяция высот; построение профилей; построение изолиний; построение изоклин; расчет экспозиций склонов; расчет объемов земляных работ; расчет разности поверхностей; анализ видимости; анализ водостока; геостатистика.

Самые широкие возможности по моделированию поверхностей и решению практических задач на ЦММ имеют модули – расширения мощных полнофункциональных ГИС-пакетов. Как правило, они поставляются в качестве надстройки над популярными программными комплексами и поэтому наиболее распространены в мире. В качестве примеров можно привести модули Spatial Analyst, 3D Analyst, Geostatistical Analyst ГИС пакета Arc GIS (ESRI Inc.), Vertical Mapper программы MapInfo (MapInfo Corp.), Autodesk Map 3D системы Auto CAD (Autodesk Inc.), Terrain пакета Geo Media (Intergraph Corp.) и пр.

Собственно, создание цифровых моделей поверхности по исходным данным осуществляется программными комплексами в зависимости от источника и характера первичных данных. Первичными данными могут быть или массив топогеодезических полевых измерений, или блок перекрывающихся аэрофотоснимков, или облако точек лазерных отражений и, наконец, результат интерферометрической радиолокационной съемки. Поэтому в первом случае мы используем ПО «Кредо дат», во втором – ПО PHOTOMOD (компания Ракурс), в третьем – MicroStation, а для данных радиолокационной съемки – ПО «Радар Фотомод». Каждый источник первичных данных требует специфическое программное обеспечение, включающее несколько этапов, требующих применения мощных вычислительных платформ.

Так, например, стереофотограмметрическая обработка блоков перекрывающихся снимков осуществляется на цифровых фотограмметрических станциях (ЦФС), обеспечивающих такие процессы, как импорт (загрузки) снимков (1), фототриангуляцию (2) привязку фотограмметрической модели к реальной местности

(3), создание плотного облака точек (4), фильтрацию точек, принадлежащих поверхности, и точек надземных объектов (5), исключение или удержание естественных (растительность) или построенных (здания, дома и т. д.) надземных объектов из плотного облака точек и создание ЦММ (или ЦМР) с ортофотопланом.

Даже если программное обеспечение может автоматически предоставлять результаты, вмешательство оператора необходимо на определенных этапах обработки данных, особенно для проверки точности совмещения и удаления точек, принадлежащих надземным объектам, для извлечения точек земли для создания ЦМР [24].

Что касается программ, которые поддерживают и обрабатывают сырье, генерируемое лазерными сканерами (облака точек лазерных отражений), то рынок ПО для обработки данных лазерного сканирования постоянно обновляется и динамично развивается. Самые успешные из них производятся известными фирмами, такими как Autodesk, Bentley, Trimble, 3D Systems, FARO. Как следствие, постоянно появляются новые продукты. Среди программ обработки данных лазерного сканера представим, например [25, 26] основные программные комплексы обработки первичных данных съемок для целей создания 2D-, 3D-документов о местности (таблица 1).

Таблица 1 – Программы создания ЦММ (ЦМР)

Название программного продукта	Страна-производитель	Тип исходных данных
PHOTOMOD (комп. Ракурс)	Россия	Стереопары снимков
MetaShape (Agisoft)	Россия	Стереопары снимков
Reality Capture	Словакия	Стереопары снимков
TrimbleUASMaster	США	Стереопары снимков
Trimble INPHO	США	Стереопары снимков
Pix4d	Швейцария	Стереопары снимков
ENVI OneButton	США	Аэрофотосъемка
Leica Cyclone 9	Швейцария	Лазерный сканер ТЛО
PHOTOMOD RADAR (комп. Ракурс)	Россия	Радиоголограмма
RiScan Pro, RiProcess	Австрия	Лазерный сканер
Technodigit 3DReshaper	Франция	Лазерный сканер
GeoPlus VisionLidar	Канада	Лазерный сканер
MicroSurvey CAD 2017	Канада	Лазерный сканер
АГМ ДорПаспорт	Россия	Лазерный сканер
АГМ Паноскан	Россия	Лазерный сканер
АГМ Сканворкс	Россия	Лазерный сканер

Форматы геоданных. Принципиально можно выделить векторные и растровые форматы геоданных. В контексте ГИС векторные форматы данных (или по сути – векторные модели хранения данных) являются одним из главных способов моделирования объектов реального мира.

Практически любые объекты природного ландшафта или города могут быть представлены как точки, линии (полилинии) или полигоны. Именно такие простейшие геометрические объекты (геометрические примитивы), снабженные атрибутивной информацией, хранятся как векторные модели реальных объектов. Далее мы чаще всего будем использовать формат векторных геоданных *.shp ГИС ArcView.

Формат *.shp состоит из набора одноименных файлов, которые описывают геометрию объектов, хранят их уникальные идентификаторы, табличные данные, информацию о системе координат.

*.shp – информация о геометрических объектах;

*.dbf – атрибутивная информация геометрических объектов;

*.shx – индексный файл связи *.shp и *.dbf;

*.sbn, *.sbx – файлы пространственных индексов;

*.cpg – информация о кодировке;

*.prj – информация о пространственной привязке;

*.laz, *.las – файлы облака точек;

Если один из файлов набора будет утерян, данные могут быть повреждены.

На сегодняшний день для обработки первичных данных наиболее распространены следующие программные комплексы, приведенные в таблице 1 [27].

1.3 Методы получения первичных пространственных данных о местности

В процессе получения исходных данных о рельефе или местности инструменты и оборудование могут быть установлены на наземных устройствах, воздушных носителях и космических летательных аппаратах.

В зависимости от этого различают следующие виды получения данных о рельефе [28]:

- картометрический метод – оцифровка бумажных архивных карт;
- наземные топогеодезические методы съемок;
- наземный или аэрофототопографический методы съемки;
- наземное или воздушное лазерное сканирование;
- радиолокационные методы съемки.

В настоящее время, как источники данных для создания ЦМР, оцифрованные топографические карты и материалы полевых съемок постепенно отходят на второй план, уступая место более прогрессивным и эффективным методам извлечения данных о рельефе – обработке материалов ДЗЗ.

Существуют различные методы съемок для получения исходных данных для создания ЦМР. Рассмотрим кратко принципы и особенности перечисленных методов съемки местности.

1.3.1 Топогеодезический метод съемки рельефа

Материалы полевых съемок по-прежнему остаются одним из самых точных источников данных для построения ЦМР. За последнее время их инструментарий претерпел серьезные изменения. Стандартный набор современных инструментов для измерений углов и расстояний на местности включает в себя дальномеры, оптические и лазерные нивелиры, теодолиты, лазерные сканеры и тахеометры. Современные электронные тахеометры оснащены микрокомпьютерами для вычисления углов и расстояний и преобразования их в координаты точек на местности. Существуют отражательные и безотражательные тахеометры. В безотражательных тахеометрах используется мощный лазерный луч, который может отражаться от любых объектов на местности [29, 30].

Топогеодезическая съемка участка местности (как правило, в границах номенклатурных трапеций) проводится в несколько обязательных этапов:

- а) сбор и обработка исходных материалов, составление плана работ;
- б) изучение земельного участка и рекогносцировка;
- в) создание съемочного обоснования;

- г) собственно топографическая съемка местности;
- д) импорт данных полевых измерений в ПО для камеральной обработки;
- е) обработка полученных материалов полевых работ;
- ж) создание оригиналов ЦТК и ЦМР.

Этот метод достаточно оперативен, часто используется в создании и обновлении топографических карт и планов крупных масштабов, но если же происходит съемка больших территорий, то этот процесс будет достаточно трудоемок и срок выполнения всех работ будет значительно увеличиваться. Плюсом данного метода является то, что он практически не зависит от погодных и сезонных условий. Но все же этот способ наиболее популярен при картографировании малых по площади территорий.

После выполнения полевых работ производится импорт данных полевых измерений в персональный компьютер с целью их последующей камеральной обработки, для автоматизации которой необходимо использовать специализированные программные продукты.

Сегодня часто используется спутниковые приборы геопозиционирования, позволяющие максимально сократить получение набора пикетов на местности для съемки и затем моделирования рельефа (рисунок 3).



Рисунок 3 – Топогеодезическая съемка и результаты съемки рельефа
в виде набора пикетов

Автоматизация полевых съемок работ позволяет не только повысить производительность, но и максимально снизить влияние человеческого фактора. Основным недостатком данного метода являются большие трудозатраты, и следовательно, продолжительное время выполнения полевых работ.

1.3.2 Фототопогеодезический метод

Метод основан на создании карт и планов стереофотограмметрическими методами по результатам аэрофотосъемки или наземной фототеодолитной съемки (рисунок 4). По аналогии с предыдущим методом, этапы аэрофототопогеодезических работ включают [31]:

- а) сбор и обработку исходных материалов на объект съемки, составление плана работ;
- б) техническое проектирование аэросъемки местности;
- в) создание съемочного обоснования и установку базовых ГНСС-станций для реализации режима RTK;
- г) собственно, топографическая аэрофотосъемка местности, оценку качества материалов съемки;
- д) камеральный этап, включающий фотограмметрическую обработку полученных снимков с совокупностью полевых определений, – получение ЦММ;
- е) создание оригиналов ЦТК и ЦМР и отчетных документов.

Перед выполнением аэрофотосъемки выполняется расчет ее параметров (высота фотографирования, перекрытия, базис, количество маршрутов и др.), составляется полетная карта и создается съемочное обоснование для определения элементов внешнего ориентирования (ЭВО) снимков и оценки точности построения модели местности. Для развития такой сети используется определение координат опорных точек с помощью технологии ГНСС, которая является значительно более эффективной по сравнению с традиционными методами [32].

Для проведения АФС обычно используется самолет или вертолет (пилотируемый или беспилотный), оборудованный топографическим ЦАФА, работа кото-

рого синхронизирована с бортовым и наземным сегментом ГНСС, а также вспомогательное оборудование [33].



Рисунок 4 – Фотограмметрический метод создания ЦМР

К достоинствам данного метода съемки можно отнести оперативность, детальность, охват обширных и труднодоступных территорий.

Во время камеральных работ фотограмметрист видит трехмерную модель местности, что позволяет выполнять дешифрирование быстро и надежно. Таким образом, на основе полученных аэроснимков происходит комплексное выполнение всех необходимых видов топогеодезических работ, а именно: построение ЦМР, ортофотоплана, а также выполнение дешифрирования [34].

1.3.3 Лазерно-локационные методы съемок (наземная, мобильная и воздушная ЛС)

Одним из наиболее значительных технологических достижений начала XXI в. в геодезии и ряде смежных отраслей стало внедрение в практику лазерных сканирующих систем. Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) – это высокотехнологичная топографо-геодезическая методика получения геопространственных данных по рельефу и находящимся на нем объектам, в трехмерном режиме с летательного аппарата с применением скоростной сканирующей системы высокой точ-

ности, определяющей координаты точек лазерных отражений (ТЛО) с возможностью фильтрации наземных объектов по определенным заданным характеристикам.

Сущность метода заключается в реализации прямой геодезической засечки при каждой посылке лазерного импульса с фиксацией координат точки посылки импульса, расстояния от этой точки до точки отражения лазерного луча и двух углов, определяющих направление лазерного луча в текущей системе координат. Таким образом в единичном измерении регистрируются горизонтальный φ , вертикальный ν углы, расстояние до ТЛО – D , а также спектральная яркость отраженного сигнала B (рисунок 5).

Для каждого сканера задается диапазон (φ_{\min} , ν_{\min} и φ_{\max} , ν_{\max}) и шаг ($\Delta\varphi$, $\Delta\nu$) изменения горизонтальных и вертикальных углов, и сканер автоматически с помощью моторов последовательно перенаправляет луч лазера в сторону поверхности Земли и регистрирует параметры φ , ν , D и B для каждой точки объекта в заданных пределах. Точность установки $\Delta\varphi$, $\Delta\nu$ помощью моторов ниже точности измерения углов φ , ν , поэтому для каждой точки сканирования регистрируются значения φ , ν . Соответствующие координаты точек модели $X_{об}$, $Y_{об}$, $Z_{об}$ объекта вычисляются по известным формулам прямой геодезической засечки:

$$\begin{bmatrix} X_{об} \\ Y_{об} \\ Z_{об} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c + \Delta X_c \\ Y_c + \Delta Y_c \\ Z_c + \Delta Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c + D \cos(\nu) \cdot \cos(\varphi) \\ Y_c + D \cos(\nu) \cdot \sin(\varphi) \\ Z_c + D \sin(\nu) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Помимо ВЛС, применяются для съемки местности и системы наземного лазерного сканирования (НЛС), и системы мобильного (наземного) лазерного сканирования (МЛС) (рисунок 6) [35–37]. Принцип действия и получаемые данные идентичны ВЛС, но в целом ориентированы на съемки компактных или линейно протяженных объектов преимущественно в городах с преобладанием вертикально расположенных объектов.

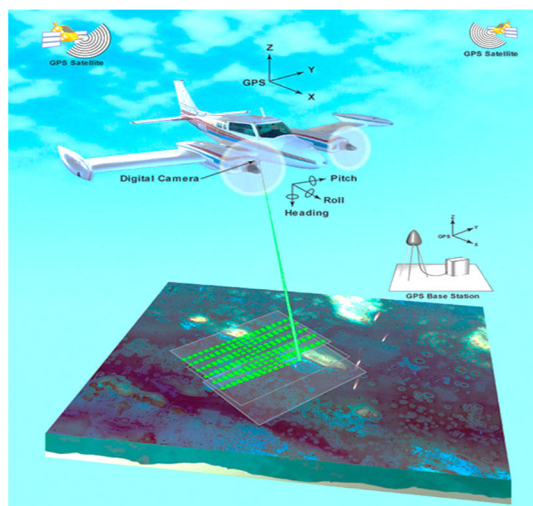


Рисунок 5 – Лазерно-локационный метод воздушной съемки



Рисунок 6 – Лазерно-локационные методы съемок (наземное и мобильное)

Исходя из комплекса задач, изложенных выше, нам технологически подходят только мобильное (от части) и воздушное лазерно-локационные методы съемок, на котором присутствуют этапы создания ЦТК и ЦММ:

- 1) сбор и обработка исходных материалов на объект съемки, составление плана работ;
- 2) техническое проектирование работ по лазерному сканированию;
- 3) создание съемочного обоснования (планово-высотного обоснования);
- 4) собственно топографическая лазерно-локационная аэрофотосъемка местности, оценка качества материалов съемки;
- 5) камеральный этап, включающий обработку полученных данных съемки облака ТЛО с совокупностью полевых определений для получения ЦММ;

б) создание оригиналов ЦТК и ЦМР и отчетных документов.

Полевые работы начинаются с создания планово-высотного обоснования, (ПВО) основного для ВЛС и сочетающего в себе основное и рабочее для НЛС. Способ определения координат пунктов основного ПВО аналогичен тому, что используется при выполнении тахеометрической съемки или съемки с использованием ГНСС. Координаты ПВО определяются с использованием линейно-угловых измерений в безотражательном режиме и закрепляются специальными сканерными марками.

Далее выполняется сканерная съемка. В случае НЛС происходит выбор углового шага сканирования и местоположения ПВО, при котором достигается наибольший захват окружающих объектов [38].

Система ВЛС состоит из сканера, спутниковой (ГНСС) и инерциальной навигационных систем (ИНС). Определение координат с помощью высокоточной ГНСС-аппаратуры, работающей в дифференциальном режиме совместно с ИНС, позволяет знать местоположение сканера в момент съемки, а также ориентацию сканера в пространстве, то есть поперечный и продольный углы направления лазерного луча. Это дает возможность однозначно определить абсолютные координаты каждой точки лазерного отражения (ТЛО) в пространстве.

Для нас важно то обстоятельство, что в развитии малой беспилотной авиации и миниатюризации съемочных систем в последнее время также стали широко применяться и БВС, на которые устанавливаются малогабаритные лазерные сканеры.

Полученные с НЛС, МЛС и/или ВЛС данные обрабатываются в программном продукте, который обычно поставляется производителем сканера. В ходе камеральных работ выполняется процедура формирования единой модели, подгружается файл с координатами всех марок рабочего ПВО, определяется средняя квадратическая погрешность (СКП) измерений и производится автоматическое определение точек класса «земля», на основе которого происходит построение цифровой модели рельефа и последующее создание горизонталей. Для создания ВЛС является оптимальным видом лазерного сканирования.

На основе полученного облака точек происходит векторизация объектов местности с помощью программных инструментов для создания полигонов, линий и точек. Внешний вид этих объектов оформляют в соответствии с принятым кодификатором условных знаков.

Съемка с использованием лазерного сканирования обладает высокой точностью и производительностью полевых работ. Благодаря лазерным сканерам, возможно удаленно снимать труднодоступные объекты, а также рельеф, расположенный под густой растительностью. При выполнении камеральных работ оператор имеет перед собой трехмерную модель, на которой видна реальная ситуация местности, а не отдельные точки, как в случае с тахеометрической съемкой или съемкой с использованием ГНСС. В совокупности с фотоснимками это позволяет производить камеральное дешифрирование и получать достоверный результат.

Однако данный метод съемки не лишен и недостатков. Во-первых, из-за высокой стоимости оборудования данный вид съемки нецелесообразно выполнять для небольших территорий. Во-вторых, съемку на основе ВЛС невозможно выполнить без одновременной аэрофотосъемки, необходимой для дешифрирования территории. Таким образом, для создания топографического плана необходимо совмещать сразу два вида съемки, что повышает стоимость и сложность проводимых работ. При этом в результате полевых работ получают сразу два разнородных вида данных: растровое изображение и облако точек, это усложняет и камеральные работы.

Но постепенно обработка данных становится автоматизированной и, следовательно, камеральные работы становятся проще.

1.3.4 Радиолокационный метод съемки (воздушный, космический)

Радиолокационная съемка местности с самолетных и космических носителей вошла в арсенал методов изучения и картографирования земной поверхности. Основной метод получения радиолокационного изображения местности – метод бокового обзора с синтезированной апертурой, позволяющий получать изображения,

сопоставимые по разрешающей способности с оптико-электронными системами съемок (рисунок 7).

Одним из перспективных направлений в радиолокационных методах в использовании данных радиолокационной съемки является интерферометрическая съемка с двух носителей и специализированная обработка такой пары радиолокационных снимков, полученных РЛС с синтезированной апертурой.

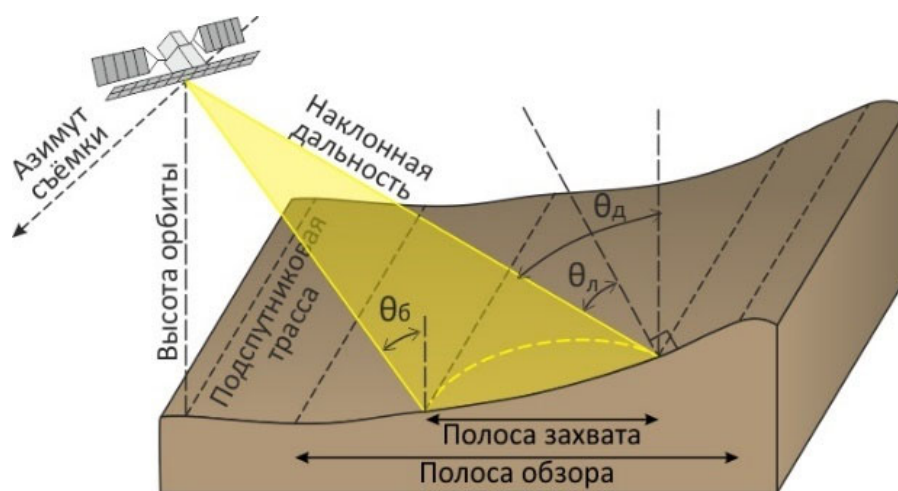


Рисунок 7 – Геометрия радиолокационной съемки

По сравнению с другими видовыми средствами наблюдения, радиолокационная съемка выгодно отличается:

- независимостью от метеорологических условий;
- независимостью от условий освещенности местности;
- повышенной точностью измерения характеристик превышения объектов;
- возможностью трехмерного моделирования объектов и построения карт рельефа местности;
- возможностью получения информации, связанной с особенностями взаимодействия радиоволн с объектами наблюдения (выявление диэлектрических свойств, внутренней структуры и др.);
- возможностью наблюдения объектов, скрытых снежным или растительным покровом;

Суть космической радиолокационной интерферометрии заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных съемкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами либо одной антенной на двух или нескольких витках орбиты [39]. Повторная съемка того же участка с космического аппарата может длиться от 2 до 24 суток, что для оперативного получения данных о состоянии наблюдаемого объекта весьма неудовлетворительно [40].

Радиолокационная интерферометрия использует эффект интерференции электромагнитных волн. Технология интерферометрической обработки радиолокационных данных предполагает получение нескольких когерентных измерений одного и того же района земной поверхности со сдвигом в пространстве приемной антенны радиолокатора. Основная идея метода заключается в формировании интерферограммы, которая представляет собой результат перемножения двух комплексных радиолокационных изображений одной и той же территории, полученных идентичными съемочными SAR (радиолокатор с синтезированной апертурой (англ. Synthetic Aperture Radar, SAR) [41–43].

В таблице 2 собраны данные, отражающие диапазон погрешностей определения топографических данных по аппликату рассмотренных выше методов съемок земной поверхности.

Анализ геодезических измерений, аэрофотосъемки и спутникового сканирования позволяет сделать вывод о том, что точность ЦМР зависит не только от точности определения, но и от технологии получения данных.

Таблица 2 – Вертикальная точность ЦМР

№	Технология	Точность (м)
1	Картометрический метод по готовым ЦТК	1/3 сечения рельефа
2	Наземный топогеодезический метод	0,01–1
3	Аэрофототопографический метод	0,1–1
4	Метод лазерного сканирования	до 0,05
5	Метод радиолокационной интерферометрии	0,01

Диапазон вертикальной погрешности ЦМР является индикатором точности детализации пространственных цифровых моделей [44, 45], но уровень детализации намного сложнее, чем генерализация, так как это связано с программным обеспечением и аппаратным модулем.

Вертикальная точность необходима для проектирования крупных и линейных инженерных сооружений. Качество исходных материалов играет важную роль при моделировании рельефа, изучении характеристик связанных с ним аспектов местности и точности итоговой модели.

1.4 Современное состояние геодезического обеспечения Республики Сирия и сложности, вызванные сложившейся ситуацией

Современное состояние картографо-геодезической отрасли Республики Сирия не позволяет решать высокотехнологические задачи создания 2D- и 3D- документов о местности крупных и сверхкрупных масштабов. В условиях непрекращающихся боевых действий и частичной оккупации значительных по площади территорий практически невозможно решать задачи их картографического обеспечения. В сложившейся ситуации возможно только развертывание топогеодезических работ в ограниченных, но важных районах страны, где крайне необходимы все виды топографических документов: ЦТК, ЦММ, ЦМР, ортофотопланы местности.

Нами предлагается и обосновывается аэрофототопографический метод создания ЦММ как наиболее приемлемый по ряду критериев (в том числе и финансовому), в котором использование беспилотных носителей съемочной аппаратуры может оказаться единственно возможным способом решения поставленной задачи.

Геодезическая система координат и ее хранители – пункты опорных сетей – были созданы в Сирии около века назад, и это относительно старая система. Эта ситуация порождает немало негативных обстоятельств [46].

Каждый год Министерство местного самоуправления разрабатывает планы и программы по улучшению топографической, геодезической ситуации и ситуации с

недвижимостью, но эти проекты и планы не завершаются по многим причинам, в числе которых:

– нестабильная социально-экономическая ситуация с безопасностью и продолжающаяся война, которая не только помешала выполнению геодезических работ, но и вызвала серьезные изменения, произошедшие в инфраструктуре первичной информации, а также потерю многих документов и карт;

– экономическая и политическая ситуация, которая вызывает нестабильность в работе с точки зрения необходимого оборудования и материалов (закупка, обслуживание, инвестиции, профессиональное руководство и т. д.).

Отсутствие государственной централизации геодезических работ и системы выполнения этих работ приводит к несогласованности и дублированию и, как результат, к непроизводительным затратам времени, сил и средств.

В 1926 г. в соответствии с Конституцией Республики Сирия был введен закон о создании опорной геодезической сети. Французские колониальные власти совместно с сирийскими специалистами начали создавать национальную геодезическую сеть на всей территории страны. Начальной точкой геодезической сети был принят пункт, располагавшийся в центре Сирии (карта Республики Сирия представлена на рисунке 8), с координатами $34,5^{\circ}$ с. ш. и 38° з. д. Первоначально национальная геодезическая сеть подразделялась на четыре класса [47]:

- 1-й класс – расстояние между пунктами сети 45–60 км;
- 2-й класс – 20–30 км;
- 3-й класс – 6–10 км;
- 4-й класс – расстояние между пунктами от 50 до 2 000 м.

Ошибка в положении пункта сети была ± 4 см. К 1930 г. общая площадь территорий, на которой была развита геодезическая сеть, составляла порядка 2,4 млн гектаров, но это только 12,8 % от общей площади страны [48].

По существу, на сегодняшний день в Сирии нет адекватной, отвечающей современным требованиям геодезической сети, закрепляющей систему координат, а система, существующая десятилетия, – это французская сеть, которая со временем

была деформирована, а ее ошибки увеличились. Не лучше обстоит ситуация с топографическими картами. Согласно инструкциям, топографические карты должны обновляться каждые 5 или 10 лет с использованием данных повторных полевых измерений и результатов аэрофотосъемки. А этого не произошло [46].

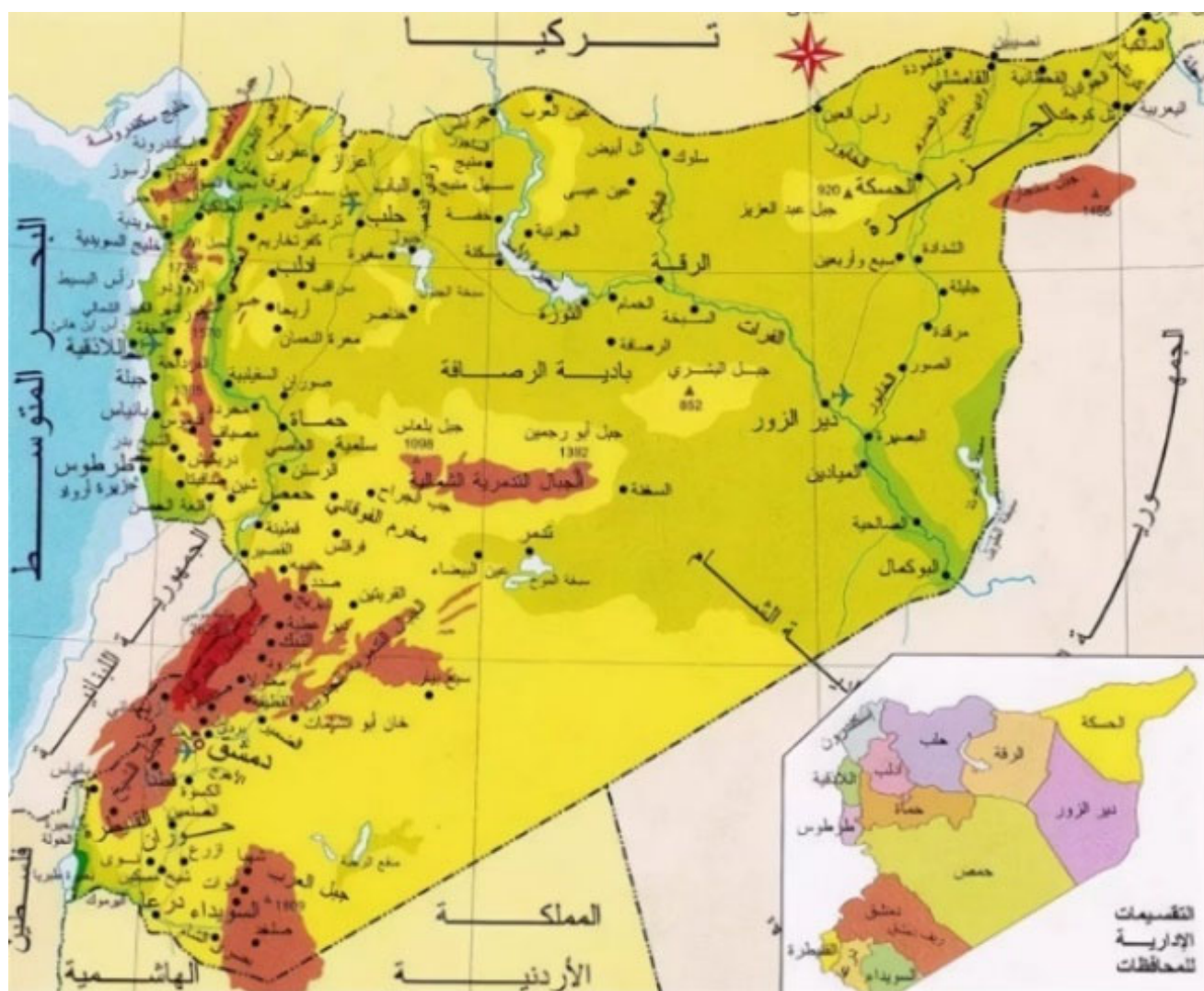


Рисунок 8 – Карта Республики Сирия

Все цифровые модели рельефа, которые имеются в Сирии на сегодняшний день, были получены в пределах определенных небольших областей для узкоспециализированных и временных целей. Точность определения координат по этим ЦММ неизвестна, а использование затруднительно из-за отсутствия единой системы отсчета [49].

Таким образом, общая задача в области геодезии и картографии в настоящее время состоит в необходимости оперативного получения пространственных данных на территории Сирии для создания картографических материалов и цифровых моделей местности в условиях чрезвычайно сложной ситуации в стране для некоторых важных (в стратегическом отношении) районов Сирии (в идеале – всей, Республики Сирия). Ситуация такова, что Сирия находится на начальном этапе восстановления экономики и социальной сферы после 10 лет войны, в результате которой были потеряны многие документы о местности, включая пункты опорной геодезической сети, топографические и геодезические карты. Также в ходе войны сильно пострадал кадровый потенциал в сфере геодезии. Существующие картографические материалы безнадежно устарели, поскольку территория была подвержена существенным изменениям, вызванным опустыниванием или войной.

Как известно, ЦММ и ЦМР могут создаваться с использованием различных методов, которые выбираются в зависимости от ряда критериев (размер области, время, необходимое для завершения задачи, характер региона и характер местности, требуемая точность, различная необходимость и цель их дальнейшего использования и т. д.). Следовательно, оптимальный выбор метода и подхода связан с несколькими критериями, которые необходимо отметить. Сложность ситуации в республике заключается в том, что создание современных цифровых моделей территории и рельефа связано с необходимостью реформирования (точнее, создания заново) геодезической основы всей страны и совершенствования математической базы.

На рисунке 9 представлены варианты двух моделей – самой грубой и самой точной цифровых моделей рельефа земных объектов, где слева показана модель рельефа земного геоида с точностью порядка 100 м, а справа – модель поверхности археологического раскопа с точностью $\pm 0,05$ м. Отсюда можно сделать вывод, что с увеличением точности модели резко сокращается область территории моделирования. Несмотря на большой прогресс программно-аппаратных средств построения и визуализации трехмерных моделей, это соотношение выбирается, исходя из целей и задач моделирования.

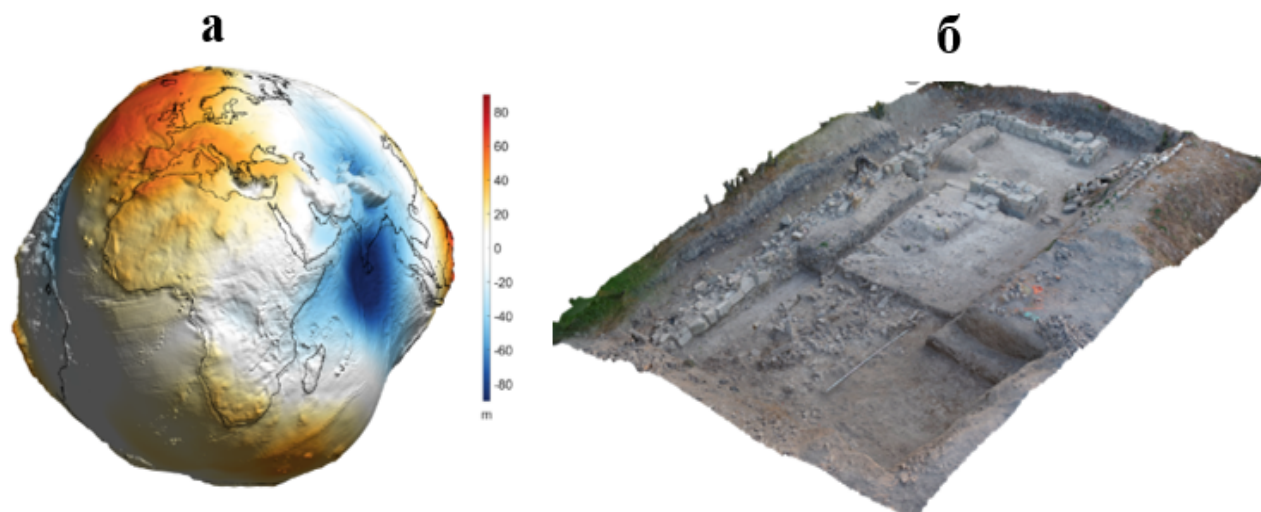


Рисунок 9 – Модель рельефа земного геоида с точностью порядка 100 м и модель поверхности археологического раскопа с точностью $\pm 0,05$ м

Подходы к обоснованию необходимой точности получения моделей рельефа с учетом площади снимаемой территории и условий, сложившихся в отдельных районах Республики Сирия следующие:

- Сирия располагается между долготами $N1=35^{\circ} 42'$ и $N2=42^{\circ} 23'$ и широтами $E1=32^{\circ} 18'$ и $E2=37^{\circ} 20'$;
- в Сирии приняли систему координат WGS-84;
- самая высокая точка в Сирии – Джабаль аш-Шейх (2 814 м) на границе с Ливаном.

Опыт показывает, что на всю территорию Сирии можно использовать данные глобальных ЦМР из открытых интернет-источников, соответствующие по точности картам от масштаба 1 : 100 000 (SRTM, англ. Shuttle Radar Topography Mission) до масштаба 1 : 25 000 (ASTER GDEM) [50]. Они пригодны для наглядного представления рельефа обширных территорий и решения некоторых задач стратегического планирования. Модель GDEM построена на сетке с ячейкой порядка 30 м (на широте Сирии) с точностью по аппликате около 2,5 м (рисунок 10). Очевидно, что такую модель нельзя использовать для инженерных задач, где нужны данные о положении контуров местности и рельефа, соответствующего масштабу 1 : 5 000 и крупнее.

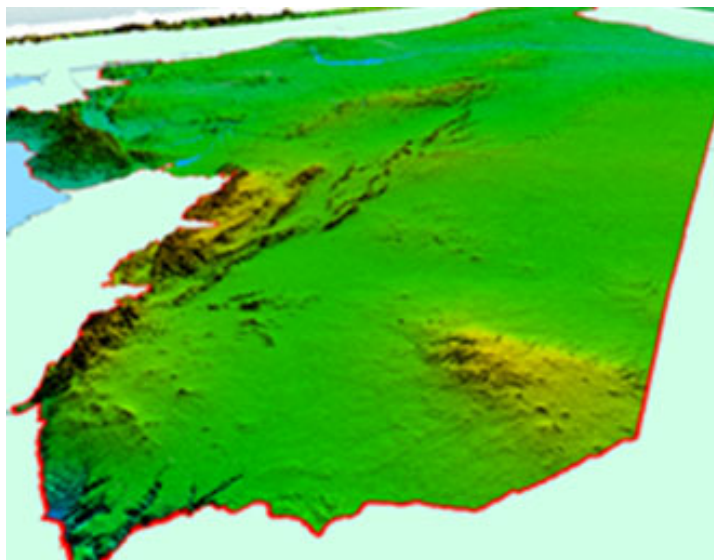


Рисунок 10 – Аксонометрия модели рельефа на территорию Сирии по данным GDEM

1.4.1 Задачи, требующие использования ЦМР в Сирии

Можно с уверенностью сказать, что Сирии, как развивающейся стране, необходимы все виды документов о местности и другие наборы пространственных данных, которые позволят решить ключевые задачи в хозяйственной и военной отраслях.

При этом необходимо принимать в расчет социально-экономические условия, в которых живет страна, включая, в том числе, и нехватку (или отсутствие) современного приборного и технологического обеспечения для проведения работ, а также недостаточное число специализированного и обученного персонала из-за санкций и западной блокады.

В качестве примера перечислим некоторые из ключевых задач, решения которых неотлагательно требует сложившаяся ситуация в стране.

1 Создание крупномасштабных карт и планов, описывающих городское и промышленное устройство с целью восстановления городов, городских районов, мостов, разрушенных войной, и восстановления городской инфраструктуры (рисунок 11).



Рисунок 11 – Руины освобожденного после военных действий г. Хомс (Сирия)

2 Демаркация границы между Сирией и соседствующими с ней государствами, в первую очередь с теми, откуда поступает основная военная угроза.

3 Изучение и количественная оценка современного состояния среды и наблюдение за ее изменениями (пустыня, лес, дорога и границы), анализ зон видимости, просмотр и мониторинг данных в трехмерном виде, (ежегодно в пустынях Сирии пропадает немало людей и машин, наземный площадной способ поиска которых является долгим и трудозатратным). Нередки случаи, когда террористы, проходящие через пустыню из Ирака или Турции, атакуют наблюдательные пункты или промышленные объекты, находящиеся на окраине городов. Анализ видимости и мониторинг с использованием материалов АФС может помочь спасению гражданских лиц, которые работают на наблюдательных пунктах и промышленных объектах, а также позволит производить непрерывный мониторинг перемещения объектов на местности.

4 Создание цифровых моделей для реконструкции и оценки ущерба, нанесенного зданиям, учреждениям и жилым районам.

Важно отметить, что масштабы разрушений некоторых районов в Сирии очень велики и варьируются от незначительных повреждений, которые могут быть быстро восстановлены, до повреждений очень высокого уровня, которые невозможно восстановить, а в некоторых местах уровень разрушений достигает 100 %.

Цифровые модели могут помочь детально изучить эти области, установить приоритеты и подготовить планы для полной или частичной реконструкции застройки и инфраструктуры. Степень разрушений наиболее пострадавшего населенного города Хомс представлена на рисунке 12.



а)

б)

Рисунок 12 – Космические изображения г. Хомс: *а)* 2009 г.; *б)* 2018 г.

С учетом высокой востребованности топогеодезических данных для восстановительных работ необходимо изыскивать такие методы создания документов о местности, которые можно реализовать в достаточно короткие сроки, используя существующий потенциал гражданских и военных отраслей экономики страны при минимальных финансовых и человеческих затратах на их подготовку.

5 Создание альтернативной навигационной системы для Республики Сирия. Сигнал навигационной системы GPS блокируется и заглушается американскими и турецкими службами, что препятствует движению наземной и аэронавигации гражданских самолетов и вынуждает к оперативной смене маршрута, что уже вызвало немало катастроф. Это требует создания альтернативной резервной системы GPS, эта система будет вспомогательной к инерциальной навигационной системе в день навигации и точно определять координаты самолета в реальном времени, чтобы система сигнализации хорошо работала в горных районах или на линиях высокого напряжения.

ЦММ может быть основой для альтернативной системы, как в случае с системами навигации с учетом рельефа местности, (Terrain Aided Navigation) TAN (рисунок 13), такими как TERrain COntour Matching (TERCOM) или Sandia Inertial Terrain Aided Navigation (SITAN) [51, 52].

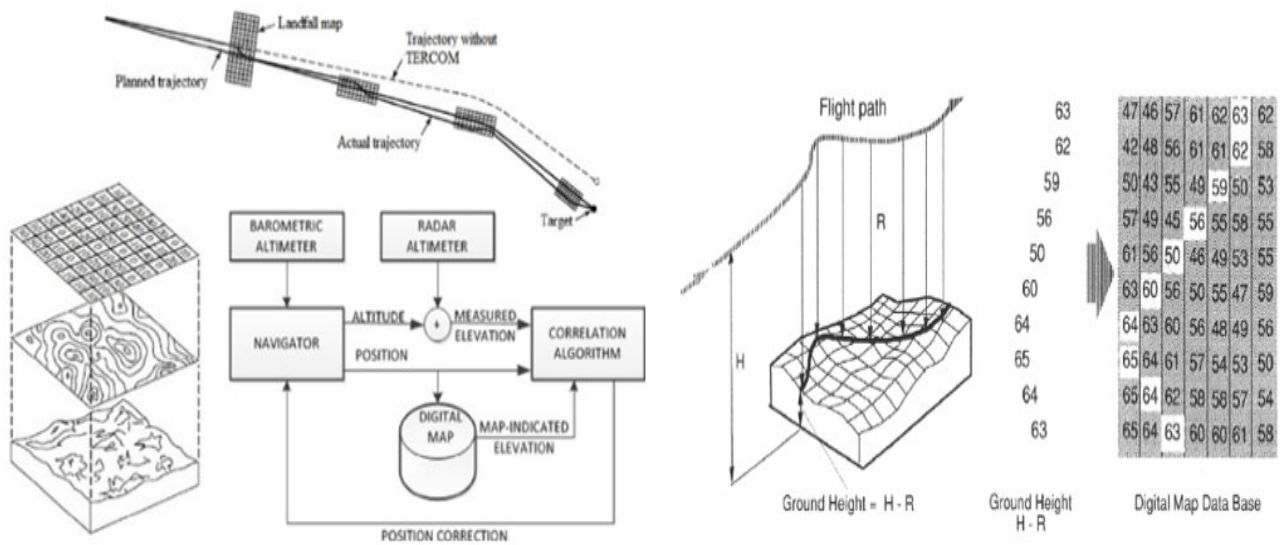


Рисунок 13 – TERrain COntour Matching TERCOM Inertial Terrain Aided Navigation (SITAN)

Наше исследование не ставит задачу обеспечения всей территории страны ЦМР на уровне масштаба 1: 5 000, но мы считаем, что необходимо исходить из реальных частных задач, отмеченных выше на создание ЦММ территорий размером порядка четырех (максимум восьми) трапеций масштаба 1 : 5 000 или 16 трапеций масштаба 1 : 2 000. Точность построения трехмерных моделей, соответствующих масштабу 1 : 2 000, должна быть не хуже $\pm 0,4$ м в плане и $\pm 0,5$ м по высоте согласно нормативным документам [53, с. 5]). В особых случаях по заявке заказчика точность модели может быть задана существенно выше, до $\pm 0,2$ м в плане и $\pm 0,2$ м по высоте.

В настоящее время в Сирии еще используются наземные методы топогеодезической съемки, в том числе с применением приборов спутникового позиционирования. В частности, дифференциальный (DGPS) метод RTK обеспечивает топо-

графические данные с точностью до $\pm 0,1$ м. Этот метод достаточно оперативен, но если необходима топографическая съемка обширных территорий, то процесс будет достаточно трудоемким и длительным при реализации [54, 55].

Наиболее производительным из наземных методов получения трехмерных моделей местности на сегодня следует признать технологию мобильного лазерного сканирования [56]. Но самой большой проблемой использования ее в современных условиях Сирии является тотальное отсутствие дорог с покрытием, утрата наземных пунктов геодезических сетей и, конечно, высокая стоимость оборудования и технологии в целом.

При съемке территории площадью до 100 трапеций 1 : 2 000 эффективно и производительно можно использовать аэрофототопографический метод на базе беспилотных воздушных судов. Этот метод позволяет быстро получить материалы об объектах и состоянии земной поверхности с разрешением 0,05–0,2 м, в зависимости от высоты фотографирования и класса съемочной аппаратуры.

Наконец, отметим, что Министерство местного самоуправления Сирии контролирует работу топографической съемки, разрабатывает цифровые топографические планы сообществу и следит за их применением и выполнением. В связи с этим было выпущено несколько руководств и рекомендаций с техническими условиями, требованиями и указаниями, включая предлагаемые требования к формату и качеству создаваемых документов о местности, а также рекомендации к их созданию и обновлению. В руководствах также описаны методы оцифровки аналоговой картографической продукции, даны рекомендации по структуре хранения и работе с пространственными данными [57].

1.4.2 Перспективы создания ЦММ (ЦМР) в Сирии

Начиная с эпохи французского мандата (1946 г.), топографические карты составлялись в различных масштабах на всю сирийскую территорию. Эти карты создавались и издавались с 1960-х по 1990-е гг., но содержание карт уже не отвечает современной ситуации на местности. Чтобы создать актуальный национальный

картографический фонд и современную цифровую картографическую основу, необходимо реконструировать опорные геодезические сети и, по существу, полностью воссоздать весь масштабный ряд топографических карт. В настоящее время зачастую приходится на выбранный участок работ в рамках некоторого проекта создавать локальные опорные сети и карты в локальных системах координат, необходимые для инженерного проектирования и изысканий.

Методы создания топографических карт и ЦМР можно разделить по типу построения на наземные и воздушные. Наземные методы используют геодезическую съемку, тахеометры и ГНСС (систему глобального позиционирования). В частности, дифференциальный (DGPS) метод навигационных измерений обеспечивает достаточно высокую точность (от 0,01 до 1 м), позволяющую создавать топографические планы вплоть до масштаба 1 : 500. Этот метод достаточно оперативен, но если же происходит съемка объемных территорий, то этот процесс будет достаточно трудоемок. Плюсом данного метода является то, что он практически не зависит от погодных и сезонных условий [58].

К наземным методам съемки относится и метод наземного стационарного и мобильного лазерного сканирования, а также наземная стереофотограмметрическая съемка. Наземные лазерные сканирующие системы применяются к компактным объектам для получения трехмерных топографических данных с точностью порядка нескольких сантиметров. Преимущества наземной стереофотограмметрической съемки как самостоятельной технологии, так и в комплексе с наземным лазерным сканированием заключается в том, что ее можно проводить в труднодоступных или опасных районах, а полученная информация будет иметь высокую точность. Также, используя полученные в ходе обработки трехмерные модели, имеется возможность получения ЦМР с перспективой получения изменений рельефа со временем. Отмеченные технологии и их комплексное применение на базе мобильного лазерного сканирования имеют колоссальное преимущество по производительности по отношению к традиционным методам тахеометрической съемки.

Наиболее производительным из наземных методов получения 3D-моделей местности на сегодня следует признать технологию мобильного лазерного сканирования [59]. Но самой большой проблемой использования ее в сегодняшних условиях Сирии является тотальное отсутствие дорог с покрытием, утрата наземных пунктов геодезических сетей и, конечно, высокая стоимость оборудования и технологии в целом.

Для съемки больших площадей рекомендуется использование стереофотограмметрической и лазерно-локационной воздушных съемок, которые сегодня можно выполнять как с пилотируемых, так и с беспилотных воздушных судов. Среди недостатков АФС можно выделить высокую стоимость, а также зависимость от погодных условий (ветра, осадков, тумана и пр.). Обычная аэрофотосъемка позволяет быстро получить информацию об объектах и состоянии земной поверхности с разрешением 0,1–1,5 м, зависящим от высоты съемки и класса съемочной аппаратуры. Аэрофотосъемка с БВС принципиально не отличается от съемки пилотируемых воздушных судов и может быть самой рентабельной, при площадях картографирования менее 200 га [59, 60].

Системы воздушного лазерного сканирования требуют чрезвычайно дорогих инструментов и высококвалифицированного персонала. Такие высокопроизводительные системы зарубежного производства недоступны для использования в стране по политическим или военным причинам, и, конечно, существуют также финансовые ограничения для использования этих систем. Еще одним важным обстоятельством является то, что технологии DGPS и RTK-GPS требуют сигналов от фиксированной земной станции с известным местоположением. Эти технологии сегодня доступны в Сирии с рядом ограничений.

Спутниковые снимки высокого и сверхвысокого пространственного разрешения могут использоваться для создания или обновления топографических карт. Но их применение ограничивается предельным масштабом 1 : 25 000 и некоторыми проблемами получения стереопар снимков из космоса. Кроме того, в Сирии нет достаточного числа специалистов по обработке спутниковых снимков. В современ-

ных условиях Сирии весьма затруднительно применять вышеупомянутые методы измерения для картографирования на месте.

Выводы по первому разделу

1 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 аэрофототопографическим методом в короткие сроки и при минимальных затратах, учитывая социально-экономическую ситуацию в Сирии.

2 С учетом неудовлетворительного состояния планово-высотной геодезической основы в Республике Сирия предполагается использовать местные, локальные системы координат для создания ЦТК, ЦММ и ЦМР аэрофототопографическим методом на базе использования БВС.

3 Полезный эффект от использования ЦМР в научной и хозяйственной деятельности человека в условиях, когда управленческие или технические решения должны быть приняты обоснованно и оперативно, во многом зависит от качества ЦМР, их математической точности и возможностей оперативного получения.

2 ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БВС ПРИ АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОМ МЕТОДЕ СОЗДАНИЯ ЦММ

Выделяя аэрофототопографический метод создания ЦММ с использованием БВС, подчеркнем ее основные преимущества, которые определяют и выдвигают на ведущее место в современных аэрофототопографических работах:

- не требуется специального места вылета и прилета (аэропорт);
- не требуется большого специального экипажа для работы;
- малые рабочие высоты (от 50 до 500 м) позволяют оперативно проводить разрешительную документацию для съемок;
- малые рабочие высоты обуславливают высокое разрешение снимков на местности (до сантиметрового размера);
- возможность детальной съемки небольших объектов; технология аэрофотосъемки с БВС позволяет проводить аэрофотосъемку небольших объектов и малых площадок там, где сделать это другими видами аэрофотосъемки нерентабельно, а в ряде случаев и технически невозможно;
- оперативность (весь цикл от выезда на съемку до получения конечных результатов занимает несколько часов в течение одного дня);
- низкая себестоимость съемки 1 кв. км;
- экологическая безопасность: используется электрический двигатель, что обеспечивает экологическую чистоту полетов.

В силу этих причин наши исследования и разработки будут ориентированы на использование БВС, как правило, вертолетного типа с грузоподъемностью до 2,5 кг полезной нагрузки и длительностью рабочего цикла полете не менее 1 часа.

2.1 Анализ параметров БВС, используемых в геодезии и топографии РФ

В зависимости от решаемой задачи, можно использовать различные виды БВС, тактико-технические характеристики которых отвечают требованиям, отмеченным выше. Классифицировать их можно по разным признакам:

- по типу конструкции (вертолетные, самолетные);
- по полезной нагрузке: маленькие, средние и большие;
- по целевому использованию: для аэрофотосъемки, обследования строительных конструкций, фото- и видеосъемки;
- по дальности полета: ближнего радиуса и дальнего радиуса действия.

В настоящее время рынок БВС чрезвычайно широк и интенсивно развивается. Малоразмерные модели БВС с весом полезной нагрузки от 1,5 до 2,5 кг сегодня трудно даже перечислить. В сети можно найти несколько профессиональных обзоров это класса БВС, которые могут служить ориентирами в вопросах выбора носителя для решения конкретной задачи. В таблице 3 приведены некоторые модели БВС и их спецификации. Все модели производятся в России, их использование позволяет решать геодезические и фотограмметрические задачи.

Выбор типа БВС (самолет или мультикоптер) зависит от конкретной задачи, площади и местоположения исследуемой площадки, а также погодных условий. Мультикоптеры часто могут нести большую полезную нагрузку, что позволяет устанавливать более совершенные и сложные системы обнаружения, модели с неподвижным крылом больше подходят для съемки больших площадей.







Благодаря способности летать на малых высотах, мультикоптеры больше подходят, когда требуются выделять более мелкие детали поверхности, и они обычно используются для получения аэрофотоснимков с большими углами наклона. Они также могут взлетать и приземляться на небольшой территории, однако ограничены из-за относительно низкой скорости полета и большого разряда батареи [61], и на них более негативно влияют факторы окружающей среды, такие как экстремальные температуры.

На труднодоступных участках рекомендуется использовать БВС с компактными размерами и весом, желательно удобную для переноски в рюкзаке; в этой ситуации больше подходит мультикоптер, чем неподвижное крыло [62].



Таблица 3 – Характеристики некоторых малоразмерных БВС, используемых для АФС в России

Модель	Фото		
Геоскан Lite		Атлас 135 ГЕО	Атлас МИНИ ГЕО
100–4000	180–500	100–500	100–500
9 (10 см/пикс)	3 (4.3 см/пикс)	2 (4.3 см / пикс)	1 (4.3 см / пикс)
Sony α6000	Ricoh GRII (16.9Мп)	Ricoh GRII (16.9Мп)	Ricoh GRII (16.9Мп)
64–130	60	0–40	0–40
60	30	45	30
L1/L2	Emlid Reach M2 L1/L2	Emlid M2 L1/L2	Emlid M2 L1/L2
	3	0.6	0.4
Полезная грузка (кг)			

Продолжение таблицы 3

GEODRONE XL VTOL 	ГЕОСКАН 401 ГЕОФИ-ЗИКА 	ГЕОСКАН 401 ЛИ-ДАР 	ГЕОСКАН 401 ГЕОДЕЗИЯ 	ГеоScan 201 	GeoScan Gemini 
1500	25–500	25–160	25–500	100–4000	500–4000
1,5 (5 см/пикс)	7 (5 см/пикс)	1.7 (0.7 см/пикс)	2 (5 см/пикс)	7 (3 см/пикс)	1.5 (3 см/пикс)
SONY A7, RX1	Sony RX1R II 42 мп	Лазерный сканер AGM АГМ-МС1/3	Sony RX1R II 42 Мпикс	Sony RX1R II 42 Мп	Sony UMC-R10C 20.1 мп
55–75	0–50	0–50	0–50	64–130	54
90	45	40	60	180	40
REACH M+ RTK GNSS	L1-L2, GPS/ГЛОНАСС/BeiDou		L1-L2, GPS/ ГЛОНАСС	L1-L2, GPS/ ГЛОНАСС	
1		1.25	2.5	1.5	1.9

Окончание таблицы 3

FIXAR-005 АФС		ТОРОDRONE Supercam VTOL SX350 PPK		ТОРОDRONE DJI МА- VIC 2 PRO PPK
5	3000	2-4 см	2-4 см	2-3 см
Sony RX1 RM2	Sony R10C 20Mp	Sony RX1R II 42Mp	(20Mp)	
72-120	72-122			
60	120	45	30	
Emlid L1/L2	L1/L2 мультисистемный	L1/L2 мультисистемный	L1/L2 мультисистемный	L1/L2 мультисистемный
5	1.5	2.7		

БВС вертолетного типа способны иметь более высокую полезную нагрузку, что позволяет поднимать тяжелую точную камеру и даже LIDAR датчик, кроме того, они легко перемещаются в чемодане. Это приводит к тому, что такие БВС обычно используются для очень высокой точности картирования площадью менее 100 га и других целей, не требующих длительной работы. Напротив, беспилотники самолетного типа легче, быстрее и имеют большую производительность, поэтому их использование подходит для аэрофотосъемки больших площадей.

С другой стороны, можно установить лазерные сканеры вместо камер, но для этого требуется технико-экономическое обоснование для установки этих дорогостоящих датчиков на самолетах, которые не считаются высоконадежными.

Для нашего исследования, поскольку мы планируем сделать аэросъемку и лазерным сканером, и стереометрическим способом, как вариант выделяем для аэрофототопографической съемки БВС типа DJI Phantom 4 Pro V2.0 или ГЕОСКАН 401 ЛИДАР для лазерно-локационной съемки.

2.2 Обзор используемых вариантов полезной нагрузки для проведения съемочных работ с борта БВС

Съемочное оборудование так же, как и его носитель – БВС, является чрезвычайно важным вопросом компоновки аэросъемочного комплекса для проведения аэрофототопографических съемок с целью создания ЦТК и ЦММ.

Хотя пользователи опасаются ставить дорогие сенсоры (тяжелые камеры и лазерные сканеры) на БВС, параллельное развитие беспилотных летательных аппаратов позволило относительно надежно обойти эту проблему.

Аэрофотосъемочный комплекс включает не только ЦАФА, но и ряд приборов, обеспечивающих проведение АФС. Сюда входят аэрофотоустановка (трехосный карданов подвес) для ориентации ЦАФА в пространстве, приборы определения элементов внешнего ориентирования снимков, а также наземный сегмент аппаратуры, обеспечивающий работу и управление комплексом.

БВС обычно оснащены неметрическими цифровыми камерами общего назначения с матрицей Байера (RGB) и, как правило, не предназначены специально для фотограмметрической съемки. Поэтому калибровка таких фотокамер традиционно была и остается единственным наиболее важным фактором, определяющим потенциал точности и, в значительной степени, надежность фотограмметрических измерений снимков [63]. В таблице 4 приведены сведения о некоторых цифровых фотоаппаратах, часто используемых для съемки с борта БВС.

Таблица 4 – Камеры, используемые в аэрофотосъемке с БВС

Модель	Размер матрицы (мп)	Разрешение фотоснимка (max)	Фокусное расстояние (мм)	Вес (г)
Sony RX1R II	42	7952 × 5304	35	507
Sony A7	24,3	6000 × 3376	35	556
Ricoh GR II 16.9Мп	16,9	4928 × 3264	28 мм	251
Sony RX1 24Мп	24,7	3639 × 2624	35 мм	453
Sony a5000 20Мп	20,4	5456 × 3632	50	269
Sony UMC-R10C (20Мп)	20,4	3639 × 2624	100	216
Sony a6000 24Мп	24,3	6000 × 4000	24,3	285

Неметрические цифровые камеры часто используются из-за их небольшого веса и низкой стоимости. Однако модель выбранной камеры и разрешение изображения могут влиять на точность конечного продукта [64]. Эти камеры имеют хорошее радиометрическое качество, но низкое геометрическое качество. Поэтому калибровка абсолютно необходима для реализации надежных фотограмметрических измерений.

Калибровку камеры можно выполнить двумя способами:

- независимо от съемки с воздуха (предварительная калибровка);
- включить в настройку (самокалибровка).

Предварительная калибровка часто выполняется в лаборатории с использованием сходящихся изображений и различной глубины сцены [65].

Хотя большинство коммерческого программного обеспечения включает самокалибровку камеры, в частности, это можно реализовать с помощью специализированного программного обеспечения – Agisoft Lens или Photomode.

Сегодня с целью сбора точных пространственных данных о местности используются системы воздушно-лазерного сканирования. Эта технология постоянно развивается, и его цена снижается, что делает ее доступной для широкого круга заинтересованных специалистов, особенно геодезистов, занимающихся получением ЦММ. В таблице 5 представлены некоторые системы лазерных сканеров, включаются разработки русских компаний, которые можно устанавливать на БВС и которые являются более доступными для бюджетных организаций.

Таблица 5 – Воздушные лазерные сканеры

Модель прибора	Высота (м)	Частота измерений (кГц)	Вес (кг)	Точность коор. (П-в плане/В-по высоте, ±см)	Тип носителя
Leica ALS80-СМ	100–1600	1000	47		самолет, вертолет
Leica ALS80-HP	100–3500	1000	47		самолет, вертолет
Leica ALS80-NA	100–5000	500	47		самолет, вертолет
Trimble AX60	50–4700	100–400	75	15/20.	самолет, вертолет
Trimble AX60i	30–1600	80–400	75	2см П. 5см В.	самолет, вертолет
Trimble AX80	50–4700	200–800	100	2см П. 5см В.	самолет, вертолет
АГМ-МС3.200	200	600	1,25	3см П. 5см В.	БВС
АГМ-МС3.100	100	300	1,25	3см П. 5см В.	БВС
АГМ-МС2.100	100	300	1,25	3см П. 5см В.	БВС
АГМ-МС1.200	200	600	1,1	3см П. 5см В.	БВС

Появление малогабаритных лазерно-локационных систем дало возможность использовать аэрофототопографическую съемку в комплексе с лазерным сканированием с борта БВС.

2.3 Особенности аэрофототопографической съемки с борта БВС

Аэрофотосъемка с применением БВС набирает все большую популярность. Значительное уменьшение габаритов летательных аппаратов, их стоимости, при этом без потери в точности и полезной нагрузки приводит к их все более широкому использованию [66–68].

Перед выполнением полевых работ, так же как в классической аэрофотосъемке, выполняется расчет параметров полета, определяется местоположение опорных и контрольных точек. По заданному маршруту БВС в ручном или автоматизированном режиме выполняет полет. Обычно устанавливаются большие перекрытия снимков, нежели в классической аэрофотосъемке (не менее 80 и 60 продольных и поперечных перекрытий соответственно). Более того, в полетный день важной является информация о погоде [69–71].

Полевые работы начинаются с определения пространственных координат. От площади района будет зависеть количество точек съемочного обоснования – опорные точки (ОТ), большая часть которых выступает в качестве опорных, а оставшиеся играют роль контрольных – наземные контрольные точки (КТ). Для этой цели определения координат выполняют при помощи линейно-угловых и спутниковых измерений в режиме «статика» или «быстрая статика». При этом используются и спутниковые измерения в режиме RTK, которые достаточно высокоэффективны [72–75].

Далее получают данные – аэрофотоснимки, координаты точек съемочного обоснования и/или положения центров проекций снимков, а также их углы наклона от горизонтального положения. Оценивается качество фотографий, отбраковываются «технические кадры». Их обработка производится в специализированном программном обеспечении, в ходе которого выполняется оценка точности и построение ЦМР на основе автоматизированной фильтрации созданной цифровой модели местности. Также строится ортофотоплан [76–79].

По полученным данным выполняется построение топографического плана. По ЦМР производится создание горизонталей, а по ортофотоплану – векторизация

объектов местности. При этом дешифрирование выполняется на порядок легче, так как геодезист видит ортофотоплан и ЦММ высокого разрешения. Однако, к сожалению, при возникновении вопросов и недочетов все равно необходимо выезжать на местность для полевого дешифрирования снимков [80, 81].

Для повышения оперативности выполнения полевых работ используются БВС с приемником RTK в сочетании с инерциальной навигационной системой (ИНС) гироскопа и акселерометра на борту, служащие для определения местоположения центра проекции камеры. Это позволяет без потери в точности выполнять полет без точек съемочного обоснования, сокращая полевые работы до минимума, однако стоимость такой комбинации довольно высока [82, 83].

Аэрофотоснимки регистрируются на бортовом носителе. Наличие точных меток времени позволяет определить элементы внешнего ориентирования камеры и осуществить привязку снимка и коррекцию ошибок за рельеф, за наклоны, кривизну Земли и т. п. Исправленные ортоизображения сливаются в единую бесшовную мозаику. В результате же автоматизированной обработки точек отражений производится высокоточная цифровая модель рельефа территории.

Достоинства данного вида съемки:

- рентабельность: является самым экономичным способом по сравнению со съемкой с пилотируемого летательного аппарата, особенно для небольших площадей [4, 84, 85];
- оперативность и скорость получения данных и результатов съемки [4];
- аэрофотосъемка возможна при небольшой высоте полета и вблизи объектов местности, что позволяет получать снимки высокого разрешения и уменьшает влияние дымки и других погодных факторов [2, 3];
- возможность выполнения аэрофотосъемки в зонах чрезвычайных ситуаций без угрозы здоровью и жизни пилотов [86];
- стоимость выполнения работ существенно ниже по сравнению с традиционными геодезическими методами;

– БВС могут работать в обширном температурном диапазоне, таким образом появляется возможность их использования во многих широтах земного шара, и съемку можно производить в любое время года.

Отметим также недостатки:

– трудности использования данного метода на территории с плотной многоэтажной застройкой и сплошной высокой растительностью [87,88];

– использование БВС невозможно без традиционных методов геодезических измерений;

– на материалах фотосъемки могут иметься участки территории, требующие применения наземных методов съемки (так называемая досъемка);

– высокая цена БВС с RTK-приемником на борту, а также дорогостоящее специализированное программное обеспечение [89];

– сложность и продолжительность выполнения камерального дешифрирования [90, 91].

В процессе статистической обработки данных принимается аддитивная модель ошибок, в которой факторы представлены в виде алгебраической суммы. Согласно этой модели, разности высот точек, полученных с ЦМР, и на основе GPS-измерений будут равны [71]:

$$\Delta H = H_{\text{АФС}} - H_{\text{GPS}}. \quad (2)$$

Далее разность ΔH содержит в виде суммы две составляющие – систематической (Δ_H) и случайной (δ_H) ошибок:

$$\Delta H = \Delta_H + \delta_H. \quad (3)$$

В результате вычислены следующие основные показатели точности модели:

– среднее значение разности высот. Оценка систематической ошибки (n – число измерений):

$$\bar{\Delta}_H = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta H_i; \quad (4)$$

– средняя квадратическая ошибка RMSE (δ_H)

$$\text{RMSE}_{\Delta H} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta H_i^2}; \quad (5)$$

– средняя абсолютная ошибка (mean absolute error):

$$\text{MAE}_{\Delta H} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\Delta H_i|; \quad (6)$$

– минимальное и максимальное значения разностей высот.

После исключения систематической ошибки из результатов измерений ($\Delta H_i = \Delta H_i - \Delta H$) оцениваются параметры случайной составляющей.

Действительно, судя по формальным признакам (точность уравнивания, использование широкоугольных объективов, съемки с высоким разрешением, подтверждение высотной точности на контрольных точках), данные облаков точек, полученные с БВС АФС, не должны уступать данным лазерного сканирования.

2.4 Особенности лазерно-локационной съемки с борта БВС

Воздушное лазерное сканирование – это высокотехнологичная топографо-геодезическая методика сбора геопространственных данных с летательного аппарата с применением скоростной лазерной сканирующей системы высокой точности, определяющей пространственные координаты точек лазерных отражений от поверхности и наземных объектов.

Полученный набор точек называется «облаком точек». В процессе съемки для каждой из них записываются три координаты (X, Y, Z) и показатель интенсивности отраженного сигнала (рисунок 14). Он определяется свойствами участка по-

верхности, который отразил лазерный луч. При визуализации ТЛО раскрашиваются в зависимости от уровня интенсивности отраженного импульса и на экране выглядят как трехмерное цифровое фото. Большинство современных моделей лазерных сканеров имеют встроенную видео- или фотокамеру, благодаря чему облако точек может быть также «окрашено» в реальные цвета [92].

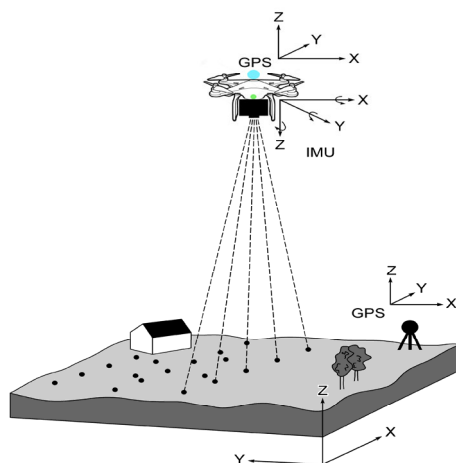


Рисунок 14 – Принципиальная схема воздушно-лазерного сканирования

Основным прибором лазерного сканирования является лазерный сканер – лидар, установленный на борту воздушного судна, как правило, на гиросtabilизированной платформе. Каждая посылка лазерного импульса регистрируется системой спутникового позиционирования и данными бортовой инерциальной системы для получения пространственных координат точки посылки и времени прохождения импульса от фазового центра лазерного излучателя до ТЛО и обратно. Таким образом, работа навигационного блока воздушного лазерного сканера основана на взаимодействии системы спутниковой навигации (GPS/ГЛОНАСС) и инерциальной системы в режиме реального времени.

Как правило, одновременно с работой лазерным сканированием производится цифровая топографическая аэрофотосъемка. Тогда вместе с результатом воздушного лазерного сканирования появляется как трехмерная точечная модель земной поверхности в заданной системе координат, так и набор цифровых стереоснимков с извест-

ными элементами внешнего ориентирования. По итогам обработки этих данных могут быть созданы ЦММ, ЦМР, ортофотопланы и другие документы о местности.

Главной особенностью воздушной лазерно-локационной съемки является принципиальное условие, ограничивающее производительность метода по показателю «высота съемки – частота посылки зондирующих импульсов». Согласно логике работы сканера как лазерного дальномера каждый последующий зондирующий импульс может быть послан в сторону цели только после того, как зарегистрирован предыдущий отраженный импульс. С учетом конечной скорости распространения электромагнитных колебаний можно установить простое соотношение, которое определяет теоретический предел интервала времени или частоты посылки зондирующих импульсов f_{max} в зависимости от высоты съемки H_ϕ :

$$f_{max} = c/(2 \cdot H_\phi) \text{ или } T = 1/f_{max} = 2 \cdot H_\phi / c. \quad (7)$$

В таблице 6 представлены максимально возможные значения частоты зондирующих импульсов f_{max} в зависимости от высоты съемки при импульсном методе лазерного зондирования.

Таблица 6 – Максимальные частоты импульсов f_{max} в зависимости от высоты съемки

Высота съемки (H_ϕ), м	Максимальн частоты зондирующих импульсов (f_{max}), КГц
300	500
1 500	100
3 000	50

Очевидно, что это ограничение обуславливает в конечном итоге плотность ТЛО на квадратный метр поверхности, которое в свою очередь определяет качество проработки деталей поверхности модели местности. Это обстоятельство вызывает необходимость сочетания лазерно-локационной съемки с параллельным макрофотографированием местности.

Повышение плотности ТЛО возможно посредством использования двухканального сканирования – по существу, двумя сканерами. На рисунке 15 представлены основные методы сканирования для одноканальной схемы (рис. 15, а, б) и двухканальной схемы (рис. 15, в).

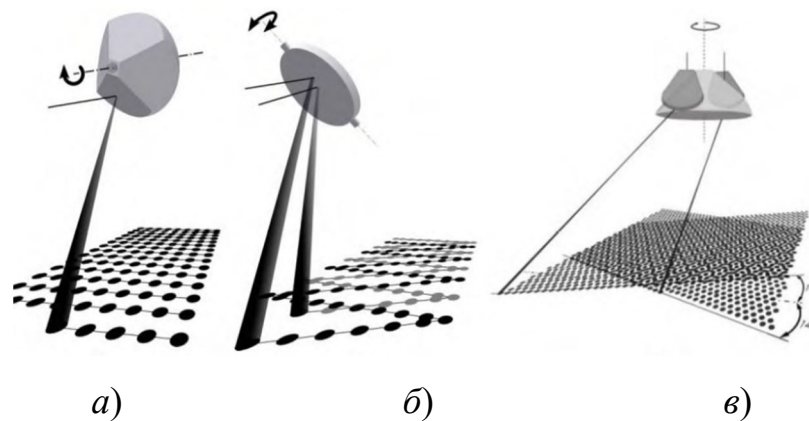


Рисунок 15 – Основные способы отклонения лазерного луча: а) вращающееся граненое зеркало в одноканальном лазерном сканере; б) двухканальный лазер и качающееся зеркало; в) вращающееся граненое зеркало с двухканальным лазером [93]

Так как существуют ограничения измеряемых расстояний, а также сканирования с огромного количества пунктов, данный метод является достаточно трудоемким для составления крупномасштабных карт больших территорий. Ограничений по условиям съемки почти нет, поэтому метод отлично подходит для мониторинга склонов, на которых есть вероятность появления оползней. Не часто используется для создания ЦМР крупных территорий.

Еще одна особенность лазерно-локационной съемки местности связана с принципиальной возможностью получения ТЛО от объектов первого плана (например, растительности) с одновременным получением ТЛО от объектов второго плана – подстилающей поверхности. При обработке облака точек лазерных отражений в специализированных программных средах имеются алгоритмы фильтрации ТЛО «земли» и ТЛО «растительность», что выгодно отличает возможности лазерно-локационной съемки от классической АФС (рисунок 16).

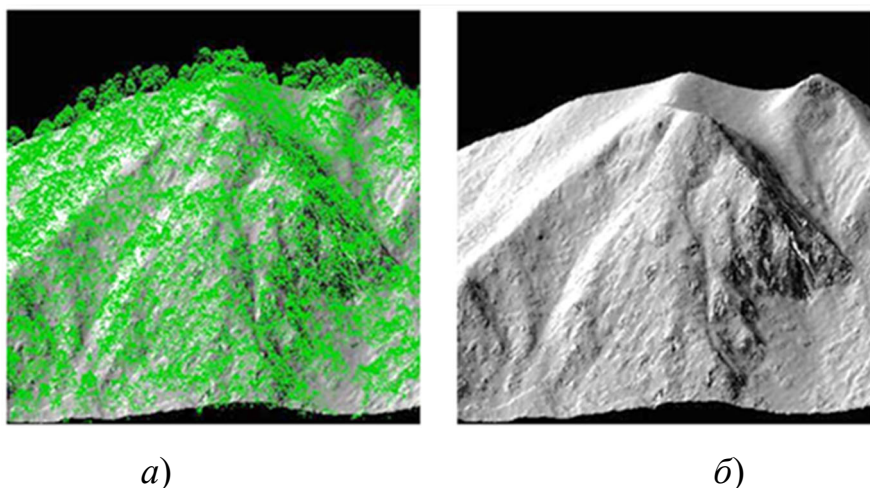


Рисунок 16 – Результат фильтрации ТЛО растительности (а)
от поверхности земли (б)

В отличие от воздушного лазерного сканирования, АФС не обладает одновременной возможностью получать и видимую поверхность крон деревьев, и рельефа поверхности [94]. Действительно, оптико-электронные системы дают нам информацию о видимой поверхности (кроны), оставляя рельеф невидимым. Только воздушное лазерное сканирование сочетает в себе лучшие черты каждого из методов, обладая при этом субдециметровыми точностями измерения высоты. Именно благодаря этому свойству воздушное лазерное сканирование – один из немногих методов, позволяющих получить точные геометрические параметры объектов, используя прямые измерения [95].

2.5 Сравнение использования аэрофотосъемки и лазерного сканирования для создания цифровых моделей местности

Стоит заметить, что если аэрофотосъемка с БВС выполняется на малозастроенной территории с отсутствием сплошной высокой растительности, а также количество опорных и контрольных точек невелико, то недостатки данного метода практически сводятся к нулю. Однако, несмотря на высокий спрос, в настоящее время можно столкнуться с большими трудностями при выполнении аэрофото-

съемки, так как отсутствует нормативно-правовая база. Эта проблема пока не решена ни в одной стране мира [96].

В АФС материалы отправляются на камеральную обработку, где в первую очередь выполняется оценка их качества [90]. При помощи специального программного обеспечения производится создание ортофотоплана, который является по существу растровым аналогом топографической карты. Для этого определяются элементы внешнего ориентирования ЭВО снимков, выполняется построение ЦМР, а также ориентирование (привязка к опорным точкам) и оценка точности модели [97–99].

Таким образом, на основе ортофотоплана, ЦМР и данных дешифрирования посредством векторизации создается топографический план.

Данный процесс выполняется в программном продукте, например, в Agisoft Metashapt или AutoCAD [94, 100, 101].

С другой стороны, лазерное сканирование является разновидностью активной съемки. Полупроводниковый лазер (работающий в импульсном режиме) проводит дискретное сканирование поверхности Земли и объектов, расположенных на ней, регистрируя направление лазерного луча и время прохождения луча.

Поскольку лазерный сканер испускает сотни тысяч импульсов в секунду («качая» луч из стороны в сторону и смещаясь вместе с носителем), то территория съемки оказывается покрытой множеством точек лазерных отражений, для каждого из которых известны координаты, интенсивность, а также порядок отражения: было ли это первое Remote methods of Earth research отражение – от самого высокого объекта в данной точке или последнее – от земли или здания [101]. Таким образом, удастся однозначно локализовать в пространстве точку (точки, если отражений было много), от которой отразился лазерный луч. Текущее положение лазерного сканера определяется с помощью высокоточного спутникового приемника, работающего в дифференциальном режиме совместно с инерциальной системой. Зная углы разворота и относительные смещения между компонентами описанной системы, можно однозначно определить абсолютные координаты каждой точки лазерного отражения в пространстве.

И в конце операции результатом будет облако точек, которое можно обрабатывать в специальной программе (обычно продается вместе с лазерным сканером).

Данные, получаемые в результате совместной обработки лазерной альтиметрии, данных инерциальной системы и приемников GPS-ГЛОНАСС, представляют собой массив нерегулярно расположенных точек, для которых известны пространственные координаты, интенсивность отраженного сигнала и ряд дополнительных параметров.

В отличие от воздушного лазерного сканирования, АФС не обладает одновременной возможностью получать и видимую поверхность крон, и поверхность рельефа [94]. Действительно, оптико-электронное наблюдение дает нам информацию о видимой поверхности (кроны), оставляя рельеф невидимым. Только воздушное лазерное сканирование сочетает в себе лучшие черты каждого из методов, обладая при этом сантиметровыми точностями измерения высоты. Именно благодаря этому свойству воздушное лазерное сканирование – один из немногих методов, позволяющих получить точные геометрические параметры объектов, используя прямые измерения [95]

Это значит, что точность способа АФС не хуже способа ЛС в средах, где мало растительностей и крон деревьев, столбов, балок и пр.

На данных лазерного сканирования видны в 3D висячие объекты – такие, как провода, висячие конструкции и тонкие конструктивные элементы (столбы, балки и пр.).

Наличие информации о рельефе и наземных объектах непосредственно в 3D позволяет автоматически получать относительные высоты деревьев и зданий, определять расстояния от проводов до объектов, строить профили с учетом наземных объектов – все это делается без полевых работ, только по данным воздушного лазерного сканирования.

В зависимости от плотности лазерного сканирования определяются соответствия масштабу съемки.

Подводя итоги сравнения разности методов воздушного лазерного сканирования и АФС, представим в таблице 7 [102]:

а) пригодность для картографирования маленьких масштабов обоих способов;

- б) в ЛС проницаемость для съемки растительности и отсутствие ее в АФС;
- в) возможность съемки висячих конструкций в ЛС, тогда как АФС нет такой возможности;
- г) средний или значительный вес съемочной системы – что, как правило, подразумевает необходимость использования пилотируемого, а это в АФС не требуется;
- д) в АФС можно дешифровать весь вид, а в ЛС изображение не всегда четко;
- е) важна разность стоимости, это считается плюсом способа АФС.

Таблица 7 – Сравнение между АФС и ВЛС

Параметр	АФС	ВЛС
Дешифрирование	+	-
Проницаемость	-	+
Точность	-	+
Автономность	+	+
Стоимость	+	-
Трудоемкость	-	-
Время	-	+
Независимость	+	-
Облако точек	+	+
Доступность	+	-

2.6 Создание ЦММ с помощью доступной и оптимальной методики в соответствии с ситуацией в Сирии

Исходя из вышеизложенного, необходимо действовать в зависимости от ситуации в стране, чтобы достичь значений высокой точности при невысоких затратах и приемлемых усилиях создания ЦММ. Поэтому можно сказать, что стереофотограмметрическая аэрофотосъемка и лазерное сканирование с использованием беспилотных летательных аппаратов – многообещающий метод и, как нам представляется, является наилучшим способом решения в Сирии упомянутых задач. Этот метод можно использовать в сочетании с полевым геодезическим оборудованием (традиционным методом). Работы на всех участках производятся независимо, последовательно или параллельно – это помогает сделать работу распределенной

по группам и непрерывной, что в итоге уменьшает требования к вычислительным ресурсам компьютеров и уменьшает время получения данных в целом.

На рисунке 17 представлена общая схема создания ЦММ, ЦМР с использованием БВС с различным навигационным оснащением.

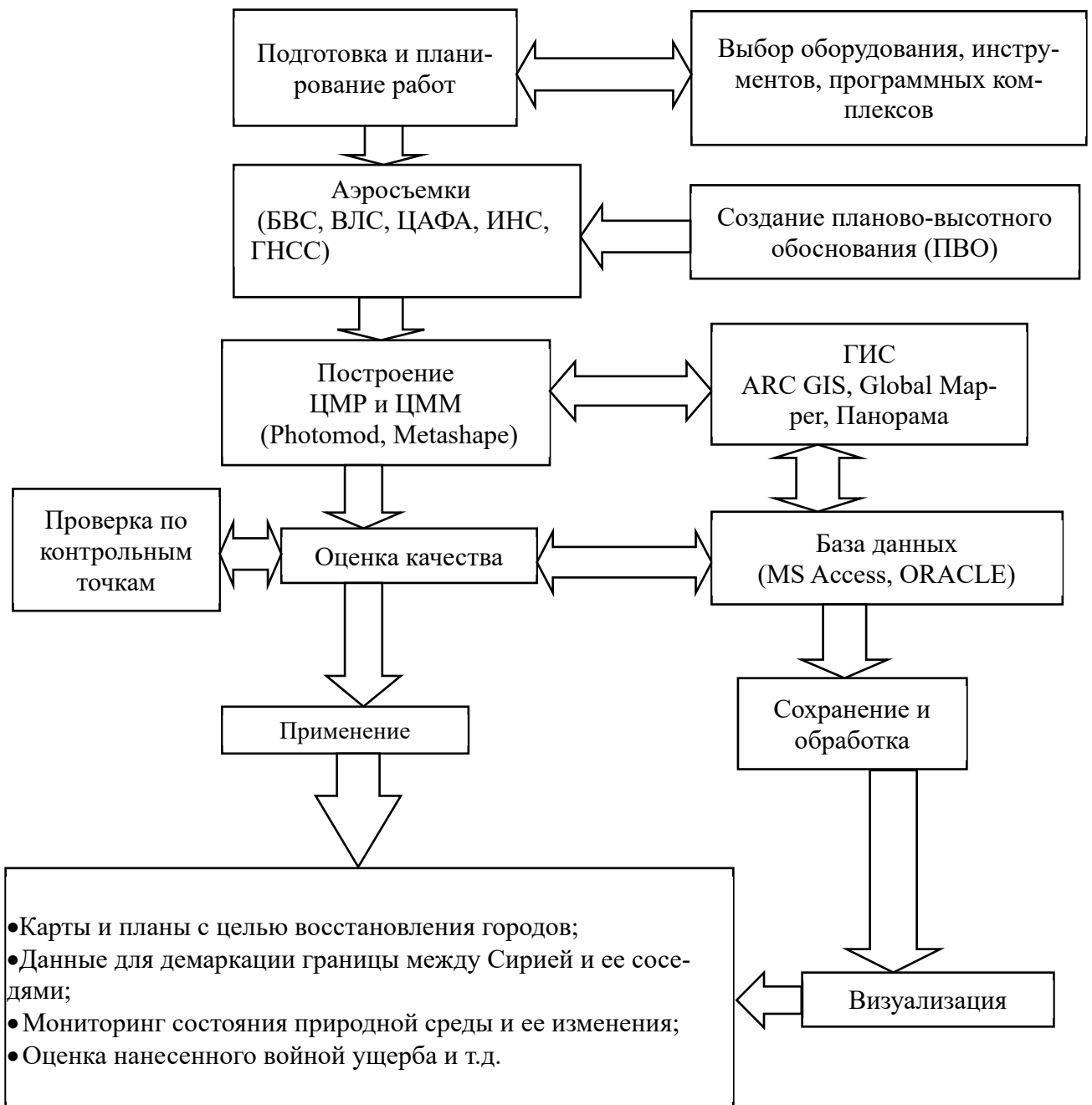


Рисунок 17 – Обобщенная схема создания ЦММ (ЦМР) по результатам воздушных съемок на платформе БАС

2.7 Совершенствование методов съемки с БВС для повышения точности ЦММ и ЦМР

Ставя целью нахождение оптимального набора параметров и условий аэрофототопографической аэросъемки, мы предлагаем использовать средства имитационного компьютерного моделирования аэрофотосъемочного процесса, 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 съемочное оборудование – БВС платформу, съемочную камеру, условия съемки и т. д. [103–105].

При имитационном 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.

Очевидным преимуществом такого подхода в выборе оптимальных параметров аэрофотосъемочного процесса является его простая реализация, перебор всех разумных параметров съемки с возможными (случайными) отклонениями от заданных и, главное, экономия времени и средств по сравнению с экспериментальными реальными съемками для тех же целей. Кроме того, компьютерное имитационное моделирование обладает высокой точностью и наглядностью воспроизводимых результатов.

К переменным параметрам съемки, изменение которых существенно влияет на точность конечной модели, относятся:

- координаты центров проекций снимков, точек фотографирования $S (X_s, Y_s, Z_s)$ и погрешности их определения;
- высота фотографирования $H_\phi = Z_s$ и погрешность ее выдерживания;
- угловые элементы внешнего ориентирования снимков $A(\alpha, \omega, \kappa)$;

- элементы внутреннего ориентирования снимков (фокусное расстояние камеры (f_k) и параметры дисторсии, размер пикселя (p);
- метеорологические условия (M), которые влияют на изменения скорости и устойчивость самолета;
- 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 т. д.

На рисунке 18 представлена блок-схема имитационного моделирования аэрофототопографического процесса, в который включены возможности изучения влияния изменений заданных съемочных параметров на конечную точность создания ЦММ.

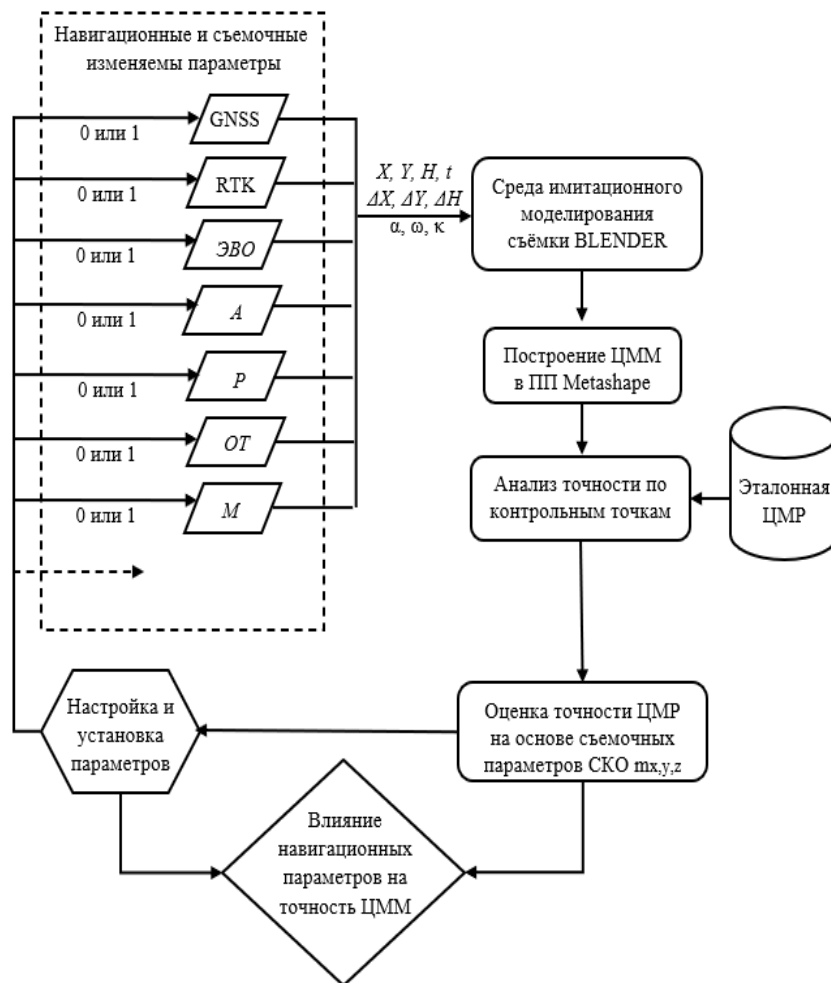


Рисунок 18 – Общая схема имитационных моделирований аэрофототопографических съемок

Выдерживание навигационных параметров будет изменяться оператором в режиме имитационного моделирования во время предполагаемой аэросъемки.

Формально каждый имитационный эксперимент удобно описать «статусом состояния» $\bar{F} = [G, R, I, A, M, P, \dots, OT]$, в котором его составляющие отражают условия моделирования аэрофототопографического процесса создания ЦММ, как это представлено в таблице 8. Варианты значений или вообще отсутствие (незнание) одного или нескольких из этих составляющих при журнализации полетных данных для дальнейшей фотограмметрической обработки представлены ниже.

Таблица 8 – 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

Очевидно, что достижение наилучшего результата возможно, когда все компоненты вектора состояния нашей системы равны единице, то есть:

$$\bar{F} = [1, 1, 1, 1, 1, \dots, 1]. \quad (8)$$

Это значит, что БВС имеет устойчивый сигнал глобальной системы позиционирования (GNSS) с дифференциальными поправками в режиме реального времени (RTK), инерциальная система работает (IMU) исправно и получает угловые элементы внешнего ориентирования с нужной точностью (*A*), съемка проводится на заданной высоте относительно снимаемой поверхности (*p*) при наличии наземных опорных точек (OT). В таком случае ошибки построения конечной модели будут сведены к минимуму, и она будет практически совпадать с первичной «эталонной» моделью.

Если один или несколько составляющих вектора \bar{F} будут равны нулю – это означает, что некоторые из необходимых данных для фотограмметрической

обработки не будут использованы, что повлечет понижение точности конечного продукта.

В условиях натуральных съёмочных экспериментальных работ варианты комбинаций настраиваемых навигационных параметров могут оказаться бесконечными, а это потребует значительных затрат на проведение лётно-съёмочных работ. Именно по этой причине нами предлагается реализация имитационного моделирования процесса съёмки в программной среде Blender 3.0 с возможностью получить как модели снимков, так и результат их обработки – трёхмерную модель местности. Оператор при симулировании аэросъёмки в компьютерной среде имеет возможность регулировать и устанавливать изменение навигационных параметров для каждого варианта съёмки в пределах одной и той же территории, в соответствии с тем, влияние какого фактора необходимо изучить на точность построения ЦММ.

Проведем в качестве примера, две группы разных векторов \bar{F}_1 и \bar{F}_2 , с состоянием, указанным в таблице 9.

Таблица 9 – Параметры, изучаемых случаев съёмки с БВС

	GNSS (G)	RTK (R)	IMU (I)	Углы разворота снимка (A)	Метеоуслови я (M)	GSD (p)	Опорные точки (OT)
\bar{F}_1	1	0	1	0	0	1	1
\bar{F}_2	1	0	1	0	0	1	0

1) $\bar{F}_1 = [1, 0, 1, 0, 0, 1, 1]$, то есть: отсутствие стабильности в GPS и инерциальной системе, воздушной погоде и наличие опорных точек.

2) $\bar{F}_2 = [1, 0, 1, 0, 0, 1, 0]$, то есть: отсутствие стабильности в GPS и инерциальной системе, воздушной погоде и отсутствие опорных точек.

На рисунке 19 для иллюстрации корректной реализации процесса имитационного моделирования приведены результаты «проведения» АФС с набором параметров съёмки, соответствующих варианту \bar{F}_1 (красный цвет)

и варианту \bar{F}_2 (зеленый цвет), и связанные с этим варианты погрешностей по точности построения ЦММ на контрольных точках (с1–с9).

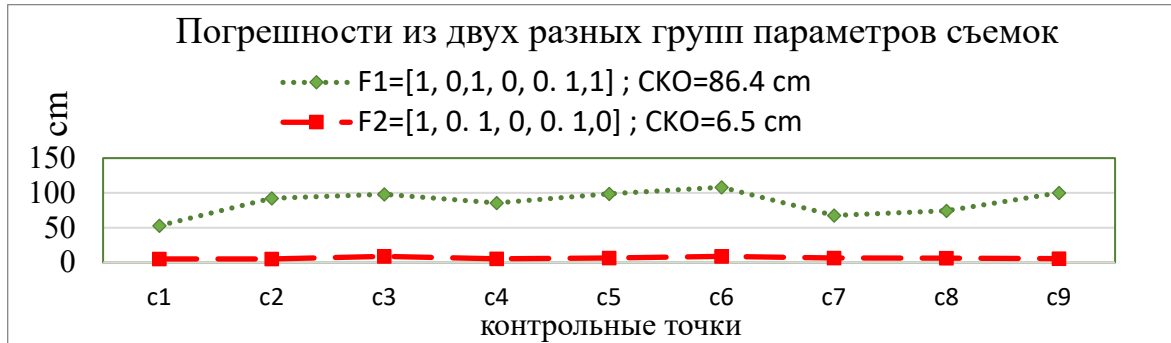


Рисунок 19 – Среднеквадратические ошибки
в двух «экспериментальных съемках»

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 результатом идеальной съемки и съемкой с моделью, полученной по результатам фотосъемки с искусственно введенными случайными отклонениями в навигационные параметры аэрофотографирования (с распределением по закону Гаусса – шумом), можно выбрать оптимальный набор параметров для достижения заданного результата.

Выводы по второму разделу

1 Анализ реализаций аэрофототопографического метода для создания ЦММ и других документов о местности крупного и сверхкрупного масштабов показал, что в условиях Сирии наиболее приемлемым вариантом является использование БВС с навигационным обеспечением приборами четвертого поколения.

2 Для повышения точности создания ЦМР, предназначенных для целей восстановления инженерного обеспечения территорий, разрушенных войной, необходимо использовать комплексные аэросъемочные работы совмещающих АФС с лазерно-локационной съемкой.

3 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.

3 ЦИФРОВОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИХ И СКАНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. СОЗДАНИЕ ДОКУМЕНТОВ О МЕСТНОСТИ

Имитационное моделирование – это метод исследования, при котором изучаемая система или процесс заменяется моделью, описывающей ее с достаточной степенью приближения, с которой проводятся эксперименты для получения информации об особенностях функционирования этой системы. Исходя из определения, имитационное моделирование применяется для изучения производственных подразделений путем создания их цифровых моделей в специальном программном обеспечении и проведении симуляции их работы на разных стадиях и всего технологического процесса в целом.

Процесс имитационного моделирования любого научного эксперимента экономит множество усилий, времени и денег, и нет никаких сомнений в том, что оно дает хорошие надежные результаты, на которые можно положиться в научной работе, и на их основе можно формулировать подход к получению адекватных параметров в реальных полевых экспериментах, при условии выбора значений, соответствующих конкретным условиям съемки.

В работе рассматривается комплекс вопросов подбора аппаратуры, планирования и выполнения аэрофотосъемки и лазерно-локационной съемки с борта БВС, а также методов и средств обработки съемочных материалов с целью создания цифровых документов о местности заданного масштаба и точности.

При этом ключевым моментом в этих процедурах является их реализация в среде имитационного цифрового компьютерного 3D моделирования с привлечением необходимого дополнительного инструментария в виде ГИС, ЦФС и т. д. Предлагаемый в работе подход позволяет перебрать (прокрутить) любое разумное количество вариантов решения поставленной задачи, не прибегая к натурным экспериментам. Это позволяет сэкономить время и средства для получения оптимальных параметров аэросъемки с учетом изучения влияния таких параметров на качество и, прежде всего, точность конечной продукции – ЦММ (ЦМР).

Моделирующей процесс аэрофотосъемки определенной местности с использованием беспилотных воздушных судов и оборудования для аэрофотосъемки, может осуществляться во многих трехмерных программных средах.

В задаче будем создать цифровые модели определенной области (которые можно смоделировать или импортировать, и создать несколько разные масштабные аэрофотоснимки, так что каждый раз изменяется один или несколько параметров съемки (навигационные/съемочные параметры). И каждый раз выполняется сравнение, чтобы выяснить, какой из параметров имеет наибольшее влияние на точность создания цифровых моделей и карт.

Другая важная задача – научиться работать на реальном оборудовании и использовать фактические параметры пропорционально оборудованию во время реального процесса сканирования.

3.1 Выбор программ и подготовка их к выполнению задачи

В настоящее время программы 3D-моделирования реальности достигли такого уровня, что количество задач, решаемых ими, стало огромным. Сегодня в этом секторе рынка имеется очень широкий спектр программного обеспечения для 3D-моделирования, как бесплатных [106], так и коммерческих продуктов разной степени сложности и стоимости. Из значительного количества пакетов для 3D-моделирования можно выделить наиболее популярные и востребованные [107–110], которые представлены в таблице 10.

Среди отмеченных программных средств для трехмерного моделирования реальности среда 3D-моделирования Blender выделяется универсальностью применения и уникальными возможностями подключения программных средств для выполнения «внутренних» процедур необходимых процессов в цепочке моделируемой технологии и доступностью для широкого круга пользователей. Являясь профессиональным свободным и открытым программным обеспечением для создания трехмерных компьютерных моделей, в настоящее время ПО Blender пользуется

большой популярностью среди бесплатных 3D-редакторов в связи с его быстрым стабильным развитием и хорошей технической поддержкой.

Таблица 10 – Программы трехмерного моделирования

Наименование	Цена (Р/год)	Уровень пользователя	Платформы
Autodesk 3ds Max	от 320 000	профессионал	Windows
Houdini	от 600 000	профессионал	Win, MacOS, Linux
Cinema 4D	от 110 000	проф. и любитель	Win, MacOS
ArchiCAD	от 240 000	проф. и любитель	Win, MacOS
<i>Blender</i>	<i>бесплатно</i>	<i>проф. и любитель</i>	<i>Win, MacOS, Linux</i>

Так, ПО Blender позволяет спроектировать корректную схему залетов, учесть (изучить) влияние погрешностей фиксируемых координат центров проекций снимков, в известные элементы внутреннего ориентирования камеры, включая дисторсию, на точность создаваемой по снимкам ЦММ, таким образом подбирать оптимальные параметры (установки) съемки и выявлять геометрию расположения необходимого количества опорных точек в зависимости от сложности ситуации, что позволит получить ЦММ (ЦМР) высокой точности и качества.

У ПО Blender, как и других программных комплексов, имеется схожий набор функций, выполняющих необходимые для имитационного моделирования аэрофототопографические работы. Отметим некоторые функции, важные для моделирования аэрофотосъемки и воздушного лазерно-локационного сканирования:

- импорт трехмерной модели исходной (эталонной) местности для съемки или формирование ее встроенным инструментарием;
- имитация полета БВС в части движения его по заданным маршрутам с определенной высотой и скоростью согласно предварительным расчетам параметров аэрофотосъемки;
- внутренняя камера, которая может отслеживать траектории движения;

– получение массива виртуальных снимков исходной местности с элементами внешнего и внутреннего ориентирования.

Очень важно, что можно моделировать различные условия полета воздушного судна с учетом влияния метеоусловий (ветра, запыленности, облачности) и вносить эти факторы как случайные и систематические погрешности (шум) в определение запланированных координат полета БВС, погрешности внутреннего и внешнего ориентирования аэрофотоснимков, задавая закон распределения вносимых погрешностей. Моделирование аэрофотосъемки или воздушной лазерно-локационной съемки определенной местности ведется с использованием аэрофототопографического комплекса, включающего воздушное судно, цифровой аэрофотоаппарат (ЦАФА), воздушный лазерный сканер, спутниковую аппаратуру GPS (ГЛОНАС), инерциальную навигационную систему IMU и т. д.

Полученные данные виртуальной съемки далее обрабатываются подключаемой к среде Blender процесса постобработки одной из фотограмметрических программных средств – Photomod, MetaShape и пр.

Полученную вторичную модель местности можно как исследовать в среде Blender, так и экспортировать в различные 2D- и 3D-форматы для дальнейшей работы с моделью.

В этой работе нами по отмеченным выше причинам была использована среда имитационного моделирования – «Blender» в текущей 3-й версии на платформе Windows 10 совместно с фотограмметрическим комплексом Agisoft Metashape [111–113].

Помимо процессов моделирования самой съемки чрезвычайно важным исходным условием моделирования является выбор одного или нескольких вариантов программ фотограмметрической обработки, которые подключаются в схему моделирования, аэрофототопографического метода создания ЦММ. Из полутора десятков программных продуктов, широко применяемых для этих целей у нас и за рубежом, весьма востребованных в России – MetaShape, PhotoMod, Pix4Dmodel, ReCap 360, 3DF Zephyr Pro, Context Capture, COLMAP, Reality Capture и пр. были

взяты для исследования четыре пакета в последних версиях на 2021 г. Постараемся кратко охарактеризовать и проанализировать функционал взятых на проработку представленных программных средств фотограмметрической обработки данных модельных съемок.

Первой мы выделим русскую программу Meta Shape компании Agisoft (Россия), в которой реализована современная технология построения 3D-моделей объектов на основе фотограмметрической обработки стереопар цифровых фотоснимков. Для реконструкции 3D-модели объекта ПО Metashape могут использоваться цифровые фотоснимки с перекрытием в расчетных процентах, полученные любыми цифровыми фотокамерами. Процесс создания 3D-модели полностью автоматизирован. Масштабирование модели производится на основании предварительных определений координат опорных точек в пределах реконструируемого объекта съемки. На сегодня это очень популярное приложение, используемое как в профессиональной сфере (аэрофототопография, 3D-моделирование сцен, ЦММ, ЦМР), так и в рекламе, маркетинге и индустрии развлечений, поскольку обеспечивает высокое качество продуцирования 3D-моделей за приемлемое время.

Из зарубежных программ: от компании Bentley (США) упоминаем пакет Contex Capture, который представляет новую технологию, не требует обязательного привлечения высококвалифицированных специалистов по аэрофотограмметрии, а делает процесс получения и обработки данных доступным всем заинтересованным лицам. Эта инновационное решение значительно упрощает получение пространственных данных об изучаемых объектах, поскольку для этого пригодны обычные фотоснимки, полученные любой цифровой камерой, – будь то камера, установленная на беспилотном летательном аппарате, или цифровой фотоаппарат общего назначения. В программном продукте Context Capture полученные снимки объекта обрабатываются фотограмметрическим методом для получения высокоточной 3D-сетки по плотному облаку точек, которую компания Bentley называет сеткой реальности. Точность сетки модели ограничивается только линейным разрешением исходных фотографий [113]. Важно, что ПП Contex Capture допускает

достижения точности, соизмеримой с точностью лазерного сканирования. В некоторых случаях получение данных посредством лазерного сканирования может быть затруднено, а то и просто оказаться невозможным – например, при создании модели целого города. Данные, обработанные в Contex Capture, можно размещать в облачных продуктах. Размер модели, формируемой Contex Capture, в десятки раз меньше, чем модели, полученной с помощью лазерного сканирования

Также следует выделить и линейку программных продуктов Pix4D Solutions швейцарского института EPFL, включающую Pix4D mapper, Pix4Dag, Pix4Dbim, Pix4Dmodel, Pix4Dcapture, которые используются для обработки аэрофотоснимков и получения высокоточных 3D-моделей, ЦММ, ЦМР, карт отражений и карт индексов. Приложение может обрабатывать большие объемы данных на мощных компьютерах, и оно немного выполняет обработку больших объемов исходных данных быстрее чем, скажем, Agisoft или Context Captur [112, 113]

И, наконец, еще один из привлеченных нами в исследования ПП – Reality Capture (Словакия) – с которым можно обрабатывать данные гораздо быстрее других и задействовать огромные количества изображений на обычном компьютере. Reality Capture превосходит другие ПО благодаря функции быстрого ориентирования снимков, разрешающей построить фотограмметрическую модель за малое время. Это важный инструмент хорош для проверки данных сразу на месте съемки, для уточнения, что изображений достаточно и нет пропусков на поверхности оригинала. При более низких настройках в Agisoft почти таких же скоростей фототриангулирования можно достичь, но Reality Capture значительно быстрее Agisoft в реконструкции облака точек.

3.2 Подготовка исходных данных для имитационного моделирования съемки

Проведение процедур имитационного моделирования топографической АФС местности предполагает выбор реалистичной модели территории с необходимыми морфологическими и тематическими (объектами на ней) характеристиками и метрической точностью ее описания. Последнее является ключевым, поскольку мо-

дель территории нами по замыслу эксперимента является эталоном, с которым мы будем сравнивать производные модели «этой местности», получаемые в процессе моделирования ее по результатам имитации различных вариантов аэрофототопографической съемки и средств ее обработки.

Для выбора первичной модели в ПО Blender предусмотрено подключение ГИС-инструментов, а также источников данных, которые можно использовать для загрузки исходной модели территории для съемки. В ПО Blender эта задача решается при помощи интернет-ресурсов OpenStreetMap, Google Earth или другого ГИС-инструментария.

На рисунке 20 приведен интерфейс ПО Blender, в котором стрелками показаны загрузка ГИС-инструментария с сайта <https://github.com/domlysz/blenderGIS> (1); ресурса OSM с сайта <https://prochitecture.gumroad.com/l/blender-osm> (2); лазерный сканер с сайта <https://github.com/ln-12/blainder-range-scanner> (3); первичная (исходная) модель местности (4).

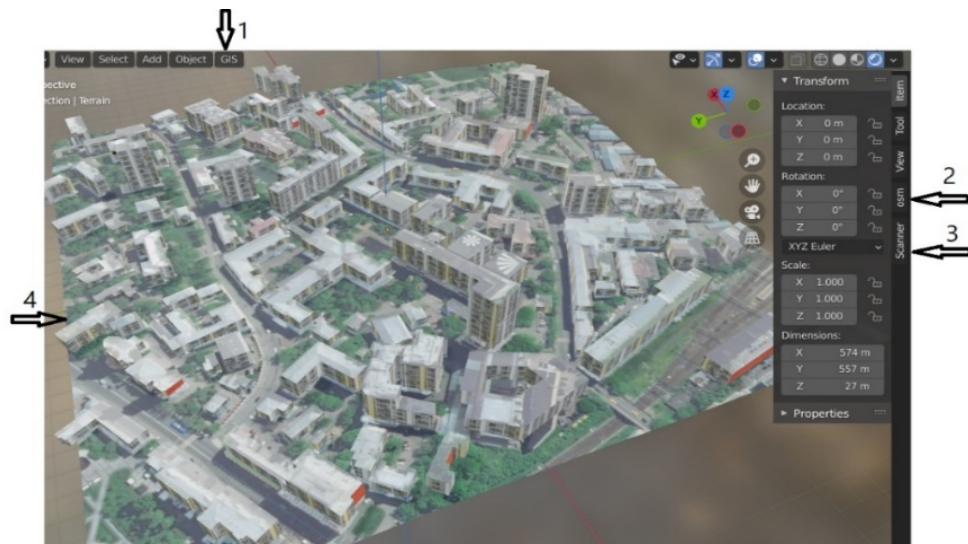


Рисунок 20 – Интерфейс выбора вспомогательного инструментария в ПО Blender

Выбор воздушного судна в целом зависит от конкретной задачи, вида получаемых материалов, размеров, местоположения и типа местности объекта съемки, а также необходимой точности и плотности измерений и, конечно, от метеоусловий

[114]. Нашим интересам отвечают малоразмерные БВС, способные нести полезную нагрузку до 2,5 кг. Предпочтение отдавалось моделям вертолетного типа (мультикоптерам) или самолетного типа – летающее крыло. В данном случае нами «использован» квадрокоптер бюджетного уровня DJI Phantom 4 RTK + D-RTK 2 Mobile Station Combo с пилотажно-навигационным оборудованием четвертого поколения и мобильной станцией для режима съемки RTK. Его основные параметры и основные данные фотосъемочных систем приведены в таблице 11 и использованы нами при имитационном моделировании [115]. Для нас важно, что модель DJI Phantom 4 RTK + D-RTK 2 Mobile Station Combo может снимать до 4 кв. км за один полет [116].

Таблица 11 – Квадрокоптер DJI Phantom 4 с мобильной станцией RTK + D-RTK

Взлетный вес	1391 г
Макс. высота полета	6000 м
Макс. время полета	до 30 мин
Съемочная камера	
Объектив	угол обзора 84°: 8.8 мм / 24 мм (35-мм эквивалент), f/2.8-f11
Размер изображения	4864 × 3648 (4:3), 5472 × 3648 (3:2)
Подвес (аэрофотоустановка)	
Стабилизация	3-осевая (наклон, поворот, сгибание)
Контролируемый диапазон	Наклон: от -90° до +30°
Угловая точность управления	±0.02°

Далее на основании особенностей участка, выбранного воздушного судна и съемочной аппаратуры, а также требований к точности создаваемой вторичной модели местности рассчитываются параметры съемки в идеальных метеоусловиях. Но среда моделирования ПО Blender привлекла тем, что для имитационного моделирования реальной съемки можно задавать широкий спектр изменений (вариаций) как внешних условий съемки, так и наличие, расположение или отсутствия точек съемочного обоснования, их точность позиционирования, а также задавать текущие погрешности в основные параметры съемки, влияющие на точность построе-

ния конечной ЦММ. Причем можно вводить как систематические погрешности, так и случайные, закон распределения которых задается для каждого прогона экспериментального моделирования аэрофототопографической съемки.

3.3 Калибровка камеры

Чтобы эффективно использовать камеры во время фотографического процесса в целом и аэрофотографирования в частности, важно знать их характеристики и шаги для их калибровки, чтобы вывести параметры, исправить их ошибки и компенсировать их во время съемки, с целью максимально уменьшить количество ошибок, возникающих в процессе сканирования при использовании изображений для создания карт или цифровых моделей.

Калибровка камеры – это процесс оценки параметров камеры, т. е. элементов внутреннего ориентирования и коэффициентов дисторсии.

Калибровка камеры в Blender. Применяемая нами для имитационного моделирования аэрофотосъемки платформа DJI Phantom-4 RTK + D-RTK, как известно, имеет в своем составе «не метрическую» съемочную камеру с фокусным расстоянием 8,8 мм. Одна из первых задач имитационного моделирования АФС состояла в том, чтобы выявить влияние на точность формируемой ЦММ при съемке некалиброванной камеры (а), использование предварительно откалиброванной камеры в лабораторных условиях (б), использование некалиброванной камеры в режиме обработки данных съемки методом «самокалибровки» (в), а также комбинацию этих условий [117].

Вопросы калибровки съемочной камеры в ПО Blender доступны со всеми параметрами. Алгоритм калибровки в Blender аналогичен известным методам, связанным с фотографированием тест-объекта типа «шахматной доски» (рисунок 21) или другого пространственного тест-объекта. С камеры производятся снимки поля шахматного изображения с разных положений – с разных углов и разных расстояний. Полученные изображения обрабатываются в специализированной программе (например, Agisoft Metashape), где добавляются снимки тест-объекта, полученные

в Blender, и выбираются опции для сохранения параметров калибровки. Эти параметры будут использоваться до обработки данных аэрофотосъемки.

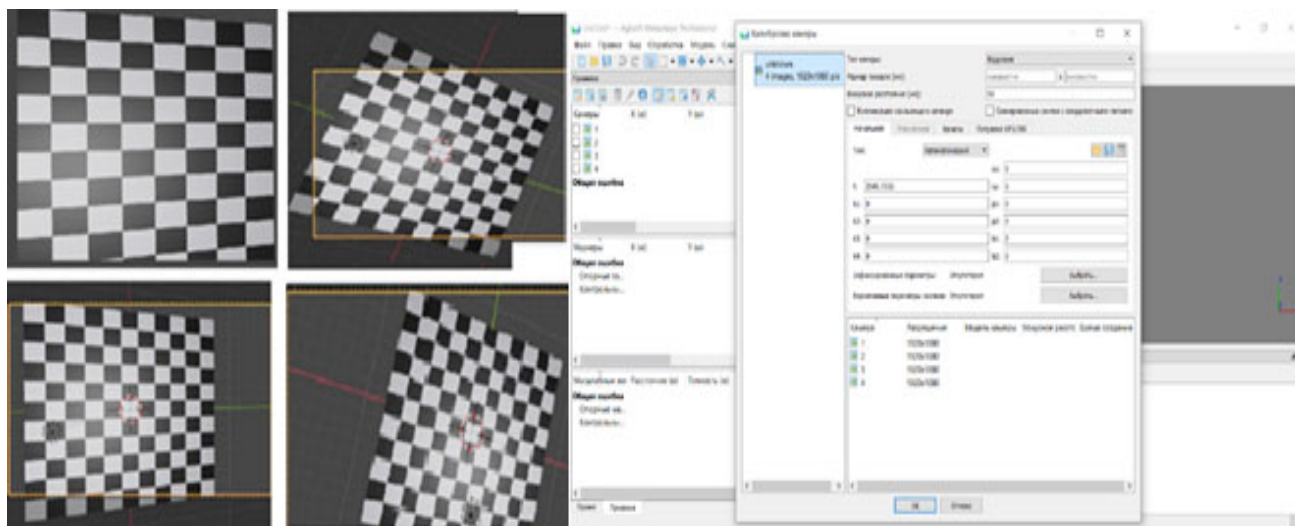


Рисунок 21 – Шахматное изображение и интерфейс добавления параметров калибровки камеры через Agisoft Metashape

На рисунке 22 представлен очевидный результат в построения фотограмметрической модели по данным, полученным камерой с известными элементами внешнего ориентирования (а) и без них (б), что показывает корректную работу среды моделирования для реализации аэрофототопографического метода.

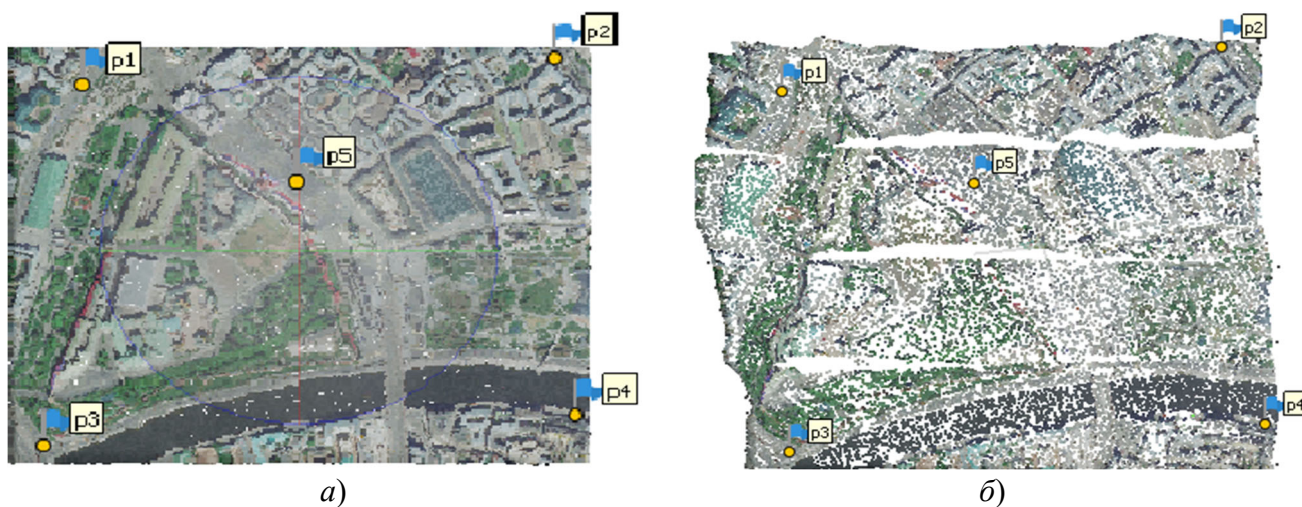


Рисунок 22 – Результат обработки снимков: а) с известными значениями ЭВО; б) без параметров калибровки

Здесь и далее геометрическая точность построения ЦММ, получаемая авторами в имитационных экспериментах, оценивалась по разнице между значением координат контрольных точек (КТ) на исходной (эталонной) модели и координатами таких же точек на конечной модели [118]

$$CKO_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_i^n ((x_{ci} - x_{vi})^2 + (y_{ci} - y_{vi})^2)}{n}}; \quad CKO_z = \sqrt{\frac{\sum_i^n (z_{ci} - z_{vi})^2}{n}}, \quad (9)$$

где $CKO_{x,y}$ и CKO_z – среднеквадратичная ошибка построения модели в плане (x, y) и по высоте (z), соответственно;

x_{ci}, y_{ci} и z_{ci} – координаты i -й КТ на первичной модели;

x_{vi}, y_{vi}, z_{vi} – координаты i -й КТ на результирующей модели.

На рисунке 23 представлены погрешности в построении модели по отношению к исходной (эталонной) для трех вариантов условий съемки по девяти контрольным точкам

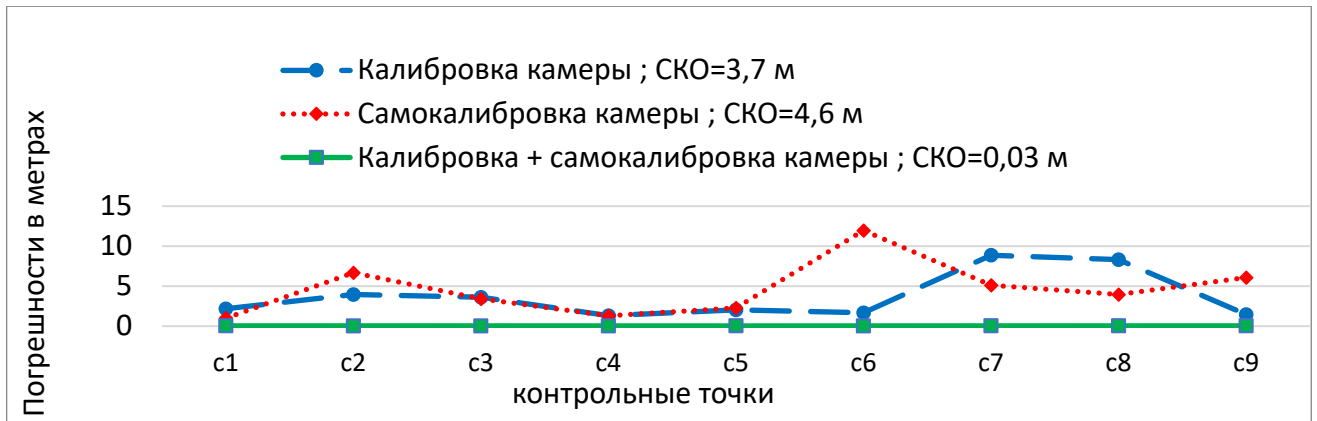


Рисунок 23 – Влияние параметров калибровки камеры на результаты получаемой модели: приближенная калибровка камеры – синяя линия; самокалибровка камеры – красная линия; приближенная калибровка и самокалибровка камеры – зеленая линия

3.4 Моделирование процесса аэрофототопографической съемки

На выбранной трехмерной модели можно добавлять эффекты в соответствии с необходимостью для решения требуемой задачи (освещение, направление и силу ветра, растительность, водные объекты, здания и т. д.). Также нужно рассчитать все параметры аэрофотосъемки (журнал расчета, параметры камеры, маршрут, перекрытие, интервал фотографирования, опорные точки, контрольные точки и т. д.) [119, 120].

Дальше можно добавить погрешности на любой параметр съемки, чтобы оценить влияние на результат конечного моделирования. На рисунке 24 показаны количество маршрутов БВС (шесть маршрутов), на которых индицируются: точки разворота с одного маршрута на другой, координаты точек фотографирования (БВС), время фотографирования, элементы внешнего ориентированных снимков. Также в интерфейсе задаются характеристики объектива камеры и фотоматрицы.

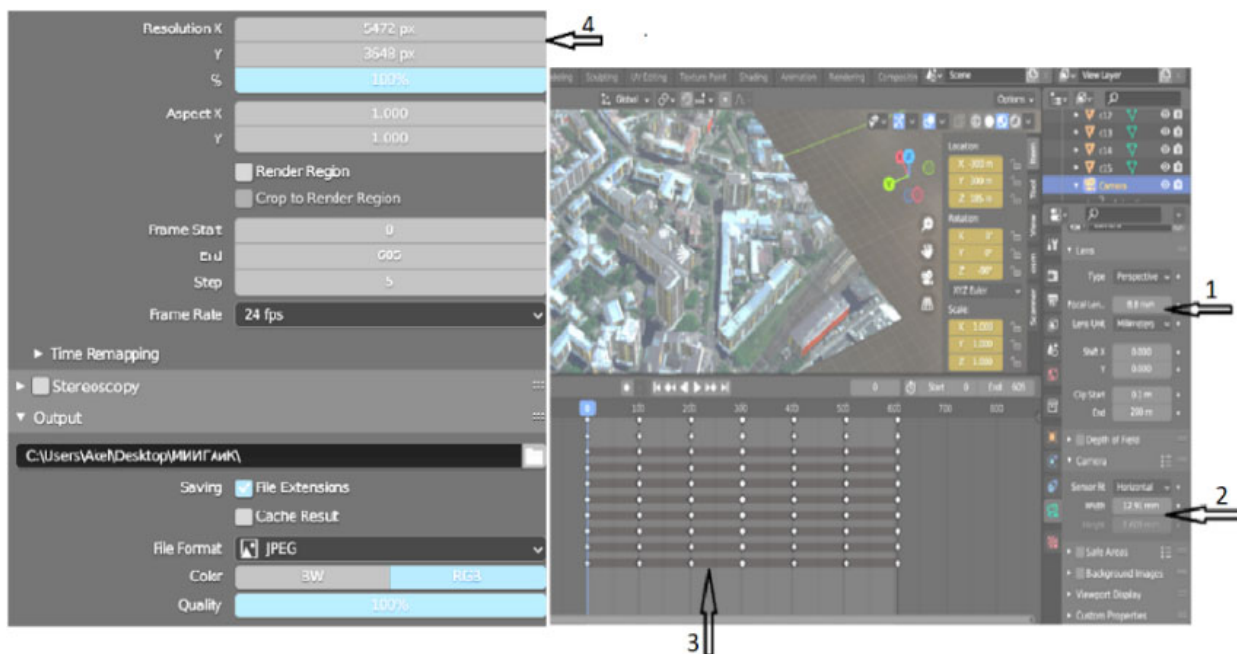


Рисунок 24 – Интерфейс задания параметров аэрофотосъемки: 1) фокусное расстояние ЦАФА; 2) размер матрицы; 3) маршруты и точки фотографирования; 4) размер изображения

В условиях имитационного моделирования аэрофотосъемки в «идеальном случае» все параметры указываются без внешних негативных воздействий на процесс и, соответственно, без введения погрешностей как результата этих воздействий. При имитации реальных условий съемки необходимо вводить случайные или систематические погрешности в расчетные параметры аэрофотосъемки, возникающие вследствие различных причин – метеоусловия, погрешности в определении приборных показателей или в нестабильных условиях работы съемочного оборудования.

На рисунке 25 показан интерфейс программы введения случайных погрешностей в линейные «как случайный шум» элементы внешнего ориентирования – X_c , Y_c и Z_c . Аналогично задаются погрешности в угловые элементы внешнего ориентирования снимка – α , ω , κ , которые задаются в предположении их нормального распределения с параметром СКО.

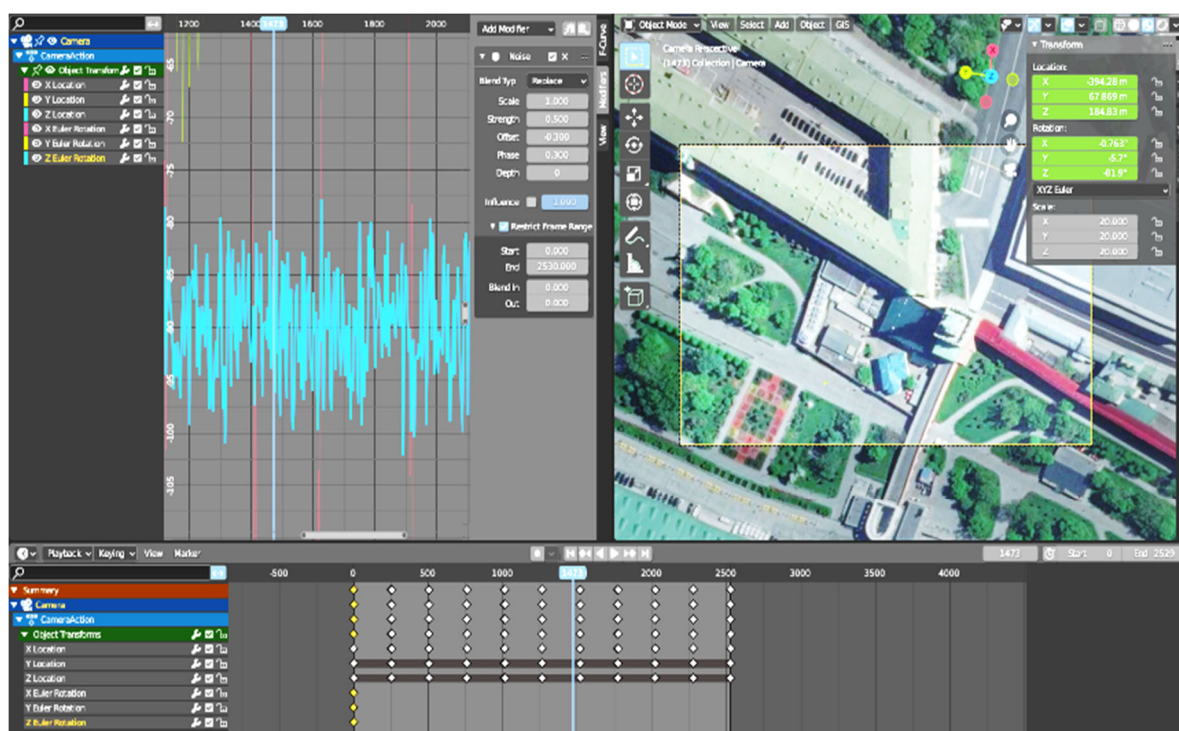


Рисунок 25 – Установки параметров съемки и добавление случайных погрешностей «шума» в линейные и угловые величины элементов внешнего ориентирования

Таблица 12 – 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</i> – В скобках максимальное значение.				

В таблице 12 представлены результаты имитационного моделирования аэрофототопографической съемки с данными о внесенных случайных отклонениях в координаты центров проекции для четырех вариантов взаимных перекрытий снимков и маршрутов при аэрофотографировании эталонной модели с высоты 260 м, что обеспечивало проекцию пикселя снимка на поверхности этой модели порядка 7 см.

Обработка данных моделирования съемки осуществлялась в среде Agisoft MetaShare и дала следующие результаты. График, приведенный на рисунке 26, показывает распределение ошибок в плановых координатах конечной модели по девяти контрольным точкам для всех вариантов съемочных параметров.

Из данных таблицы и графика следует, что с повышением перекрытия снимков точность создания конечной модели увеличивается незначительно и это может быть оправдано 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.

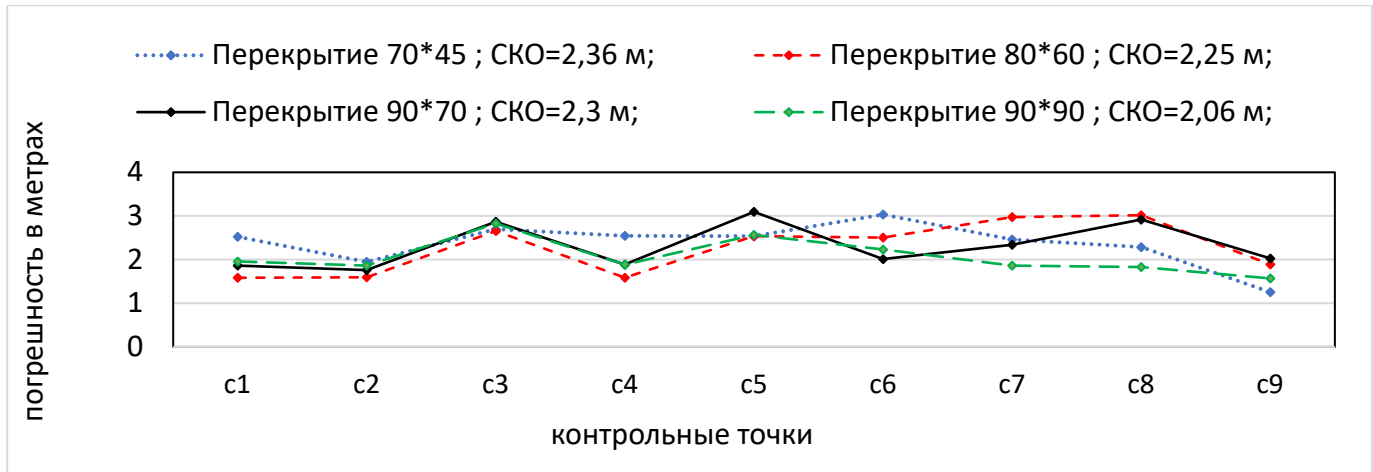


Рисунок 26 – Влияние изменений перекрытий на точность метрики конечной модели

В этой связи при имитационном моделировании получен интересный результат относительно производительности выбранных трех ЦФС для обработки вариантов модельных съемок, представленный в таблице 13.

Более подробное рассмотрение результатов имитационного моделирования аэрофототопографической съемки с борта квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro нами изложено в работах [121, 122] и в следующем разделе.

Таблица 13 – Сравнение точности построения модели и времени моделирования трех программ

	Количество точки	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

Далее мы остановимся на имитационном моделировании процесса съемки местности лазерно-локационными средствами, а также результатах имитационного моделирования комбинированием аэрофотосъемки с лазерным сканированием.

3.5 Моделирование процесса создания ЦММ по данным лазерного сканирования

Моделирование аэрофотосъемки возможно как при помощи цифровой камеры отдельно, так и с помощью лазерного воздушного сканера, находящегося на беспилотнике, а также при помощи камеры и сканера одновременно.

Установленные первоначальные настройки и значения выглядят следующим образом (рисунок 27).

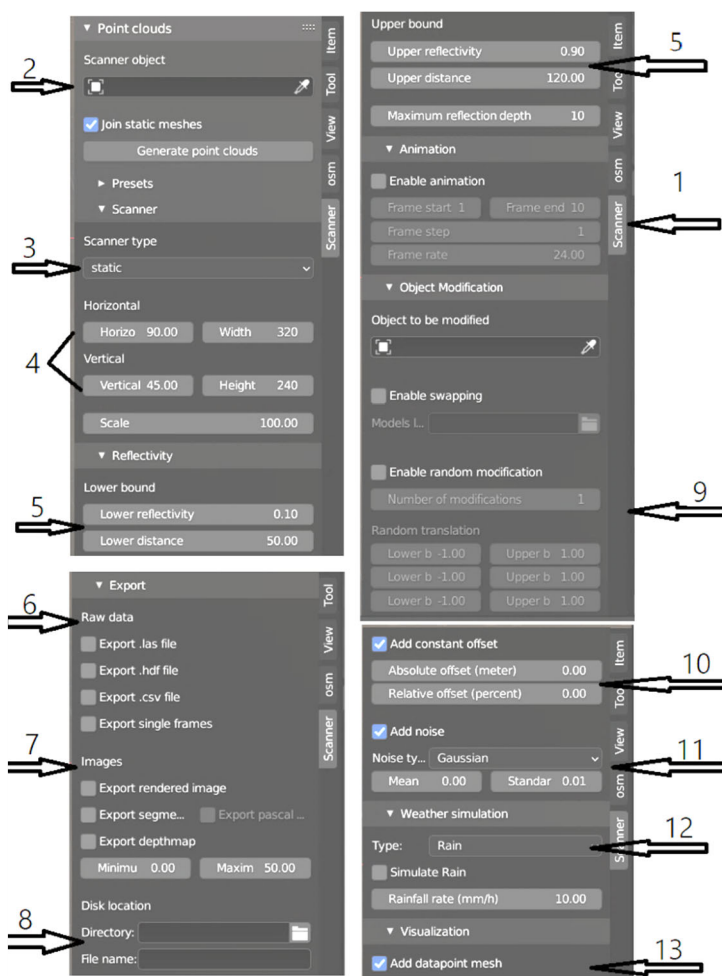


Рисунок 27 – Функции и установка параметров лазерного сканера (пояснения в тексте): 1 – сканер; 2 – определить элемент, который играет роль сканера; 3 – выбрать тип сканера; 4 – установить угол обзора и разрешение; 5 – определить более низкую и более высокую отражательную способность и дальность; 6, 7 – выбрать тип и расширения файлов и фото; 8 – указывается название и место сохранения файлов; 9, 10, 11, 12 – внести шум, отклонения, влияния дождя и пыли; 13 – добавить сетку точек данных

Исходными данными для имитации лазерно-локационной съемки является та же территория, которая являлась базовой для моделирования аэрофототопографической съемки.

Аналогичным образом был привлечен для моделирования лазерный сканер, приспособленный для использования на платформах малогабаритных БВС.

Использованы параметры российского лазерного сканера АГМ-МС1 от компании «АГМ Системы». Сканер отличается малым весом, что позволяет в зависимости от задач устанавливать его на различные летательные аппараты, в том числе БВС любого типа. Основные характеристики представлены в таблице 14 [123].

Таблица 14 – Характеристики воздушного лазерного сканера АГМ-МС1

Частота сканирования	600 кГц
Максимальная дальность	200 м
Угол поля зрения	360 градусов
Скорость вращения сканирующего зеркала	20 об/секунду
Точность определения дальности	3 см
Точность определения координат	3-5 см
Размеры сенсорного блока	120x116x112 мм
Вес сенсорного блока	1.2 кг
Источник питания	9-18 V, 1.3 А
Температура использования	-10...+50 °С

Визуализация и экспорт данных. Результатом имитационного моделирования аэросъемки и лазерно-локационной съемки является облако точек. Для обработки и визуализации в других программах требуется экспорт в виде сохраняемого файла. Облако точек состоит из записей данных для каждой точки, каждая из которых содержит следующую информацию:

- положение точки в пространстве (координаты X, Y и Z);
- семантическая метка;
- интенсивность измерения точки;
- спектральная яркость точки;
- расстояние между датчиком и поверхностью объекта.

Данные ВЛС в ПО «Blender» можно экспортировать в другие программные средства посредством файлов в формате - *.ls, *.hdf, *.csv).

На рисунке 28 показан результат имитационного моделирования процесса лазерного сканирования той же области с помощью симулятора лазерного сканера типа АМГ-СМ1, который представляет собой облако точек (кампус МИИГАиК), экспортированное с инструментарием программы Blender в специализированное ПО «CloudCompare» для обработки и визуализации.

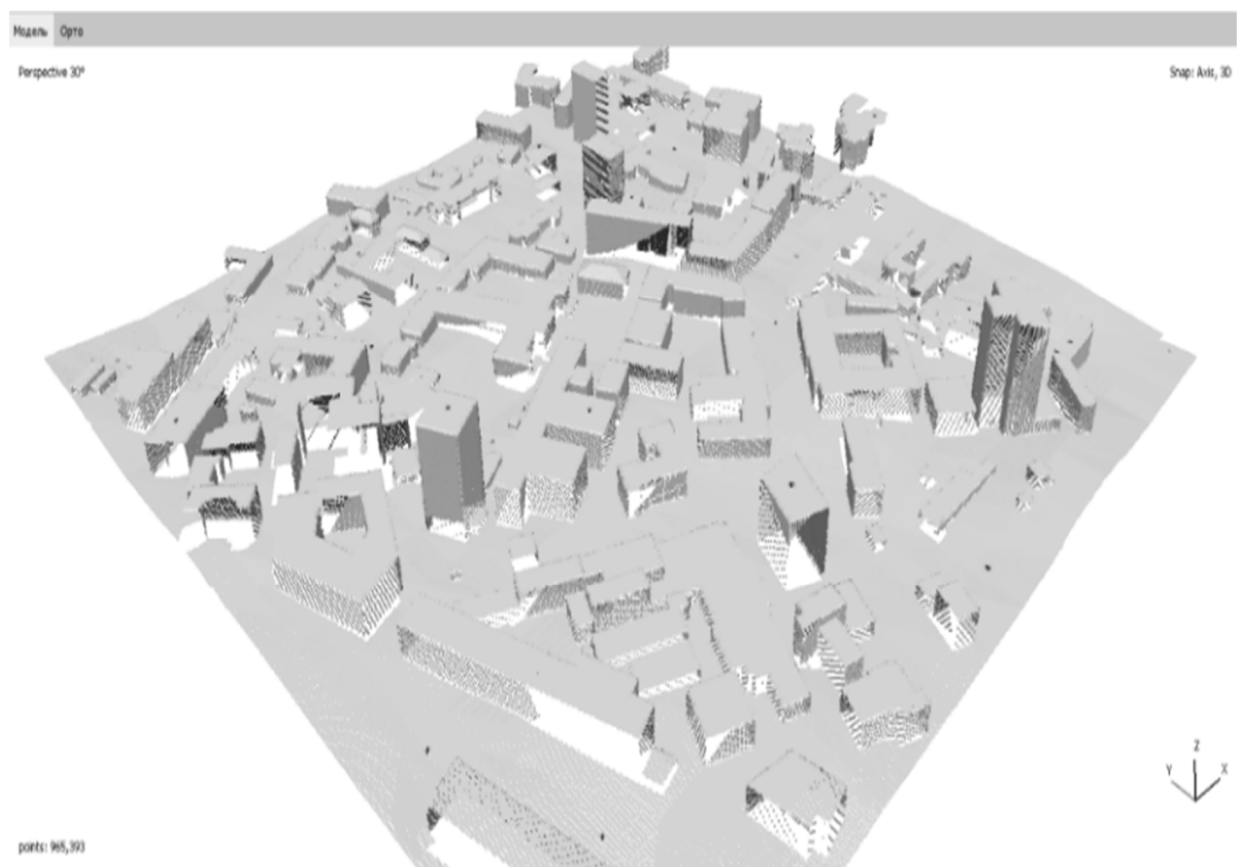


Рисунок 28 – Облако ТЛО, полученных при моделировании лазерно-локационной съемки кампуса МИИГАиК

В результате моделирования процесса сканирования с высоты, как и при аэрофотосъемке (185 м), было получено облако ТЛО в количестве 9 513 469 точек, среднее расстояние между которыми равно 20 см, то есть порядка 25 точек на кв. м.

3.6 Схема технологии изучения влияния вариаций навигационных параметров БВС на точность создания ЦММ в рамках имитационного моделирования воздушных съемок

Для выбора оптимальных аэросъемочных параметров нами были проведены эксперименты в рамках имитационного моделирования, в ходе которых фиксировались практически все текущие навигационные и съемочные параметры, а отклонения, возникающие при изменении параметров во время полета, будут учитываться в процессе обработки. На рисунке 29 представлена схема, которая позволяет выявить и учесть влияния изменений каждого навигационного и съемочного параметра на конечную точность и производительность создания ЦММ.

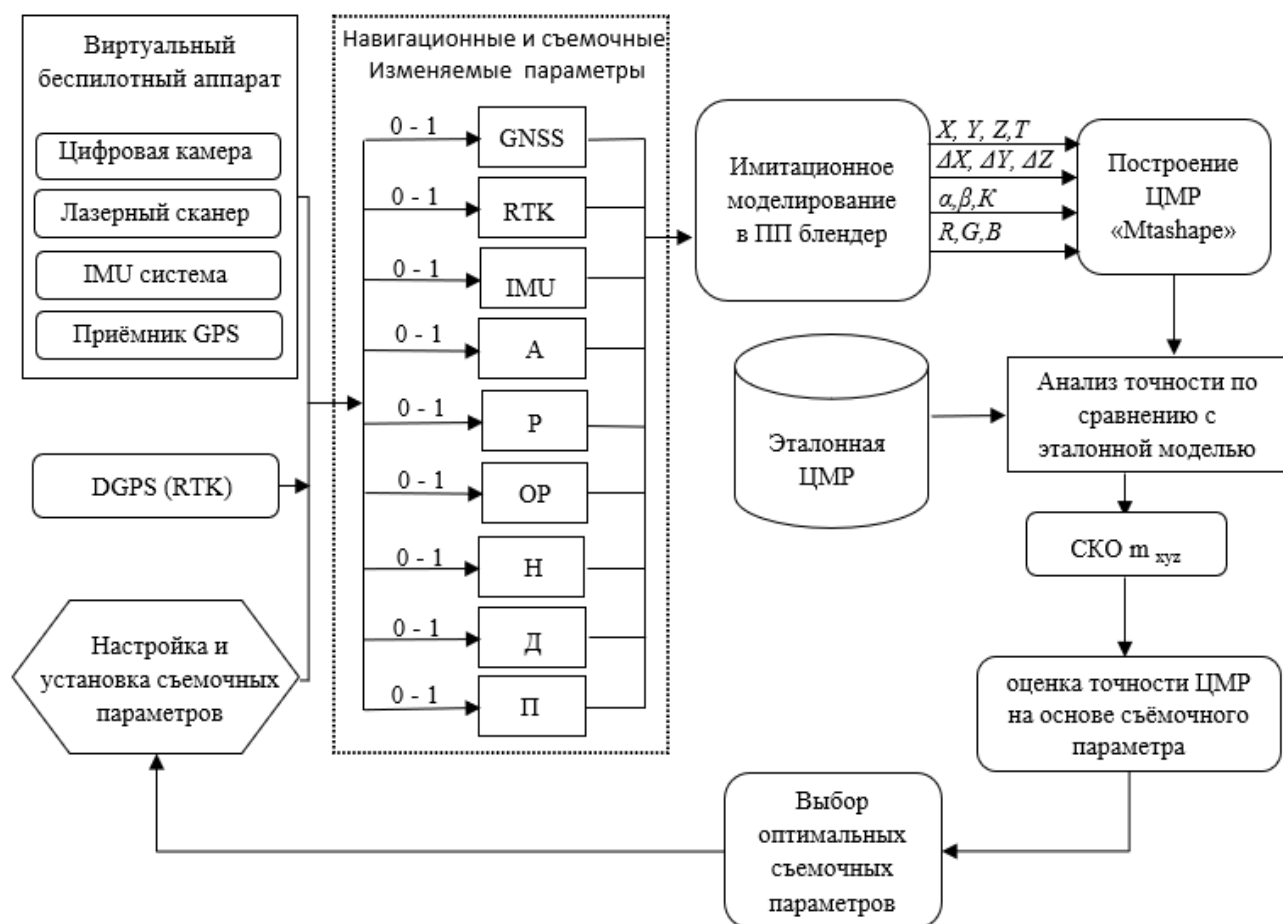


Рисунок 29 – Общая схема экспериментальных модельных аэрофото- и лазерно-локационных съемок

Выводы по третьему разделу

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1 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 аэрофотосъемке местности, заменяя натурные сложные эксперименты, экономя время, затраты на оборудование и накладные расходы, как правило, сопровождающие реальные полевые аэрофотосъемочные работы.

2 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.

3 Предлагаемая методика имитационного моделирования может быть рекомендована как средство обучения по курсам, связанным с технологиями летно-съёмочных работ для целей картографирования территорий в крупных масштабах.

4 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ БВС НА ТОЧНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЦММ

4.1 Исходные данные и расчет АФС элементов для процедур моделирования АФС с целью создания ЦММ

В соответствии с основной целью исследования нами выполнены серии экспериментальных виртуальных съемок, в которых мы исследовали влияние вариаций навигационных и съемочных параметров при выполнении аэрофототопографических работ для создания крупномасштабных ЦММ и ЦМР.

Запланированные варианты аэрофотосъемочных работ выполнялись методом имитационного моделирования в среде «Blender 3.0» по методике, описанной в предыдущем разделе. В соответствии с этой методикой были выбраны:

А – территория съемки в виде цифровой модели местности, принятой за эталон, с которым сравнивались производные модели местности как результаты имитационного моделирования;

Б – съемочная платформа на базе квадрокоптера DJI Phantom-RTK (или Гео-скан 401);

В – комплект наземного спутникового оборудования для съемок в режиме RTK + DGPS;

Г – три цифровых фотограмметрических системы MetaShape Agisoft (основная), Pix4D и Reality Capture;

Д – специализированное ПО для обработки данных лазерно-локационной съемки – CloudCompare;

Е – геоинформационный инструментарий для изучения и анализа точности ЦММ (ЦМР), созданных на основе имитационных съемок.

Согласно вышперечисленным этапам нами для имитационного моделирования аэрофототопографической съемки выбрана территория (кампуса Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) с прилегаю-

щей к ней территорией Государственного университета землеустройства (ГУЗ), расположенных в исторической застройке бывшей Басманной слободы общей площадью порядка 32 га. Диапазон превышений на модели с учетом высоты зданий и сооружений равнялся 65 м.

Размер проекции пикселя (GSD) для большинства вариантов моделируемых аэросъемок устанавливался равным 10 см, что является точностью, требуемой в стандартных документах в Сирийской Арабской Республике, был принят для гражданских геодезических работ.

С учетом этого, расчетные параметры для аэрофотосъемки (высота съемки, продольный и поперечный базис фотографирования (чтобы получить заданное продольное и поперечное перекрытие снимков) наложения изображений, количество трасс, количество снимков и т. д.) рассчитывались по формулам из [124–126].

Расчетная высота фотографирования H_ϕ

$$H_\phi = 2R \cdot GSD \cdot \frac{f_k}{\delta}, \quad (10)$$

где H_ϕ – высота фотографирования относительно заданной поверхности (м);

f_k – фокусное расстояние фотосистемы (м);

GSD – проекция пикселя матрицы ЦАФА на заданной поверхности (м);

R – разрешение на матрице (цикл./пиксель);

δ – размер пикселя матрицы (м).

Расчетное продольное перекрытие аэрофотоснимков, p_x %

$$p_x = p_{x0} + \Delta p_h + \Delta p_n, \quad (11)$$

где p_{x0} – минимальное продольное перекрытие = 60%;

Δp_h – поправка за рельеф;

$$\Delta p_h = \Delta h \cdot \frac{(100 - p_{x0})}{H_\phi}, \quad (12)$$

Δh – разность между самой высокой точки и самой низкой точки участка;

Δp_h – навигационная поправка за ошибку самолетовождения.

Расчетное поперечное перекрытие аэрофотоснимков p_y %.

Для масштаба 1 : 10 000 и крупнее:

$$p_y = 40 \% + \left(50 \times \frac{\Delta h}{100 \times H_\Phi} \right). \quad (13)$$

Продольный базис фотографирования, B_x (м)

$$B_x = \frac{(X_{п.М_\Phi})(100 - p_x)}{100}, \quad (14)$$

где $M_\Phi = \frac{H_\Phi}{f}$ – знаменатель масштаба фотографирования.

Поперечный базис фотографирования B_y (м)

$$B_y = \frac{(Y_{п.М_\Phi})(100 - p_y)}{100}, \quad (15)$$

где $X_{п.}$, $Y_{п.}$: физический размер матрица (м).

Интервал фотографирования τ (секунды):

$$\tau = \frac{X_{п.} \cdot H_\Phi}{f \cdot W} \cdot \frac{100 - p_x}{100}, \quad (16)$$

где $X_{п.}$ – физический размер фото матрицы вдоль линии полета (м);

W – путевая скорость БВС (м/с).

Количество аэроснимков в одном маршруте N_x :

$$N_x = \frac{L_x}{B_x} + N_3; \quad N_3 = 4, \quad (17)$$

где L_x – длина участка съемки (м)

Количество маршрутов N_y :

$$N_y = \frac{L_y}{B_y} + 0.5 \cdot j \quad ; \quad j = 2, \quad (18)$$

где L_y – ширина участка (м).

Данные параметры далее вводились в ПО «Blender» для имитации аэрофото-съемки с учетом того, что все эти параметры будут реализовываться с «идеальной» точностью, соответствующей «статусу состояния» $\vec{F} = [G, R, I, A, M, P, \dots, OT]$ для всех его компонент, равным 1. Далее результаты виртуальной АФС передавались в ПО «MetaShare» для фотограмметрической обработки и получения ЦММ, которая в свою очередь масштабировалась и ориентировалась по опорным точкам.

Количество опорных точек на территории съемки составляло пять: четыре распределенных по углам участка съемки и точка в середине, что является достаточным количеством для участка такого размера (рисунок 30).

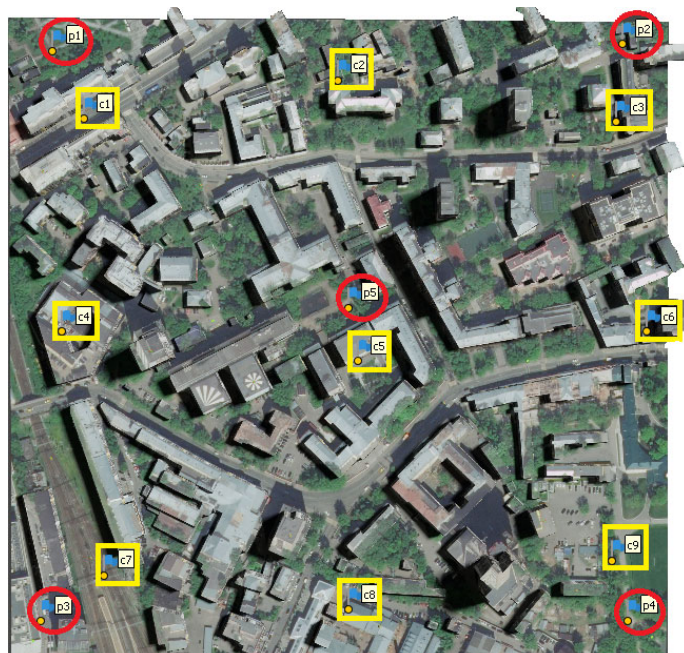


Рисунок 30 – Расположение опорных (в красном круге) и контрольных (в желтом квадрате) точек на территории съемки

Оценка точности построения конечной ЦММ осуществлялась традиционно по контрольным точкам. Количество контрольных точек – девять, распределенных по площади участка.

Было проведено несколько экспериментов имитационного моделирования с целью изучения влияния изменения параметров съемки на точность создания цифровых моделей.

Перечислим параметры аэрофототопографической съемки, изменение которых изучались с точки зрения влияния на точность создания ЦММ (ЦМР):

а) линейные элементы внешнего ориентирования (X , Y , H_ϕ) снимков, определяемых GPS оборудованием в режиме RTK, значения которых изменялись на случайную величину с нормальным законом распределения в плане при ± 1 , ± 3 и ± 5 м при максимальном отклонении до 3, 10 и 15 м, и аналогично по высоте ± 1 , ± 5 и ± 10 метров при максимальном значении до 3, 15, 30 м [127, 128];

б) угловые элементы внешнего ориентирования (α , ω , κ) снимков, определяемые IMU системой или стабилизируемые с погрешностью порядка ± 1 , ± 3 и $\pm 5^\circ$ с максимальным значением до 3° , 10° и 15° ;

в) фокусное расстояние камеры f_k (элемент внутреннего ориентирования) с погрешностью определения до ± 3 пикселей.

Для начала покажем определенные преимущества аэрофотографирования при ориентации фотосистемы короткой стороны снимков вдоль направления движения летательного аппарата, как это показано на рисунке 31 (параллельно (А), перпендикулярно линии полета (Б)).

Предварительные расчеты показывают, что вариант А предпочтительнее потому, что это экономит время и количество маршрутов, и количество снимков. Таблица 15 показывает сравнение показателей двух вариантов ориентации камеры относительно линии полета.

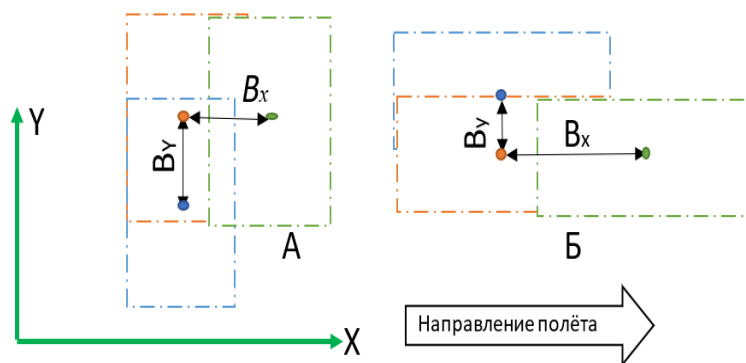


Рисунок 31 – Ориентация снимков относительно геодезической системы координат

Таблица 15 – Съёмочные параметры в соответствии с ориентацией снимков

Вариант	А	Б
Высота съёмки (H_ϕ)	185	185
Продольный базис B_x (м)	40	60
Поперечный базис B_y (м)	115	77
Интервал фото. (сек)	2,6	4
Количество маршрутов N_y	10	15
Количество снимков в маршруте N_x	40	27
Общее число снимков N_{xy}	400	410

Далее все имитационные съёмочные эксперименты будут проводиться с ориентацией снимков по варианту А (короткая сторона снимка параллельна направлению движения ЛА).

4.2 Экспериментальные исследования влияния навигационного оснащения БВС на точность результатов фотограмметрической обработки

4.2.1 Исследование вариантов создания ЦММ по данным АФС при наличии опорных точек

Чтобы выяснить степень влияния изменения линейных и угловых элементов внешнего ориентирования на точность построения ЦММ, было проведено много имитаций летно-съёмочных экспериментов. Каждый раз один из параметров

(например, H – высота фотографирования) изменялся путем ввода погрешностей (для всех снимков как случайная величина с нормальным законом распределения) с пошаговым увеличиваем среднего значения погрешности, как указано выше, до максимального, при которой точность построения ЦММ становится недопустимой.

В этом эксперименте с учетом пошагового увеличения высоты изменялась и проекция пикселя на поверхности модели, что также должно влиять на точность ее построения. На рисунке 32 представлен идеальный случай виртуальной съемки, который дает точное совпадение модели, построенной в имитационном эксперименте, с первичной (идеальной) моделью местности, которая была сфотографирована. Данные вариантов съемки представлены таблицей 16.

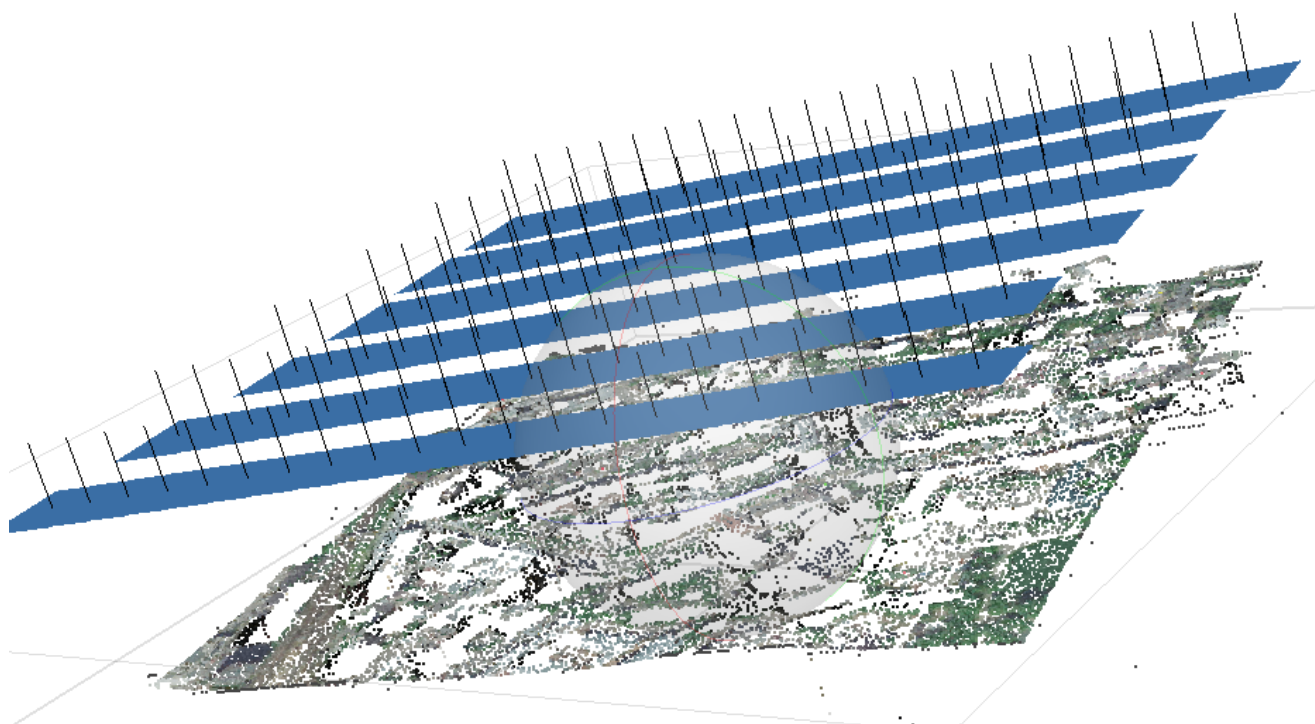


Рисунок 32 – Вид в ПО Metashape результата моделирования АФС
в идеальных условиях

После введения случайных погрешностей, которыми считаются погрешности измерений навигационных приборов, другими словами погрешности определения элементах внешнего ориентирования, GPS приемником и инерциальной навигаци-

онной системы, эти погрешности введенных в параметры внешнего ориентирования снимков в пределах, указанных выше, и использования пяти опорных точек (см. рисунок 30), мы получили после фотограмметрической обработки в ПО «Agisoft_Metashape» модель, представленную на рисунок 33, качество которой мы оценивали по девяти контрольным точкам.

Таблица 16 – Разные параметры разных размеров пикселей

Размер проекции пикселя (GSD) (см)	5	7	10
Высота съемки (м)	185	260	370
Продольное перекрытие (%)	78	72	68
Поперечное перекрытие (%)	58	48	42
Интервал снимки (сек)	2,6	4,8	7,5
Количество маршрутов	10	7	5
Количество изображений	400	180	74
СКО в плане (см)	1,1	1,8	1,6
СКО в высоте (см)	1,5	1,8	2,3

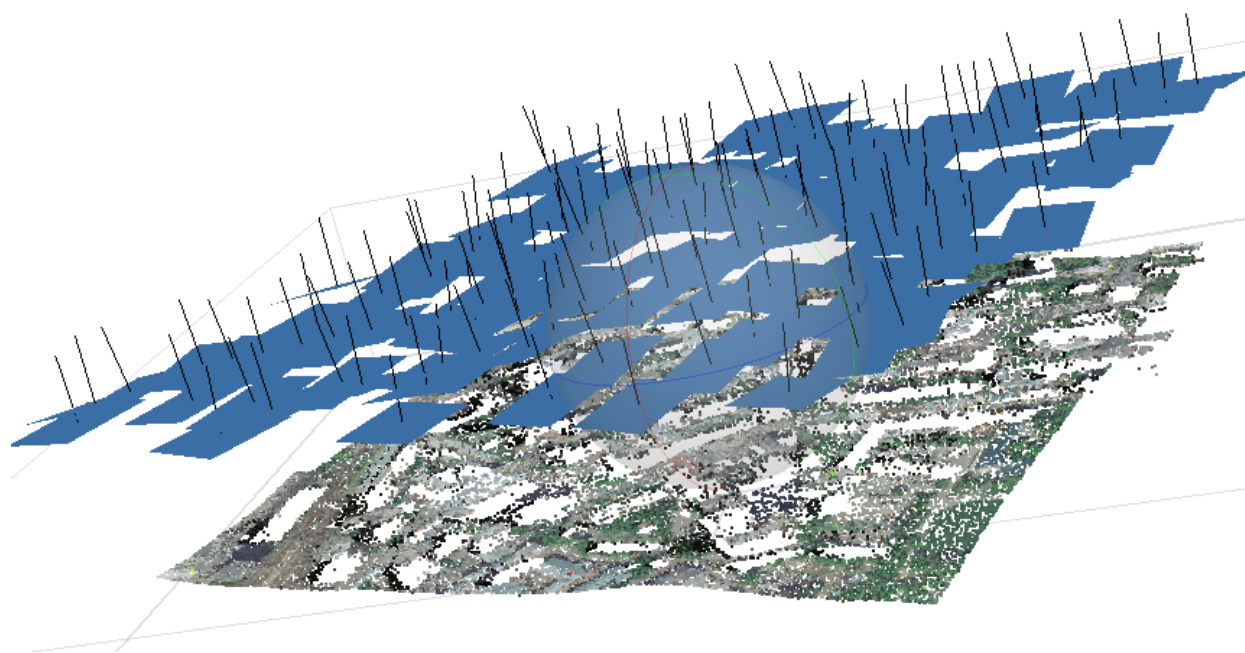


Рисунок 33 – Вид в ПО Metashape результата моделирования АФС в реальных условиях с введенными погрешностями в определениях ЭВО

На графиках рисунков 34, 35 представлены результаты оценок погрешностей, полученных на контрольных точках для трех вариантов съемки. Здесь представ-

лены погрешности конечной модели в плане и по высоте на контрольных точках для различных высот фотографирования.

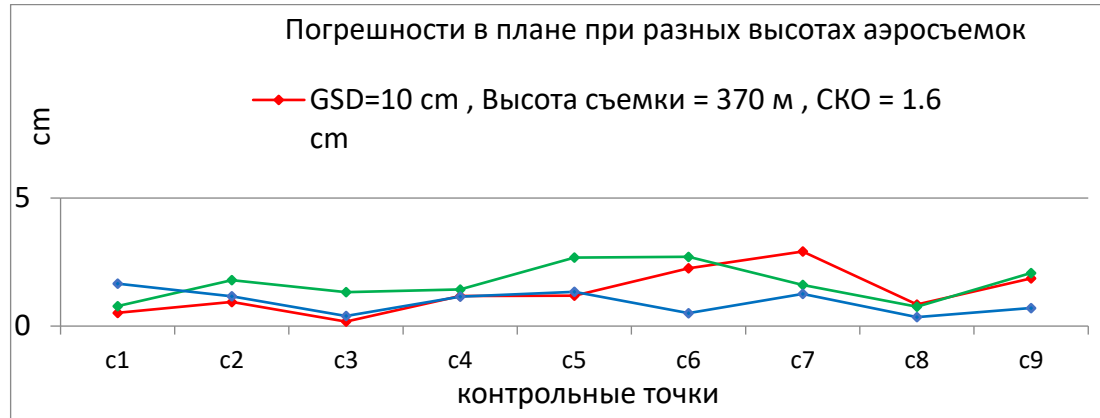


Рисунок 34 – Погрешности в плане, в построении модели, вызванные случайными погрешностями положений точек фотографирования с СКО для X, Y, Z, равным ± 5 м; и для углов наклона снимков α , ω , к СКО, равным ± 5 градусам

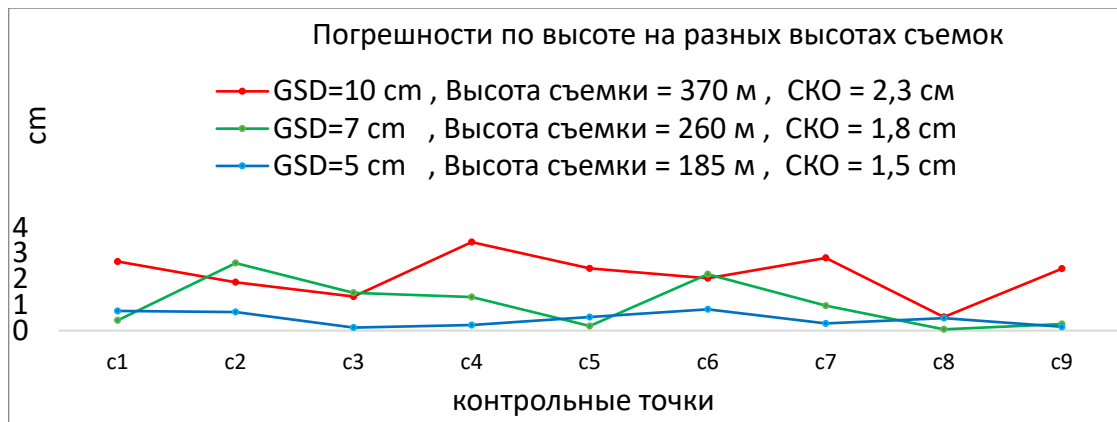


Рисунок 35 – Погрешности по высоте, в построении модели, вызванные случайными погрешностями положению точек фотографирования с СКО для X, Y, Z, равным ± 5 м; и для углов наклона снимков α , ω , к СКО равным ± 5 градусам

Из данных, приведенных на рисунках, видно, что при наличии опорных точек ошибки на контрольных точках модели достаточно малы. Из этого следует тривиальный вывод, что корректное расположение опорных точек в плане и по высоте, по существу, определяет точность конечной модели.

4.2.2 Исследование вариантов создания ЦММ по данным АФС при отсутствии наземных опорных точек геодезической сети

В следующем эксперименте проведено исследование вариантов создания ЦММ (ЦМР) по данным АФС при отсутствии опорных точек на Земле, при фиксации координат центров фотографирования и углов наклона снимков спутниковой и инерциальной навигационной аппаратурой на борту БВС.

В качестве контрольных точек на первичной модели территории съемок были использованы хорошо выраженные контуры на крышах зданий и поверхности земли с учетом их равномерного расположение на участке съемки. Общее количество контрольных точек равно девяти. Точки выбирались также на дорожной разметке и, главное, на разных уровнях в пределах максимальной высоты строений.

Рисунки 36, 37 показывают ошибки определения координат на контрольных точках в плане и по высоте, вызванные случайными вариациями линейных и угловых элементов внешнего ориентирования снимков в процессе виртуальной аэрофотосъемки. Так же, как и в предыдущем эксперименте, имитационная аэрофотосъемка проводилась с трех высот (370, 260 и 185 м) с соответствующим падением пространственного разрешения на снимках за счет увеличения размеров проекции пикселя на поверхности.

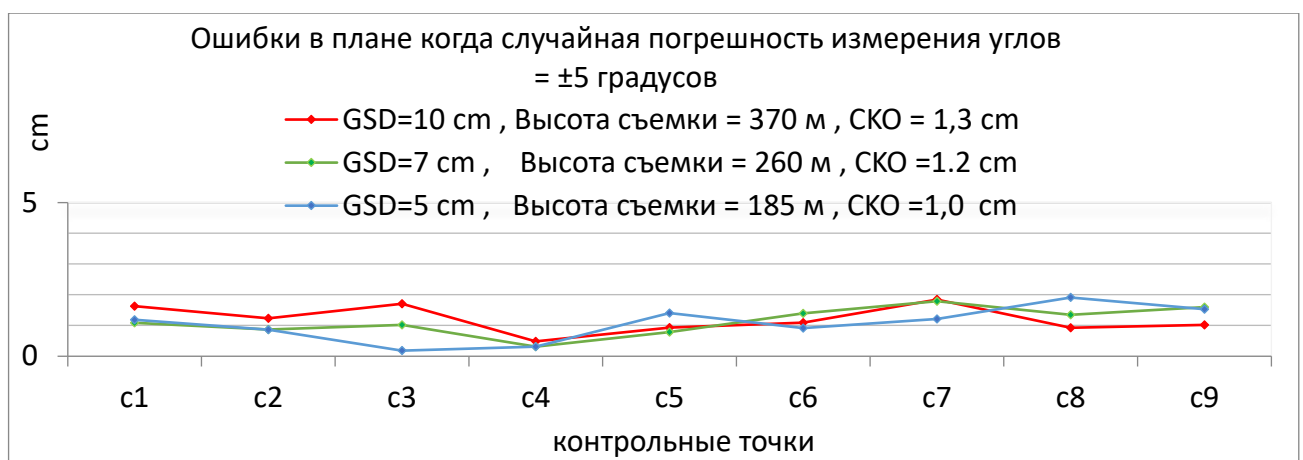


Рисунок 36 – Ошибки на контрольных точках ЦММ в плане при введении погрешностей угловых наклона снимков до ± 5 градусов

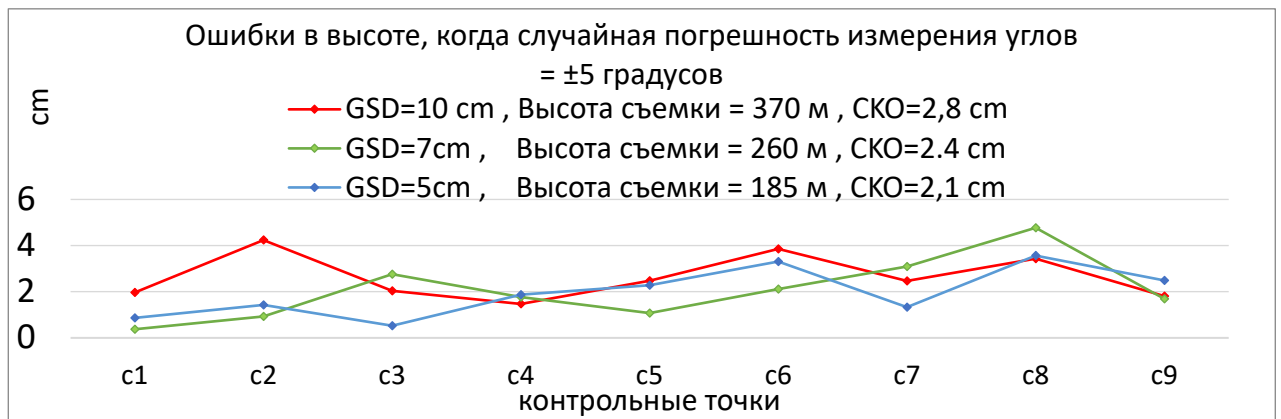


Рисунок 37 – Ошибки на контрольных точках ЦММ по высоте при введении погрешностей определения углов наклона снимков до ± 5 градусов

Нетрудно видеть, что значительные изменения углов наклона снимков (при отсутствие опорных точек), по существу, не влияют на точность результирующих цифровых моделей, а ошибки, возникающие из-за SKO в углах ± 5 градусов, возникают при условии соблюдения минимального процента значения прикрытия снимков (не менее 55 %), чтобы на изображениях не возникало пропусков или дырок.

Погрешности в определении координат центров фотографирования, поскольку они используются в качестве воздушных опорных точек, существенно влияют на точность ЦММ. При этом величины погрешностей создаваемой по снимкам модели прямо пропорциональны погрешностям определения координат точек фотографирования.

На рисунках 38–42, видно, что пропорциональное увеличение погрешностей на контрольных точках происходит с увеличением диапазона погрешности определения координат центров фотографирования.

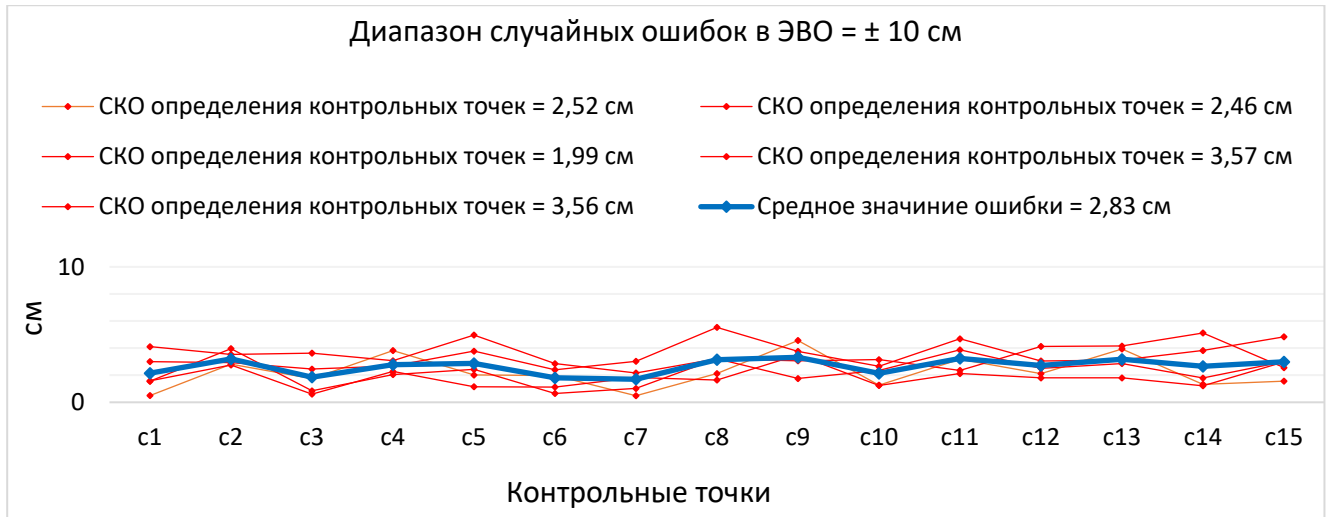


Рисунок 38 – Ошибки в построении модели по координатам контрольных точек в результате вариации координат линейных внешних элементов ориентирования в диапазоне ± 10 см с отсутствием наземных опорных точек (пять экспериментов красным цветом и суммарное синим)

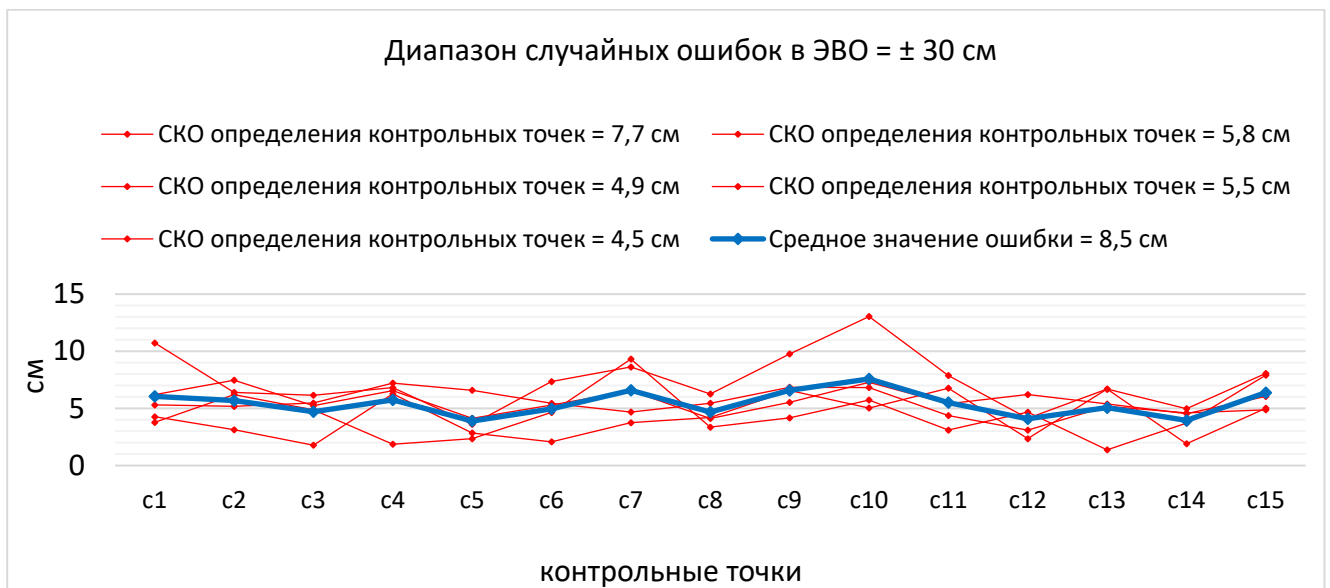


Рисунок 39 – Ошибки в построении модели по координатам контрольных точек в результате вариации координат линейных внешних элементов ориентирования в диапазоне ± 30 см с отсутствием наземных опорных точек (пять экспериментов красным цветом и суммарное синим)

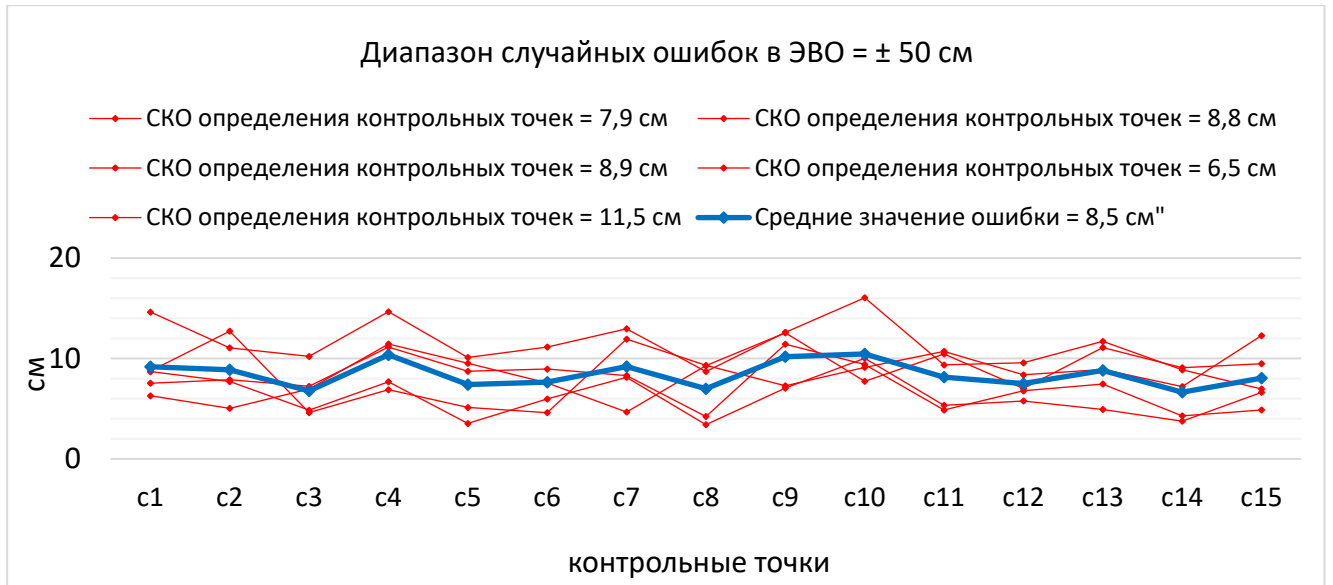


Рисунок 40 – Ошибки в построении модели по координатам контрольных точек в результате вариации координат линейных внешних элементов ориентирования в диапазоне ± 50 см с отсутствием наземных опорных точек (пять экспериментов красным цветом и суммарное синим)

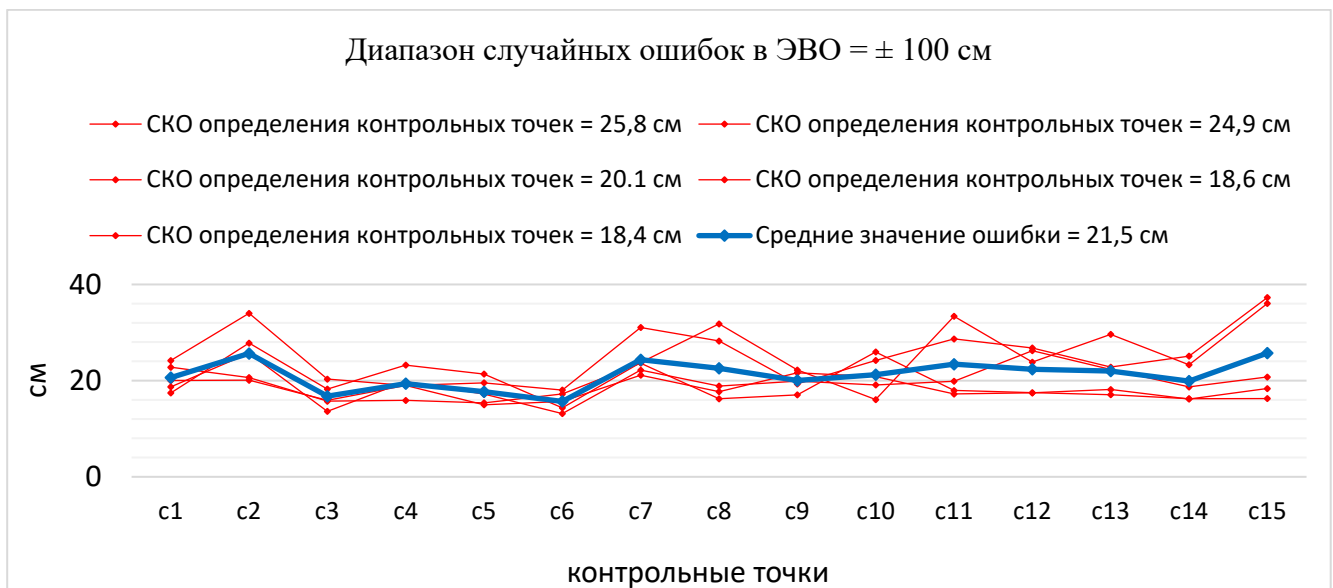


Рисунок 41 – Ошибки в построении модели по координатам контрольных точек в результате вариации координат линейных внешних элементов ориентирования в диапазоне ± 100 см с отсутствием наземных опорных точек (пять экспериментов красным цветом и суммарное синим)

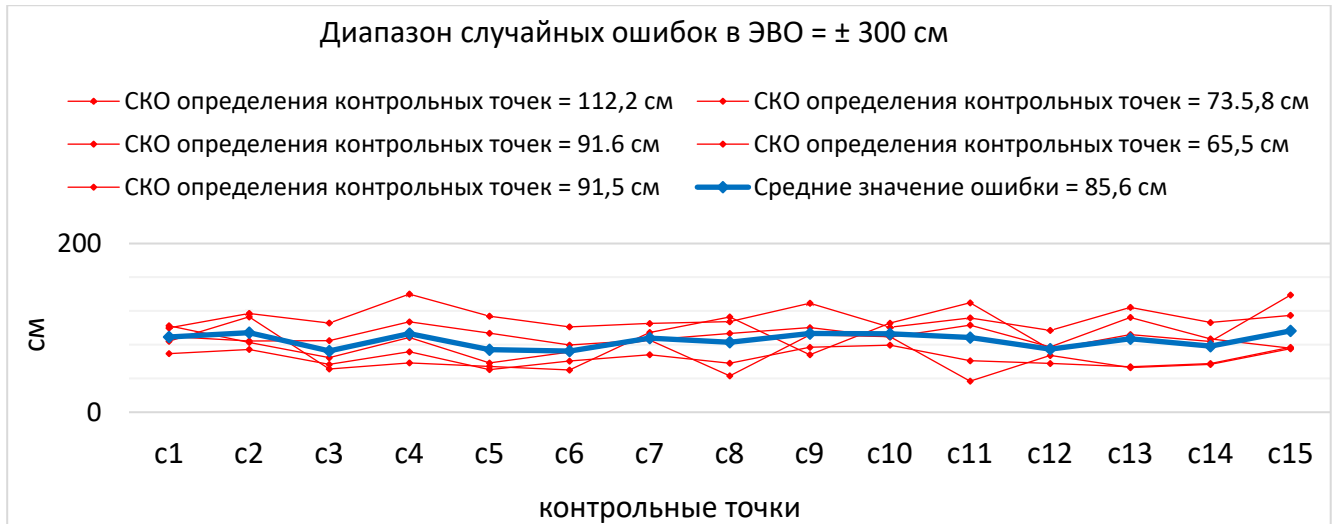


Рисунок 42 – Ошибки в построении модели по координатам контрольных точек в результате вариации координат линейных внешних элементов ориентирования в диапазоне ± 300 см с отсутствием наземных опорных точек (пять экспериментов красным цветом и суммарное синим)

Рисунок 43 является результатом предыдущих экспериментов, он показывает увеличение ошибок определения координат контрольных точек с увеличением погрешностей определения центров координат снимков.

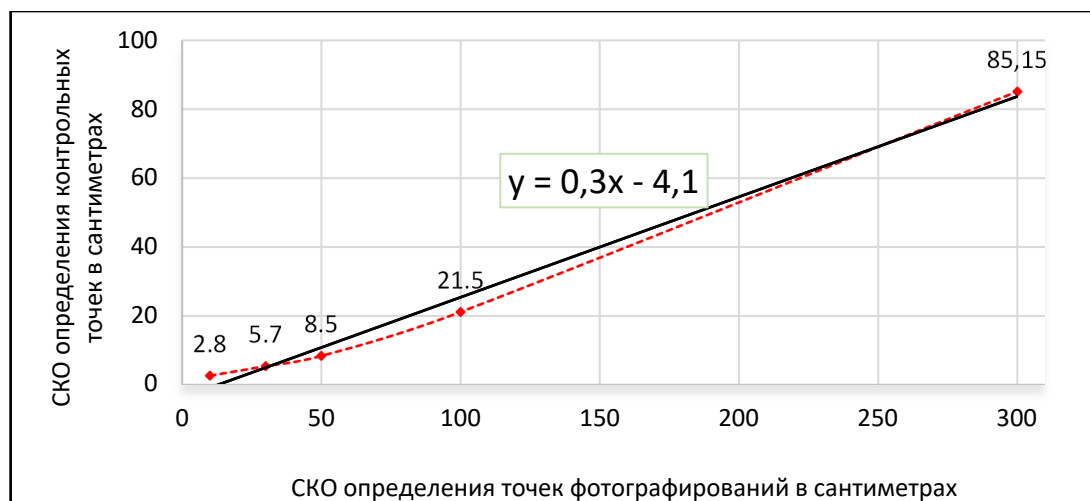


Рисунок 43 – Результат пяти экспериментов с пятью диапазонами ошибок показывают влияние вариации навигационных параметров на результат создания цифровых моделей местности

Соотношение между этим увеличением во многих проведенных экспериментах составляет около трети, то есть, значение ошибки определения точности цифровой модели составляет около трети значения ошибки определения координат центров проекций изображений.

При анализе результатов, приведенных на рисунок 43, было выявлено несоответствие между точностями координат центров фотографирования, использующихся в качестве опорных данных и координатами точек модели, при внесении случайных ошибок в координаты линейных ЭВО снимков.

Была также выявлена необычная для данного случая установка самой обрабатывающей программой значения точности (точность камер) координат центров фотографирования 10 м.

После установки нового значения степени доверия к координатам центров фотографирования в порядке значений СКО, введенные в ЭВО, ошибки определения координат контрольных точек увеличивались до 40 % (рисунок 44).

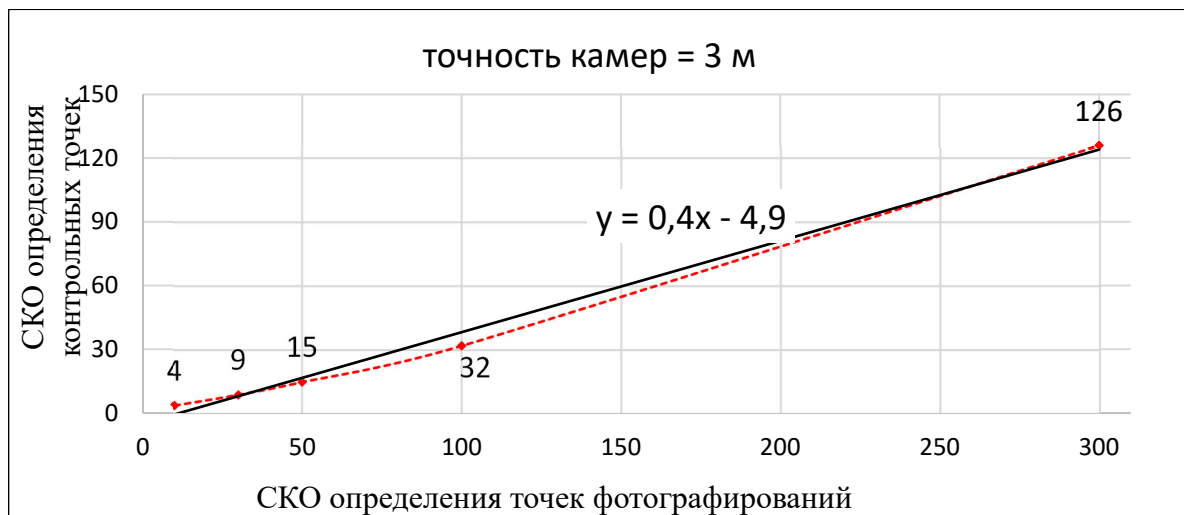


Рисунок 44 – Результат переобработки данных с точностью камер 3 м

Проводился эксперимент при самом предельном значении (точность камер – 0,001 м), ошибки определения координат контрольных точек составили такое же значение, которое составили как случайная погрешность (рисунок 45).

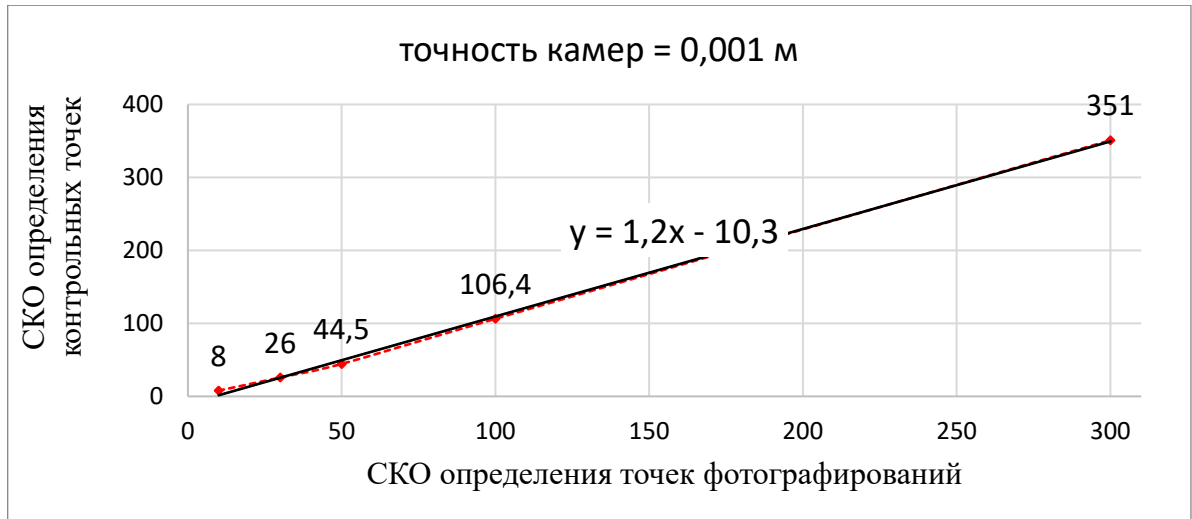


Рисунок 45 – Результат переобработки данных с точностью камер 1 мм

Поэтому, чтобы получить точные результаты, нужно установить параметры программы, которая будет обрабатывать аэрофотоснимки в соответствии с точностью оборудования, используемого при аэрофототопографической съемке.

Следует отметить, что помимо внесения случайных ошибок, были эксперименты при введении фиксированных ошибок, в результате чего погрешность определения координат контрольных точек была больше, чем погрешность, вносимая в центры изображений.

В данном случае, появляется перекрытие (продольное и поперечное): чем больше снимков, покрывающих один и тот же пиксель на местности, тем больше ключевых точек (точек связи), на основе которых производятся измерения и аппроксимации определения погрешности центров фотографирований, что отражается на точности создания цифровой модели. В связи с этим были проведены эксперименты через программы Agisoft и Pix4D, которые показали явное снижение точности цифровой модели, определенной по контрольным точкам, с уменьшением процента наложения снимков.

4.3 Сравнение погрешностей построения создаваемой модели при имитационном моделировании с результатами реальной аэро съемки одного и того же района

Предыдущие эксперименты по моделированию аэрофотосъемки показали точность и логичность результатов, соизмеримых с реальными экспериментами по аэрофотосъемке и фотограмметрической обработке.

Однако необходимо было подтвердить достоверность имитационного моделирования в сравнении с реальной аэрофотосъемкой того же района и условий съемки.

Далее представляется сравнение двух экспериментов аэрофотосъемки (одна реальная, а другая – компьютерное моделирование с помощью программы Blender) для сельскохозяйственной территории площадью около одного квадратного километра, и перепадом высот порядка 40 м (рисунок 46).



Рисунок 46 – Результат обработки данных аэрофототопографической съемки (слева реальная, справа имитационная)

Оба эксперимента были сделаны беспилотным аппаратом (Фантом 4 про). Результаты сравнения представлены на рисунках 47, 48 и в приложениях А, Б.

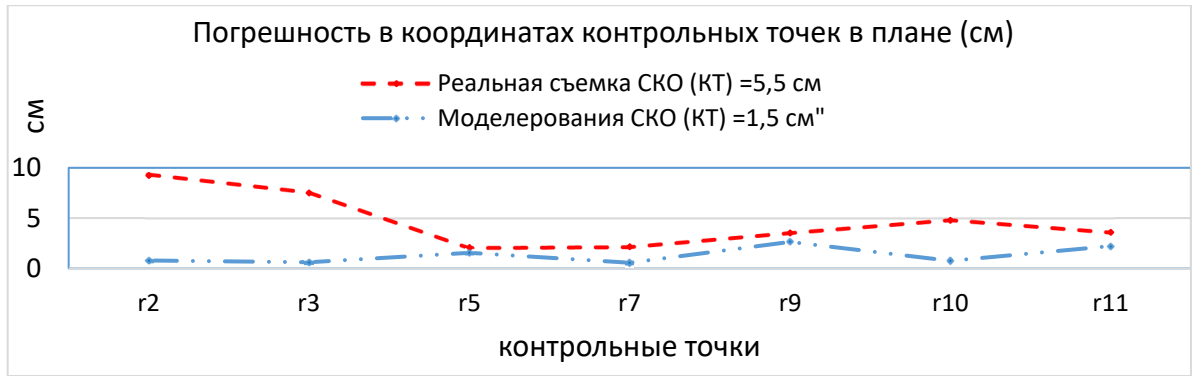


Рисунок 47 – Погрешность координат контрольных точек в результате обработки реальной и моделированной аэросъемки (в плане)

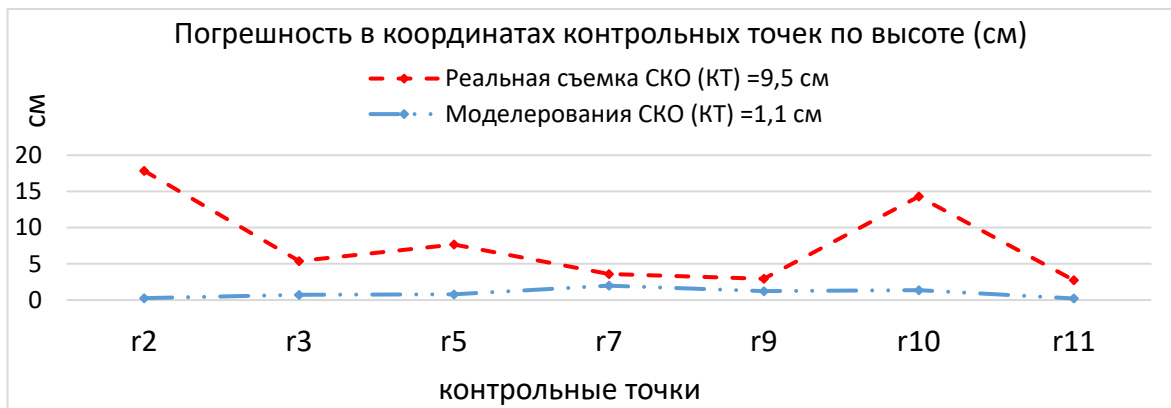


Рисунок 48 – Погрешность координат контрольных точек в результате обработки реальной и моделированной аэросъемки (по высоте)

Из рисунков 47, 48 видно, что разница между результатами реальной и моделированной аэрофотосъемки невелика, а точность всегда в пользу моделирования, так как при моделировании координат геодезических точек, используемых в качестве опорных точек, нет никаких статистических или случайных ошибок.

4.4 Исследование вариантов создания ЦМР по результатам

ВЛС и АФС

Как было рассмотрено ранее, то, что было смоделировано как съемка ВЛС, соответствует характеристикам российского сканера АГМ-МС1, который установлен на БВС (Геоскан 401) с фотокамерой для проведения ВЛС совместно с аэрофотосъемкой.

При высоте съемки 185 м плотность точек лазерных отражений составила более 10 млн на обследуемую площадь (примерно 25 точек на квадратный метр) – то есть расстояние между точками составило около 20 см, что существенно меньше плотности точек, полученных аэрофототопографической съемкой (5 см) (рисунок 49).

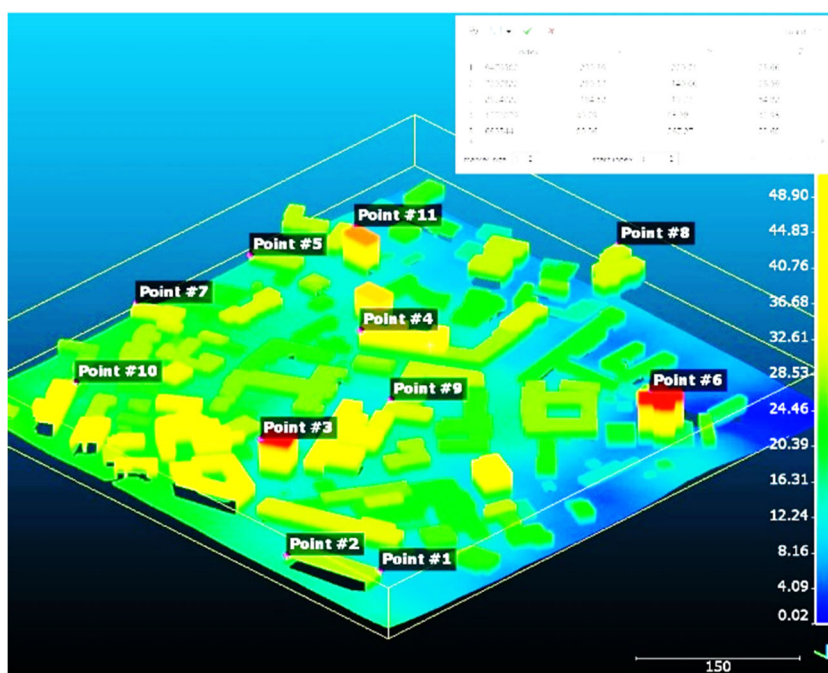


Рисунок 49 – Точки, между которыми было сравнение дальностей с эталонной моделью

Оценку точности полученной модели производили по разности двойных измерений расстояний (диагональные) между точками на первичной модели, которая считается эталонной, и теми же точками на модели, полученной по данным лазерно-локационной съемки.

Оценка точности измерений по способу разности двойных измерений [118]:

$$\Delta d_i = dL_i - dS_i, \quad (19)$$

где dL_i – измерения расстояний в модели, полученной лазерным сканером;

dS_i – измерения расстояний в эталонной модели (точные расстояния).

Для оценки точности используется формула Гаусса, средняя квадратическая ошибка получается:

$$m_d = \sqrt{\frac{\Delta d^2}{n}}, \quad (20)$$

где n – число двойных разностей.

На рисунке 50 представлены разности в измерениях дальностей (лазерным сканером и эталонной модели).

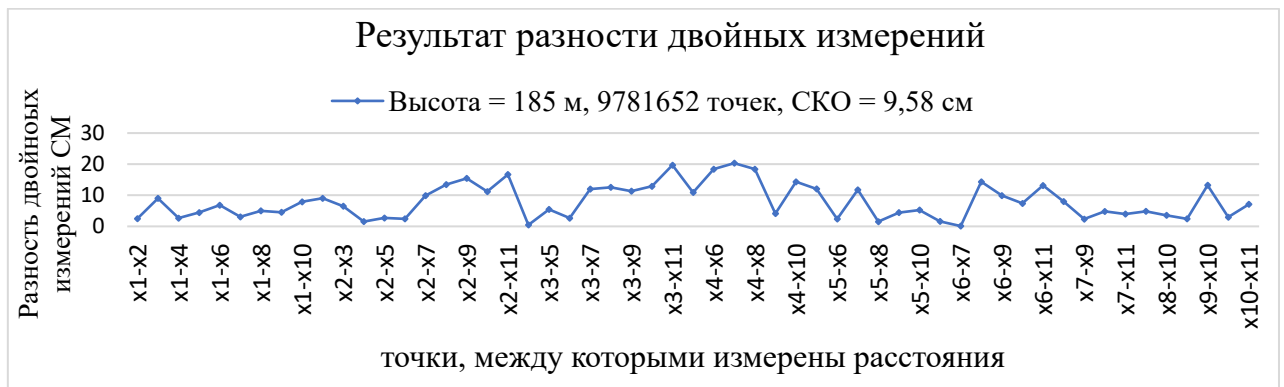


Рисунок 50 – Разности расстояний контрольных точек между эталонной и производной моделью от высоты 185 м

Согласно рисунку 47 это пропорционально максимальной погрешности измерений расстояния между точками $r1$ по $r11$, где измерение производилось между каждой из этих точек и сравнивалось с реальными значениями в исходной модели. Результат был представлен на рисунке 48.

4.4.1 Влияние высоты на окончательные модели (влияние плотности ТЛО)

При проведении моделирования лазерного сканирования съемки с высоты БВС от 90 м, результаты были более точными с увеличением плотности точек на квадратный метр (около 60 точек), то есть расстояние между точками составляет

около 13 см, что является приблизительно максимальным значением разницы измерений между точками и считается дополнительным показателем надежности и точности результатов имитационного моделирования в программе Blender. На рисунке 51 показан результат моделирования сканирования лазером с высоты 90 м.

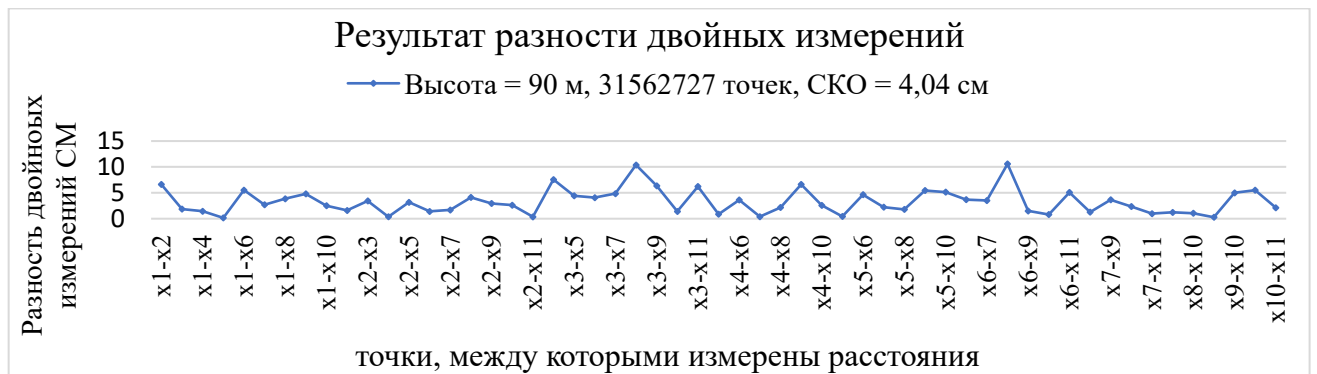


Рисунок 51 – Разности расстояний контрольных точек между эталонной и производной моделью от высоты 90 м

4.4.2 Сравнение точности с моделями по результатам АФС

В заключение следует отметить, что время моделирования процесса создания ЦММ по результатам лазерно-локационной съемки намного меньше времени моделирования ЦММ по данным аэрофотосъемки в программе Blender. Но передача и обработка данных в случае применения лазерного сканера в программе CloudCompare является менее сложным процессом, чем в случае программ аэрофотосъемки, и быстрее, хотя количество точек в облаке точек лазерного сканера примерно в десять раз больше, чем у облака точек, полученного в результате обработки аэрофотоснимков той же местности. При этом дешифрируемость и дискриминация объектов остается лучше в аэрофототопографической съемке, и самым главным ее преимуществом является разница в цене пока в пользу аэрофотосъемки.

Две модели облаков точек одного участка на рисунке 52.

Первая модель выполнена на основе аэрофотосъемки, а вторая – на основе лазерного сканера.

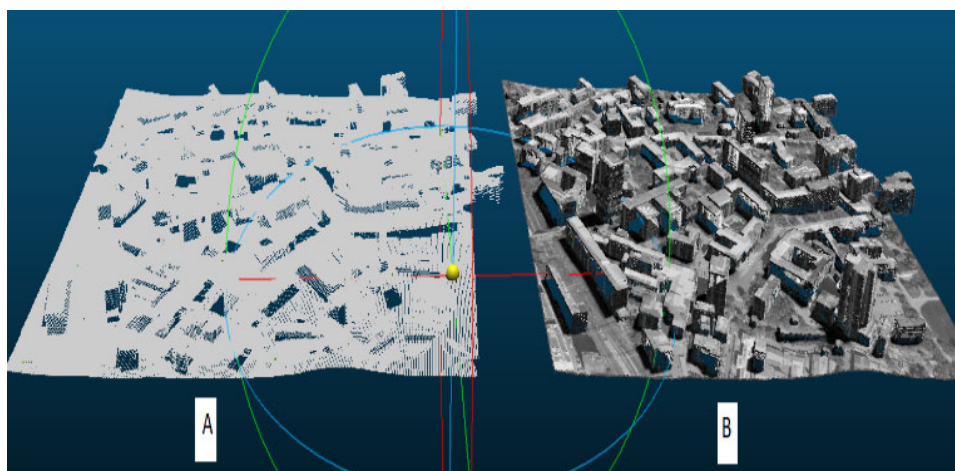


Рисунок 52 – Облака точек, сделанных с помощью: А) лазерного сканера, В) аэрофотосъемки

4.5 Сгущение геодезической сети четвертого класса для создания опорных и контрольных точек для проведения АФС

Учитывая, что суммарная погрешность измерения координат на контрольных точках является результатом погрешности аэрофототопографической съемки, где свой вклад приносят погрешности определений опорных точек, необходимо использовать самые современные методы полевых измерений.

При создании опорных и контрольных точек в качестве съемочного обоснования стереотопографической съемки местности применяются несколько геодезических методов, наиболее приемлемыми из которых являются спутниковые определения. Но как было упомянуто в разделе 1, отсутствие контрольно-корректирующих станций в Сирии и глушение самого сигнала GNSS делает их использование затруднительным и не обеспечивающим требуемой точности. Поэтому мы планируем использовать ранее существовавшие геодезические пункты, которые не подвергались диверсиям, и которые были установлены сирийскими геодезистами с помощью российских специалистов в 1970-е гг. и контролировались и корректировались до 2011 г. с целью создания опорной сети точек для аэрофотограмметрических работ.

От этих пунктов к съемочным участкам прокладывается сеть полигонометрических ходов, обеспечивающих координирование запланированных контрольных и опорных точек, которые при необходимости маркируются для уверенного распознавания их на аэрофотоснимках. Ниже мы приводим пример из работ автора сгущения съемочного обоснования посредством развития сети четвертого класса в жилом районе на окраине г. Дамаск в 2018 г. (рисунок 53, приложение Г).

Геодезическими точками четвертого класса являются S5, S6 и S527.

На основе этих пунктов в рабочей области были проложены три хода:

- первый ход начинается с известной точки S5 через точки A8, B8, C8 и замыкается в точке S6;
- второй начинается с S5 через точки A18, B18, C18, D18, E18, J7, K7 и замыкается в точке S527;
- третий (начиная с точки S527 через точки A9, B9, C9, D9, E9, F9, G9, H9, I9 и закрывается в точке S6).

Размеры участка сгущения сети порядка 900 x 400 м (около 36 га), что аналогично площади участка, смоделированного в Blender (корпус МИИГАиК), площадь которого составляет 32 га.

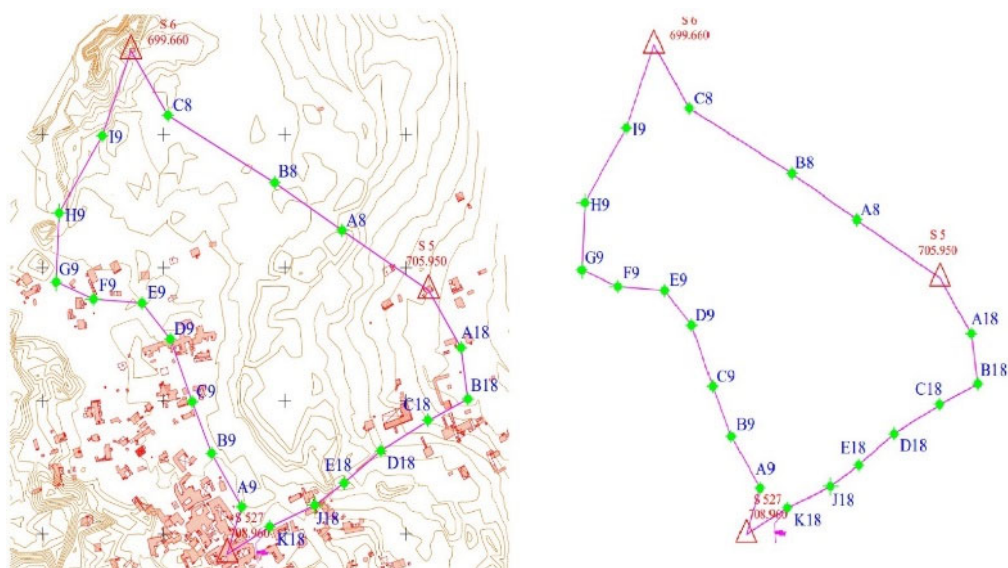


Рисунок 53 – Сгущение точек съемочного обоснования сетью полигонометрических ходов

С помощью одной из геодезических программ для уравнивания (STAR*NET) (рисунок 54) вычисляются координаты и погрешности в каждой из контрольных и опорных точек.

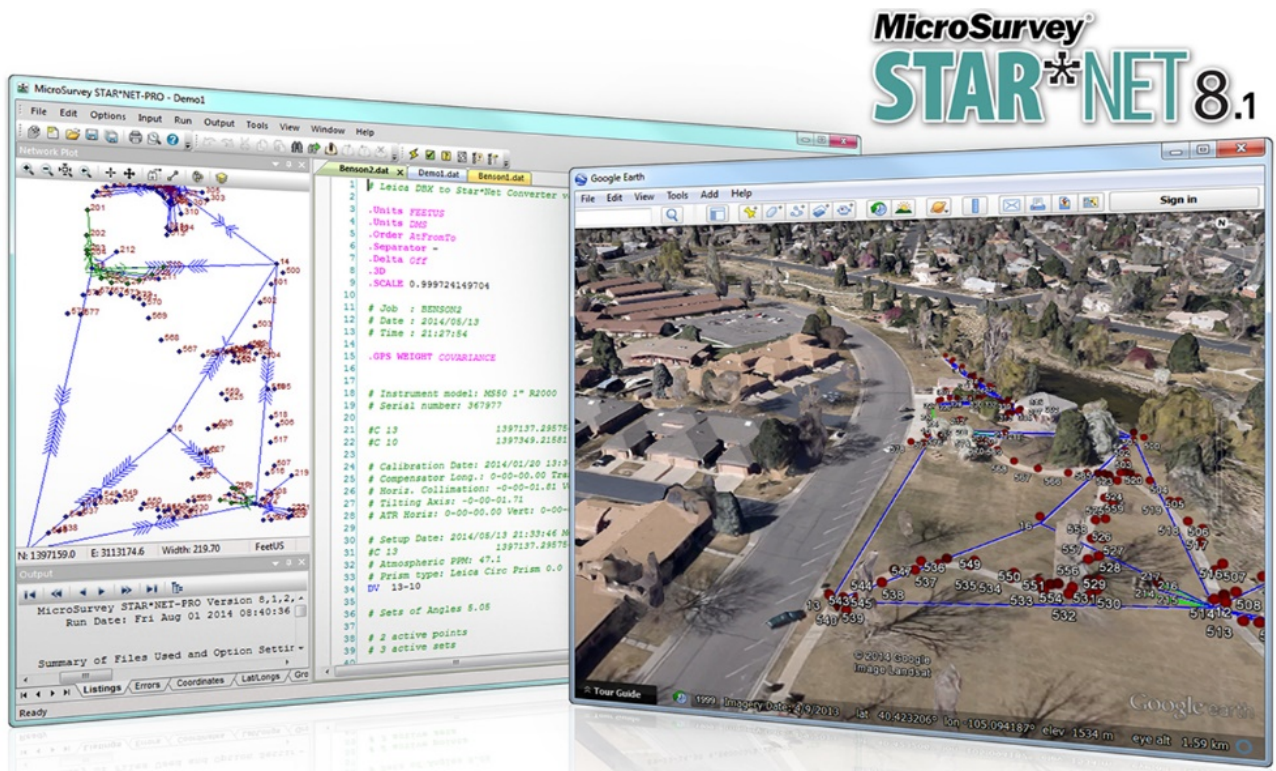


Рисунок 54 – Интерфейс программы STAR*NET

Программное обеспечение MicroSurvey STAR*NET является комплексом инструментов для уравнивания нивелирных, планово-высотных и плановых геодезических сетей по методу наименьших квадратов.

Программа MicroSurvey STAR*NET дает возможность уравнивать сети, содержащие до 10 000 пунктов, включая комбинированные измерения, выполненные с помощью ГНСС-приемников и тахеометров.

Среди ключевых характеристик MicroSurvey STAR*NET – простой интерфейс, быстрое обнаружение ошибок и открытый формат данных, высокая точность уравнивания (рисунок 55).

The screenshot shows the STAR*NET software interface. The main window displays 'Adjusted Observations and Residuals' for 'Adjusted Angle Observations (DMS)' and 'Adjusted Distance Observations (FeetUS)'. A 'Listing Index Tree' window is open on the right, showing a tree structure of the report content.

At	From	To	Angle	Residual	StdErr	StdRes
1	6	2	99-47-25.73	0-00-00.73	3.00	
2	1	3	115-10-00.58	0-00-00.58	3.00	
3	2	4	94-51-52.62	-0-00-00.38	3.00	
4	3	5	216-46-08.95	-0-00-00.05	3.00	
5	4	6	106-26-42.45	0-00-00.45	3.00	
6	5	1	86-57-49.67	0-00-00.67	3.00	
3	2	7	225-47-02.80	0-00-00.80	3.00	
7	3	8	97-31-36.84	0-00-00.84	3.00	
8	7	9	115-14-56.80	-0-00-00.20	3.00	
9	8	5	83-45-27.60	-0-00-00.40	3.00	
9	8	10	156-15-43.77	-0-00-00.23	3.00	
10	9	6	106-12-31.68	-0-00-00.32	3.00	
6	10	1	164-00-41.79	-0-00-00.21	3.00	

From	To	Distance	Residual	StdErr	StdRes
1	2	205.0400	0.0100	0.0210	0.5
2	3	134.1879	-0.0021	0.0207	0.1
3	4	105.4495	0.0095	0.0205	0.5

Рисунок 55 – Уравнение угловых измерений в программе STAR*NET

Отметим несколько важных особенностей программного комплекса MicroSurvey STAR*NET:

а) уравнивание сетей, состоящих из традиционных наблюдений, векторов GNSS и нивелирных ходов. В STAR*NET можно объединять съемки, выполненные на одном объекте, но при различных условиях. Часть съемки можно делать летом, часть – зимой. STAR*NET самостоятельно определяет необходимые поправки;

б) поддержка конверторов из различных форматов, включая TDS, Carlson, TSC (Trimble), SMI, а также множество форматов включая Topcon и Leica;

в) возможность создавать входной файл для STAR*NET в формате DAT с помощью различных сторонних приложений. Записи в нем следуют построчно и могут быть легко отредактированы с использованием любого текстового редактора. При этом ввод исходных данных можно осуществлять в любом порядке.

Исключение из исходного файла ошибочных измерений и выполнение повторного уравнивания.

Доступные для просмотра значения статистического анализа – суммы квадратов, ошибок единиц и хи-квадрата – позволяют корректировать исходные данные для достижения наилучших результатов. Возможно гибкое создание отчетов.

Обнаружение грубых ошибок в измерениях. Настройка проектов в соответствии с реальными условиями.

Задание веса различным измерениям: более точным пунктам можно придавать больший вес, а пункты с малой точностью можно помечать как свободные измерения, которые могут быть скорректированы в ходе уравнивания.

Возможно графическое отображение уравненной сети с эллипсами ошибок уравненных пунктов и их взаимного расположения [129] (рисунок 56).

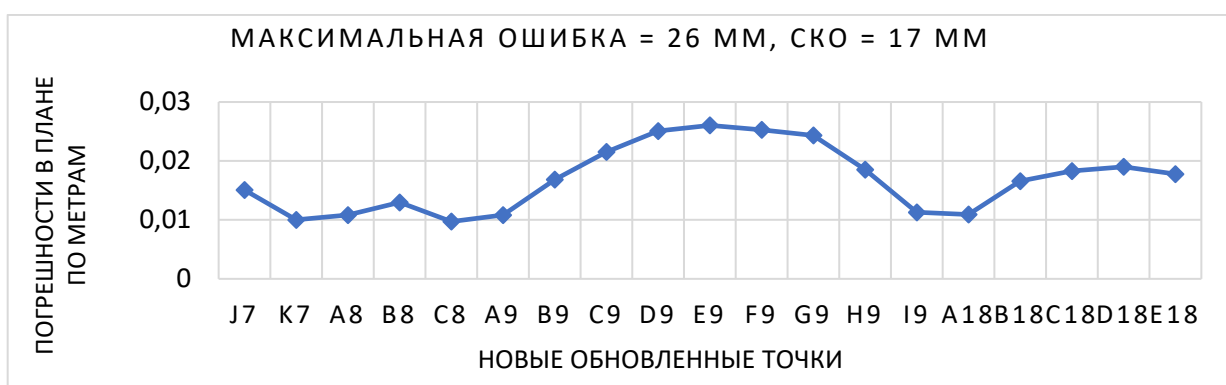


Рисунок 56 – Максимальная и средняя погрешность определения координат точек сгущенной локальной сети

Эти новые точки, созданные методом полигонометрического хода, имеют два применения:

- 1 – для масштабирования и привязки фотограмметрической модели местности к геодезической системе координат;
- 2 – использование наземных методов топогеодезических съемках местности в качестве точек планово-высотного съемочного обоснования.

В настоящей работе и при имитационном моделировании опорные и контрольные точки считались заданными с точностью, представленной в приведенном примере результатов реальных геодезических работ.

Выводы по четвертому разделу

Из таблицы, графиков и анализа результатов находим следующие.

1 При создании цифровых моделей с опорными точками погрешность в контрольных точках практически отсутствует при изменении значений навигационных параметров (координат, углов и высоты) с учетом того, что введенные ошибки превышают значения в нормативных документах почти вдвое больше указанных значений.

2 При использовании координатного центра изображений в качестве опорной точки, но без использования наземных опорных точек при условии, что GPS и навигационная система вместе дают точные координаты центра изображения в идеальном случае без внесения ошибок, у нас будет точная модель.

3 При вводе ошибок в координатах и углах точках фотографирований, ошибки появлялись в моделях и были пропорциональны ошибкам, введенным в координаты ТФ.

4 Что касается ошибок углов, то они не повлияли на результирующие модели, с внесением ошибок углового положения на величину 5° .

5 При сгущении ранней геодезической сети максимальная погрешность находилась в допустимых пределах для получения точности измерений в пределах, допускаемых нормативными документами, и в диапазоне, установленном нами в начале работы (менее 3 см в координаты новых точек).

Таким образом, можно сказать, что указанный геодезический способ определения координат наземных опорных точек, с использованием уже существующих геодезических точек позволяет достичь точности построения цифровых моделей не более 5 см, которая находится в допустимых пределах требуемых значений.

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 летно-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 обес-

печения съемки. Предлагается технологическая схема экспериментальных имитационных съемок, в которой предусмотрены исследования влияния вариаций навигационных параметров беспилотной съемочной системы на точность создания цифровых 2D-3D документов о местности. Таким образом реализуется основная задача работы – разработка методики оценки влияния вариаций навигационных параметров съемочной 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 аэрофото-

съемочных 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 технологиями летно-съемочных 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.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АФС – аэрофотосъемка

БВС – беспилотное воздушное судно

ВЛС – воздушный лазерный сканер

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ЛС – лазерный сканер

НЛС – наземное лазерное сканирование

ПВО – планово-высотное обоснование съемочных работ

ПО – программное обеспечение

ППО – прикладное программное обеспечение

СК – система координат

СКП – СКО – средняя квадратическая погрешность (ошибка)

ТЛО – точки лазерных отражений

ТФ – точка фотографирования

ЦММ – цифровая модель местности

ЦМП – цифровая модель поверхности

ЦМР – цифровая модель рельефа

ЦТК – цифровая топографическая карта

ЦФС – цифровая фотограмметрическая станция

ЭВО – элементы внешнего ориентирования

GPS – Global positioning system

IMU – inertial measurement unit

OSM – Open Street Map

RTK – real time kinematic

TIN – Triangulated Irregular Network

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ОСТ 68-3.1–98. Стандарт отрасли «Карты цифровые топографические. Общие требования». – URL: <https://ggspb.org/normativnaya-baza/files/ost-68-31-98-karty-tsifrovye-topograficheskie-obshchie-trebovaniia.pdf>. – Текст : электронный.

2 Кудж, С. А. Геоинформатика / С. А. Кудж, В. Я. Цветков. – Москва : ООО «МАКС Пресс», 2019. – 224 с. – ISBN 978-5-317-06203-3. – Текст : непосредственный.

3 Журкин, И. Г. Цифровое моделирование измерительных трехмерных видеосцен / И. Г. Журкин, Т. А. Хлебникова. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 246 с. – Текст : непосредственный.

4 Моисеенко, А. А. Цифровые модели как средства описания рельефа и опыт их использования / А. А. Моисеенко, С. Н. Ананьев, Е. В. Дужик. – Текст : непосредственный // ГИС-обозрение. – 2000. – № 3–4. – С. 10–16.

5 Методика построения цифровой модели рельефа. – URL: <http://do.gendocs.ru/docs/index-318367.html?page=3>. – Текст : электронный.

6 Хромых, В. В. Цифровые модели рельефа : учебное пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых. – Томск : Изд-во «ТМЛ–Пресс», 2007. – 178 с. – Текст : непосредственный.

7 Мирмахмудов, Э. Р. О точности исходных данных для построения цифровой модели рельефа / Э. Р. Мирмахмудов, Л. Х. Гулямова, О. Г. Щукина. – Текст : непосредственный // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика : Сборник научных статей по материалам III Международной научно-практической конференции, Уфа, 03 июля 2020 года. – Уфа : ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2020. – С. 76–86.

8 Новаковский, Б. А. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей / Б. А. Новаковский, С. В. Прасолов, А. И. Прасолова. – Москва : Научный мир, 2003. – 64 с. – Текст : непосредственный.

9 Галеев, Э. И. Роль картографии для точного земледелия / Э. И. Галеев, М. Г. Ишбулатов. – Текст : непосредственный // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2 (50). – С. 21–26. – DOI 10.31563/1684-7628-2019-50-2-21-26.

10 Новаковский, Б. А. Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа : учебное пособие / Б. А. Новаковский, Р. В. Пермяков. – Москва : Московский государственный университет геодезии и картографии, 2019. – 175 с. – ISBN 978-5-91188-075-0. – Текст : непосредственный.

11 Ершова, Н. В. Подготовка ГИС данных: учебно-методическое пособие / Н. В. Ершова, Г. П. Фролова. – Бишкек : КРСУ, 2015. – 44 с. – Текст : непосредственный.

12 Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. Условные знаки для топографических планов масштабов 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000, 1 : 500. – Москва : ФГУП «Картгеоцентр», 1973. – 144 с. – Текст : непосредственный.

13 Мусин, О. Р. Цифровые модели рельефа континуальных и дискретных географических полей / О. Р. Мусин, С. Н. Сербенюк ; под ред. К. А. Салищева. – Текст : непосредственный // Банки географических данных для тематического картографирования. – Москва : МГУ, 1987. – С. 156–170.

14 Убаева, А. С. Создание топографических планов масштаба 1 : 1 000 по данным аэрофотосъемки на территории месторождения / А. С. Убаева. – Текст : непосредственный // Наука и образование сегодня. – 2017. – № 5 (16). – С. 111–114.

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

16 Зотов, Р. В., Эффективность двухмаршрутной аэрофотосъемки линейных объектов северных территорий / Р. В. Зотов, Ю. В. Столбов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (114). – С. 235–339.

17 Журкин, И. Г. Геоинформационные системы / И. Г. Журкин, С. В. Шайтура. – Москва : КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. – 272 с. – Текст : непосредственный.

18 Лобанов, А. Н. Автоматизация фотограмметрических процессов / А. Н. Лобанов, И. Г. Журкин. – Москва : Недра, 1980. – 240 с. – Текст : непосредственный.

19 Ковин, Р. В. Цифровые модели рельефов в среде ГИС MapInfo Professional / Р. В. Ковин, Н. Г. Марков. – Текст : непосредственный // Геоинформатика 2000. – Томск, 2000. – С. 96–101.

20 Скворцов, А. В. Геоинформатика / А. В. Скворцов. – Москва : Изд-во Томск. ун-та, 2005. – 263 с. – Текст : непосредственный.

21 Мусин, О. Р. Цифровые модели для ГИС / О. Р. Мусин. – Текст : непосредственный // Информ. бюл. ГИС Ассоциации. – 1998. – № 4 (16). – С. 30–32; № 5 (17). – С. 28–29.

22 Миронова, Ю. Н. Геоинформационные системы / Ю. Н. Миронова. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – № 03 (62), Ч. I. – С. 63–65.

23 Миронова, Ю. Н. Классификация геоинформационных систем / Ю. Н. Миронова. – Текст : электронный // Всероссийская научно-практическая конференция «Геоинформационные системы в современном мире». – URL: <http://econf.rae.ru/article/8413> (дата обращения: 20.05.2014).

24 Serifoglu Yilmaz, C. Comparison of the performances of ground filtering algorithms and DTM generation from a UAV-based point cloud / C. Serifoglu Yilmaz, O. Gungor. – Текст : непосредственный // Geocarto International. – 2018. – № 33(5). – P. 522–537.

25 Новаковский, Б. А. Программное обеспечение для геоинформационной обработки данных воздушного лазерного сканирования / Б. А. Новаковский, А. В. Кудрявцев, А. Л. Энтин. – Текст : непосредственный // Геоинформатика. – 2022. – № 4. – P. 2–11.

26 Воздушные лазерные сканеры АГМ, программы обеспечения. – Текст : электронный. – URL: <https://www.agmsys.ru/products/>.

27 Тихонов, А. А. Обзор программ для обработки данных аэрофотосъемки / А.А. Тихонов, Д. Ж. Акматов. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 7. – С. 192–198.

28 Ниязгулов, У. Д. Фотограмметрия и дистанционное зондирование / У. Д. Ниязгулов. – Москва : РУТ (МИИТ), 2018. – 451 с. – Текст : непосредственный.

29 Скворцов, А. В. Геоинформатика : учебное пособие / А. В. Скворцов. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2006. – 336 с. – Текст : непосредственный.

30 Серапинас, Б. Б., Основы спутникового позиционирования / Б. Б. Серапинас. – Москва : Географический фак. МГУ, 2012. – 255 с. – Текст : непосредственный.

31 Михеева, А. А. Анализ требований к выполнению работ по аэрофотосъемке / А. А. Михеева, М. А. Наприенкова. – Текст : непосредственный // Вестник Полоцкого государственного ун-та. Серия F: Строительство. Прикладные науки. – 2008. – № 6. – С. 201–206.

32 Хромченко, А. В. Использование аэрофотосъемки для решения задач землеустройства и кадастра в Приморском крае / А. В. Хромченко, В. Ф. Булавицкий. – Текст : непосредственный // Научные чтения памяти профессора М. П. Даниловского. – 2015. – № 1. – С. 241–245.

33 Дедова, Т. В. Создание топографических карт на основе аэрофотосъемки для мониторинга экологических проблем по магистральному газопроводу / Т. В. Дедова, А. Б. Исаханова. – Текст : непосредственный // Гидрометеорология и экология. – 2011. – № 4. – С. 53–64.

34 Убаева, А. С. Создание топографических планов масштаба 1 : 1 000 по данным аэрофотосъемки на территории месторождения / А. С. Убаева. – Текст : непосредственный // Наука и образование сегодня. – 2017. – № 5 (16). – С. 111–114.

35 Ковач, Н. С. Картографирование линейных инженерных объектов по данным лазерного сканирования / Н. С. Ковач. – Текст : непосредственный // Вестник Московского ун-та. – 2013. – № 1. – С. 47–54.

36 Tymków, P. Application of photogrammetric and remote sensing methods for identification of resistance coefficients of high water flow in river valleys : monografie LXXXVIII / P. Tymków. – Wrocław : Wydawnictwo uniwersytetu przyrodniczego we Wrocławiu, 2009. – 101 p. – Текст : непосредственный.

37 Леушин, В. В. Воздушное лазерное сканирование с помощью БПЛА / В. В. Леушин. – Текст : непосредственный // Альманах мировой науки. – 2016. – № 6–1 (9). – С. 59–60.

38 Середович, А. В. Построение цифровых топографических планов объектов нефтедобычи с применением наземного лазерного сканирования / А. В. Середович. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч. 2: сб. материалов науч. конгр. «ГЕО-Сибирь- 2006», 24–28 апреля 2006 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 145–149.

39 Буш, В. Лекционный курс по дисциплине «Наблюдение за деформациями Земли методом Дистанционное зондирования», Институт Геотехники и Маркшейдерии, Технический Университет Клаусталь, Германия, часть 4, июль 2011 / В. Буш, С. Кноспе – Vorlesungen von Proff. Dr. – Ing. W. Busch, Dr. rer. nat. St. Knospe vom „Erfassung von Bodenbewegungen mit Methoden der Fernerkundung“. Teil 4, Juli 2011. – Текст : непосредственный.

40 Лысков, И. А. Пермский государственный технический Университет, доклад на тему: «Мониторинг деформационных процессов подработанных территорий и выделение зон сдвижений с помощью спутниковой радарной интерферометрии» / И. А. Лысков. – Пермь : 2010. – Текст : непосредственный.

41 Никольский, Д. Б. Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли / Д. Б. Никольский. – Текст : непосредственный // Геоматика. – 2008. – № 1. – С. 7–10.

42 Almeida, C. The structural and photometric properties of early-type galaxies in hierarchical models / C. Almeida, C. Baugh, C. Lacey. – Текст : непосредственный // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2007. – № 376(4). – P. 1711–1726.

43 Nikolakopoulos, K. G. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece / K. G. Nikolakopoulos, E. K. Kamaratakis, N. Chrysoulakis. – Текст : непосредственный // International Journal of remote sensing – 2006. – № 27 (21). – P. 4819–4838.

44 Doetscher, Y. Producing Seamless Multi-Source Quality-Dependent Digital Terrain Models / Y. Doetscher, S. Dalot. – Текст : непосредственный // Proceedings of 7th FIG Regional Conference Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity Hanoi, Vietnam, 19–22 October 2009. – 15 p.

45 Кошкарев, А. В. Цифровое моделирование рельефа / А. В. Кошкарев. – Текст : непосредственный // Морфология рельефа (под ред. Д. А. Тимофеева и Г. Ф. Уфимцева). – Москва : Научный мир. – 2004. – С. 103–122.

46 Мохаммад, Б. Определить геодезические и картографические стандарты для географических информационных баз и банков (Арабский) / Б. Мохаммад. – Текст : непосредственный // Журнал Дамасского Университета. – 2015. – Т. 31, Выпуск 1 + 2. – 44 с.

47 Дирафор, М. С. Геодезия и геофизика (франц.) / М. С. Дирафор. – Стокгольм, 1930. – 236 с. – Текст : непосредственный.

48 Аль-бунни Сарих, Исса Нажим-Аддин. Организация геодезической сети в Сирии : курс лекций. (арабск.) / Аль-бунни Сарих, Исса Нажим-Аддин. – Дамаск, 1997. – С. 18. – Текст : непосредственный.

49 Дарвиш, У. Создание трехмерных цифровых моделей городов с крупными топографическими масштабами в среде ГИС / У. Дарвиш. – Текст : непосредственный // Журнал технических наук Дамасского университета. – 2013. – Т. 29-2. – 13 с.

50 Общее описание ASTER GDEM. – URL: <https://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html>. – Текст : электронный.

51 Vaman, D. A GPS inspired Terrain Referenced Navigation algorithm / D. Vaman. – Netherlands Defence Academy, 2014. – Текст : непосредственный.

52 Hemann, G. Long-range GPS-denied Aerial Inertial Navigation / G. Hemann, S. Singh, M. Kaess. – Текст : непосредственный // Robotics Institute. – 2016.

53 Инструкция по топографической съемке в масштабе 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000 и 1 : 500. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – Москва : Недра, 1985. – 150 с. – Текст : непосредственный.

54 Инженерная геодезия / Е. Б. Ключин, М. И. Киселев, Д. Ш. Михелев, В. Д. Фельдман ; под ред. Д. Ш. Михелева. – 9-е изд. – Москва : Академия, 2008. – 480 с. – Текст : непосредственный.

55 Анопин, С. В. Топографические съемки, инженерно-геодезические изыскания и построения / С. В. Анопин. – Волгоград : ВолГГТУ, 2018. – 41 с. – Текст : непосредственный.

56 Омар, Э. М. Сравнение небольших беспилотных летательных аппаратов, облаков точек, полученных с помощью фотограмметрии, с измерениями GNSS и наземным лазерным сканированием для топографического картографирования / Э. М. Омар, А. С. Сулейман, П. Д. Хорхе. – Текст : непосредственный // Drones. – 2019. № 3 (3). – Р. 64.

57 Единые специальные технические условия на завершение топографических планов, их обновление, оцифровку и интеграцию с недвижимостью и организационными планами в масштабах 1 : 1 000, 1 : 2 000, 1 : 5 000, 1 : 10 000, выданные Министерством местного самоуправления и окружающей среды под номером 162/64 / м и / 5 дата 10 / 10/2004. – Текст : непосредственный.

58 Сербенюк, С. Н. Картография и геоинформатика – их взаимодействие / С. Н. Сербенюк. – Москва : МГУ, 1990. – 153 с. – Текст : непосредственный.

59 Медведев, Е. М. Лазерная локация земли и леса : учеб. пособие / Е. М. Медведев, И. М. Данилин, С. Р. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. –

Москва : Геолидар, Геоскосмос; Красноярск : Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с. – Текст : непосредственный.

60 Рыльский, И. Подходы к определению таксационных показателей леса с использованием аэрокосмических снимков и лазерного сканирования / И. Рыльский. – Текст : непосредственный // ИнтерКарто / ИнтерГИС. – 2018. – № 24 (2). – С. 216–240.

61 Haala, N. Quality of 3D point clouds from highly overlapping UAV imagery / N. Haala, M. Cramer, M. Rothermel. – Текст : непосредственный // ISPRS – International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2013. – XL-1/W2. – P. 183–188.

62 Operational Framework for Rapid, Very-high Resolution Mapping of Glacial Geomorphology Using Low-cost Unmanned Aerial Vehicles and Structure-from-Motion Approach / M. W. Ewertowski, et al. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2019. – № 11(1). – P. 65.

63 Luhmann, T. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry / T. Luhmann, C. Fraser, H.-G. Maas. – Текст : непосредственный // ISPRS – International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – № 115. – P. 37–46.

64 Comparison of SfM computer vision point clouds of a landslide derived from multiple small UAV platforms and sensors to a TLS-based model / S. Ruggles, et al. – Текст : непосредственный // Journal of Unmanned Vehicle Systems – 2016. – № 4 (4). – P. 246–265.

65 Simulation and Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks—Influence of Camera Calibration Error / Y. Zhou, et al. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2020. – № 12 (1). – P. 22.

66 Незамов, В. И. Характеристика качественного состояния земель при космическом мониторинге землепользования / В. И. Незамов, А. В. Незамова. – Текст : непосредственный // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2011. – № 1 (52). – С. 73–79.

67 Космический мониторинг в ландшафтно-экологических исследованиях / Г. С. Розенберг, С. В. Саксонов, Р. С. Кузнецова, С. А. Сенатор. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1. – С. 9–14.

68 Карпик, А. П. Структурно-функциональная модель геодезической пространственной информационной системы / А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 6. – С. 140–148.

69 Webster, T. L. An automated GIS procedure for comparing GPS and proximal LiDAR elevations / T. L. Webster, G. Dias. – Текст : непосредственный // Computers & geosciences. – 2006. – № 32 (6). – P. 713–726.

70 Tobler, W. R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region / W. R. Tobler. – Текст : непосредственный // Economic geography. – 1970. – № 46. – P. 234–240.

71 Оньков, И. В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения / И. В. Оньков. – Текст : непосредственный // Геоматика. Условные обозначения. – 2011. – № 3. – С. 40–46.

72 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000, 1 : 500. – Москва : Недра, 1982. – 152 с.

73 Михайлов, А. П. Испытательный полигон для тестирования беспилотных летательных аппаратов, используемых для картографирования и мониторинга территорий / А. П. Михайлов, В. М. Курков, А. Г. Чибуничев. – Текст : непосредственный // Тезисы 11-й Международной научнотехнической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии», Барселона, Испания, 2011 г.

74 Михайлов, А. П. Еще раз о выборе цифровых фотокамер для выполнения аэрофотосъемки с беспилотных аппаратов / А. П. Михайлов. – Текст : непосредственный // Тезисы 12-й Международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии», Альгарве, Португалия, 2012 г.

75 Иноземцев, Д. П. Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Часть 2. Модель обработки аэрофотоснимков в среде AGISOFT PHOTOSCAN / Д. П. Иноземцев. – Текст : непосредственный // АТИП. – 2013. – № 3. – С. 51.

76 СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02–96. – Москва: Минрегион России, 2013. – 80 с. – Текст : непосредственный.

77 Кан, Д. Некоторые тенденции и перспективы развития строительной отрасли в России / Д. Кан. – Текст : электронный // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 2. – URL: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=17144>.

78 Строительство в России. – Москва : Росстат, 2016. – 113 с. – Текст : непосредственный.

79 Gubaydullina, R. The state of the art in the detection of geometric, safety-related parameters of slopes and fracture zones to minimize the risk of a slope failure, of rock fall and spalling / R. Gubaydullina, D. Beregovoi. – Leoben : Montanuniversität Leoben department of mineral resources engineering, 2015. – 21 p. – Текст : непосредственный.

80 Francesco, N. UAV for 3D mapping applications / N. Francesco, F. Remondino. – Текст : непосредственный // Applied Geomatics. – 2014. – № 6 (1) – С. 1–15.

81 Самсонова, Н. В. Сущность аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов / Н. В. Самсонова, А. Б. Борический. – Текст : непосредственный // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике. – 2016. – № 1 (7). – С. 226–227.

82 Береговой, Д. В. Автоматизированное дешифрирование и векторизация материалов аэрофотосъемки при создании топографического плана / Д. В. Береговой. – Текст : непосредственный // EurasiaScience. Сборник статей XV международной научно-практической конференции. – Москва : «Научно–издательский центр «Актуальность. РФ», 2018. – С. 220–222.

83 Дедова, Т. В. Создание топографических карт на основе аэрофотосъемки для мониторинга экологических проблем по магистральному газопроводу / Т. В. Дедова, А. Б. Исаханова. – Текст : непосредственный // Гидрометеорология и экология. – 2011. – № 4. – С. 53–64.

84 Михайлов, А. В. Фотограмметрия : учебник для вузов / А. В. Михайлов, А. Г. Чибуничев ; под общ. ред. А. Г. Чибуничева. – Москва : МИИГАиК, 2016. – 294 с. – Текст : непосредственный.

85 Берлянт, А. М. Картографический словарь / А. М. Берлянт. – Москва : Научный мир, 2005. – 424 с. – Текст : непосредственный.

86 Лисицкий, Д. В. Основные принципы цифрового картографирования местности / Д. В. Лисицкий. – Москва : Недра, 1988. – 261 с. – Текст : непосредственный.

87 Сайт United States Geological Survey (USGS). – URL: earthexplorer.usgs.gov/. – Текст : электронный.

88 Документация цифровой модели рельефа ASTER Global Digital Elevation Model. ASTGTM 2015. – URL: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/aster/aster_products_table/astgtm. – Текст : электронный.

89 The CGIAR Consortium for Spatial Information. – URL: <http://srtm.csi.cgiar.org>. – Текст : электронный

90 Моисеенко, А. А. Цифровые модели как средства описания рельефа и опыт их использования / А. А. Моисеенко, С. Н. Ананьев, Е. В. Дужик. – Текст : электронный // ГИС-обозрение. – 2000. – № 3–4. – С. 10–16.

91 Берлянт, А. М. Картография / А. М. Берлянт. – Москва : Аспект Пресс, 2002. – 336 с. – Текст : непосредственный.

92 Афиногенов, Е. И. Метод автоматизированного формирования цифровой модели рельефа / Е. И. Афиногенов. – Текст : непосредственный // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2013. – № 12. – С. 375–400.

93 Ульрих, А. Информационное наполнение облака точек при воздушном лазерном сканировании / А. Ульрих. – Текст : непосредственный // Геоматика. – 2016. – № 1. – Р. 38.

94 Burnett, C. A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscape analysis / C. Burnett, T. Blaschke. – Текст : непосредственный // Ecological Modeling. – 2003. – № 168. – Р. 233–249.

95 A full GIS-based workflow for tree identification and delineation using laser scanning / D. Tiede, et al. – Текст : непосредственный // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Vienna. – 2005. – Vol. XXXVI, Part 3/W24. – P. 9–14.

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

97 Навгеоком. Наземное лазерное сканирование. – URL: <http://www.navgeocom.ru>. – Текст : электронный.

98 Leica Store Moscow. 3D лазерные сканеры (HDS). – URL: http://www.leica-geosystems.ru/ru/3D-HDS_23357.htm. – Текст : электронный.

99 Форум DWG. Лазерное сканирование. – URL: <http://forum.dwg.ru/>. – Текст : электронный.

100 Wehr, A. Airborne Laser scanning – an introduction and overview / A. Wehr, U. Lohr. – Текст : непосредственный // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1999. – № 54. – P. 68–82.

101 Blaschke T. 3D landscape metrics to modeling forest structure and diversity based on laser scanning data / T. Blaschke. – Текст : непосредственный // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Freiburg, 2004. – Vol. XXXVI-8/W2. – P. 129–132.

102 Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LIDAR / D. A. Zimble, et all. – Текст : непосредственный // Remote Sensing of the Environment. – 2003. – № 87. – P. 171–182.

103 Чибуничев, А. Г. Фотограмметрия: вчера, сегодня, завтра / А. Г. Чибуничев, А. П. Гук. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2016. – № 2. – С. 3–9.

104 Курков, В. М. Исследование точности цифровой модели рельефа, построенной по материалам беспилотной аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования / В. М. Курков, А. С. Киселева, А. Г. Чибуничев. – Текст : непосредствен-

ный // Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений : материалы международной научно-практической конференции, Кемерово, 13–14 апреля 2022 года / Под редакцией Т. В. Галаниной, М. И. Баумгартена. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2022. – С. 309.1–309.9.

105 Чибуничев, А. Г. Фотограмметрия: учебник для вузов / А. Г. Чибуничев. – Москва : Изд-во МИИГАиК, 2022. – 328 с. – Текст : непосредственный.

106 Топ-10 бесплатных программ для 3D-моделирования 2018 года. – URL: <https://3d-expo.ru/ru/article/top-10-besplatnih-programm-dlya-3d-modelirovaniya-2018-goda-92892>. – Текст : непосредственный.

107 Зенг, В. А. Обзор и сравнение программ 3D-моделирования / В. А. Зенг. – Текст : непосредственный // Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ : сб. ст. по мат. XXVII междунар. студ. науч.-практ. конф. – 2014. – № 12 (26).

108 Толстых, А. В. Обзор программных средств для создания 3D анимационных моделей / А. В. Толстых, А. Ю. Демин. – Текст : непосредственный // XIII Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии Microsoft в теории и практике программирования». – 2016. – С. 194–195.

109 Schoning, J. Interactive 3D modeling A survey-based perspective on interactive 3D reconstruction / J. Schoning, G. Heidemann. – Текст : непосредственный // ICPRAM. – 2015. – P. 289–294.

110 Staff, C. B. The best 3D modelling software / C. B. Staff. – 2019. – Текст: электронный.

111 Reitmann, S. BLAINDER – A Blender AI Add-On for Generation of Semantically Labeled Depth-Sensing Data / S. Reitmann, L. Neumann, B. Jung. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2021. – № 21. – P. 2144.

112 Rusli, N. The Accuracy Assessment of Agisoft PhotoScan and Pix4D Mapper Software in Orthophoto Production / N. Rusli. – Текст : непосредственный //

Conference: The 1st Proceeding of Geomatic Research Innovation & Competition. – 2018.

113 По материалам компании Bentley Systems, моделирование реальности теперь доступно для всех. – Текст : непосредственный // CADmaster. – 2016. – № 1 (83). – С. 80–83.

114 Гутьеррес, Г. Обследование прибрежных скал с использованием двух платформ БВС (многороторного и с неподвижным крылом) и трех различных подходов для оценки объемных изменений / Г. Гутьеррес, А. Гонсалвес. – Текст : непосредственный // Междунар. журнал «Дистанционное зондирование». – 2020. – № 41. – С. 8143–8175.

115 Phantom 4 Pro V2.0 технические Характеристики – DJI. – URL: <https://www.dji.com/ru/phantom-4-pro-v2/specs>. – Текст : электронный.

116 PHANTOM 4 RTK, Visionary Intelligence. Elevated Accuracy. – URL: <https://www.dji.com/phantom-4-rtk/info>. – Текст : электронный.

117 Испытательный полигон МИИГАиК для тестирования, калибровки и сертификации беспилотных летательных систем / А. В. Говоров, А. Г. Чибуничев, В. М. Курков, А. В. Смирнов. – Текст : электронный // Геодезия, картография, кадастр, ГИС – проблемы и перспективы развития : Материалы международной научно-технической конференции, Новополоцк, 09–10 июня 2016 года. – Новополоцк : Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», 2016. – С. 36–48.

118 Русяева, Е. А. Теория математической обработки геодезических измерений. Часть I. Теория ошибок измерений : учебное пособие. / Е. А. Русяева. – Москва : МИИГАиК, 2016. – 56 с. – Текст : непосредственный.

119 Савиных, В. Аэрокосмическая фотосъемка / В. Савиных, А. Кучко, А. Стеценко. – Москва : Картгеоцентр-Геодезиздат, 1997. – Текст : непосредственный.

120 ОДМ 218.9.017–2019. Методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с использованием беспилотных летательных аппаратов при изысканиях в целях строительства и реконструкции автомобильных

дорог. – Москва : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2019. – 60 с. – Текст : непосредственный.

121 Мохаммад, Акель Амин. Создание крупномасштабных цифровых моделей местности и рельефа в условиях Сирийской Арабской Республики / Акель Амин Мохаммад. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2022. – Т. 66. – № 1. – С. 673–679. – DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-1-673-679.

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

123 Воздушный лазерный сканер для БПЛА. Технические характеристики. – URL: <https://www.agmsys.ru/mscan/ms1>. – Текст : электронный.

124 Еремеев, В. В. Оценка разрешающей способности материалов космической съемки на основе их статистического анализа / В. В. Еремеев, П. А. Князьков. – Текст : непосредственный // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. – Москва : Институт космических исследований РАН, 2010. – Вып. 7., т. 2. – С. 26–34.

125 Борщ-Компанеец, В. И. Геодезия, основы аэрофотосъемки и маркшейдерского дела / В. И. Борщ-Компанеец. – Москва : Недра, 1984. – 448 с. – Текст : непосредственный.

126 Шилов, П. И. Инженерная геодезия и аэрогеодезия / П. И. Шилов, В. И. Федоров. – Москва : Недра, 1971. – 384 с. – Текст : непосредственный.

127 Kaplan, E. D. Understanding GPS Principles and Applications. Second Edition / E. D. Kaplan, C. J. Hegarty. – 2006. – 723 p. – Текст : непосредственный.

128 Яценков, В. С. Основы спутниковой навигации. Системы NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС / В. С. Яценков. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2005. – 272 с. – Текст : непосредственный.

129 Производитель: MicroSurvey STAR*NET. – URL: <https://store.softline.ru/microsurvey/microsurvey-starnet/>. – Текст : электронный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ОТЧЕТ AGISOFT METASHAPE ОБРАБОТКИ РЕАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПРИМЕРА

Agisoft Metashape

Отчёт об обработке
03 November 2022



Исходные данные

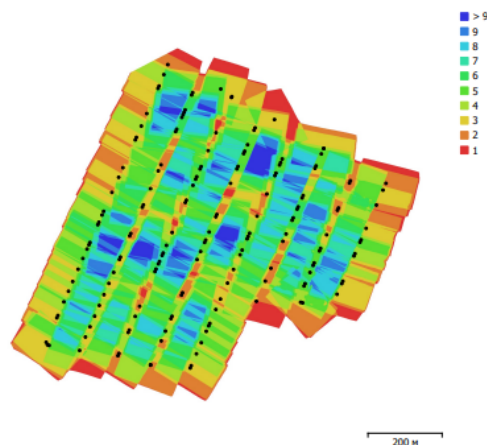


Рис. 1. Положение центров фотографирования и перекрытие снимков.

Всего снимков:	167	Позиций съёмки:	167
Высота полёта:	132 м	Связующих точек:	227,027
Разрешение съёмки:	3.35 см/пикс	Проекций:	671,832
Площадь покрытия:	0.622 км²	Ошибка репр-я:	0.367 пикс

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя	Калибровка
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 мм	2.41 x 2.41 мкм	Нет

Таблица 1. Камеры.

Положения центров фотографирования

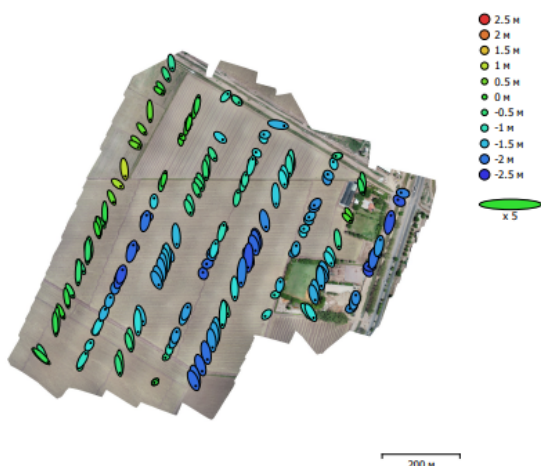


Рис. 3. Рассчитанные положения центров фотографирования и оценка ошибок. Ошибка по Z отображается цветом эллипса. Ошибки в плане отображаются формой эллипса. Рассчитанные положения центров фотографирования отмечены чёрной точкой.

Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Ошибка XY (м)	Общая ошибка (м)
..76284	5.61241	1.3201	5.88274	6.02904

Таблица 3. Средняя ошибка по координатам центров фотографирования. X - Восточное указание, Y - Северное указание, Z - Высота.

Опорные точки

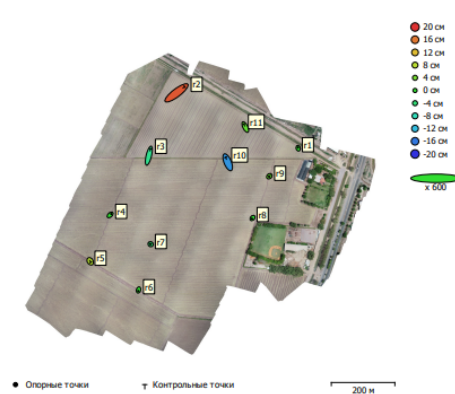


Рис. 4. Положения опорных и контрольных точек и оценка ошибок. Ошибка по Z отображается цветом эллипса. Ошибки в плане отображаются формой эллипса. Рассчитанные позиции опорных точек отмечены чёрной точкой, контрольных - перекрестьем.

Кол-во	Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Ошибка XY (см)	Общая (см)
4	0.672251	0.890658	0.0952066	1.11588	1.11994

Таблица 4. СКО по опорным точкам. X - Восточное указание, Y - Северное указание, Z - Высота.

Кол-во	Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Ошибка XY (см)	Общая (см)
7	3.46997	4.38789	9.55463	5.59413	11.0718

Таблица 5. СКО по контрольным точкам. X - Восточное указание, Y - Северное указание, Z - Высота.

Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Общая (см)	Снимок (пикс)
-0.223261	0.749703	0.0901793	0.787421	0.552 (7)
1.13891	1.00935	-0.0436038	1.52244	0.647 (9)
-0.321999	-1.05131	0.0915255	1.10332	0.606 (8)
-0.597529	-0.697848	-0.133591	0.928374	0.861 (6)
0.672251	0.890658	0.0952066	1.11994	0.666

Таблица 6. Опорные точки.

X - Восточное указание, Y - Северное указание, Z - Высота.

Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Общая (см)	Снимок (пикс)
8.56247	6.50023	17.8408	20.8294	0.443 (2)
1.76248	7.29413	-5.37428	9.23004	1.011 (4)
0.590229	-0.985636	7.66598	7.75159	0.596 (7)
0.212485	-0.149061	-3.5841	3.59349	1.021 (8)
-0.538216	-0.486725	2.94188	3.03006	1.161 (8)
-2.15719	5.27128	-14.2854	15.379	0.515 (9)
-1.58933	3.20947	2.74228	4.51073	0.668 (5)
3.46997	4.38789	9.55463	11.0718	0.845

Таблица 7. Контрольные точки.

X - Восточное указание, Y - Северное указание, Z - Высота.

Цифровая модель местности

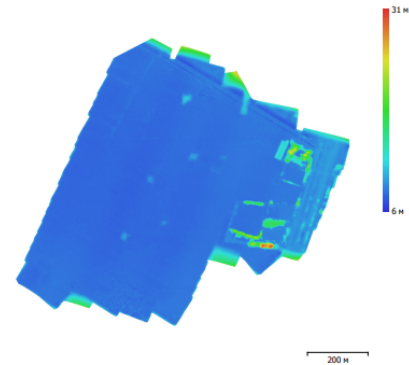


Рис. 5. Рассчитанная цифровая модель местности.

Разрешение: 2.39 м/пикс
Плотность точек: 0.176 точек/м²

Параметры обработки

Основные

Камеры	167
Выверенные камеры	167
Маркеры	11
Система координат	WGS 84 / UTM zone 12N (EPSG::32612)
Углы поворота	Курс, тангаж, крен

Облако точек

Точек	227,027 из 234,897
СК ошибка репроецирования	0.246667 (0.367007 пикс)
Макс. ошибка репроецирования	1.54279 (13.1701 пикс)
Средний размер точек	1.49549 пикс
Цвета точек	3 канала, uint8
Характерные точки	Нет
Средняя кратность связующих точек	2.98319

Параметры выравнивания

Точность	Очень высокая
Общая преселекция	Да
Преселекция по привязке	Исходные значения
Характерных точек на кадр	40,000
Макс. количество точек на Мпикс	1,000
Связующих точек на кадр	4,000
Поддавать неподвижные связующие точки	Да
Локальное отождествление снимков	Нет
Адаптивное уточнение модели камеры	Нет
Время отожествления	3 минуты 9 секунд
Пиковое потребление памяти отождествления	1.38 Гбайт
Время выравнивания	3 минуты 52 секунды
Пиковое потребление памяти фототриангуляции	138.21 Мбайт

Параметры оптимизации

Параметры	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Адаптивное уточнение модели камеры	Нет
Время оптимизации	31 секунда
Дата создания	2022:10:28 12:00:40
Версия программы	1.7.6.13315
Размер файла	16.58 Мбайт

Модель

Полигонов	89,999
Вершин	45,250
Цвета вершин	3 канала, uint8

Параметры реконструкции

Тип поверхности	Произвольный
Исходные данные	Разреженное облако
Интерполяция	Включена
Строгие пространственные маски	Нет
Время обработки	3 секунды
Использование памяти	53.98 Мбайт
Дата создания	2022:11:03 23:46:23
Версия программы	1.7.6.13315
Размер файла	2.06 Мбайт

Ортофотоплан

Размер

36,843 x 31,035

Система координат

WGS 84 / UTM zone 12N (EPSG::32612)

Цвета

3 канала, uint8

Параметры реконструкции

Режим смешивания

Мозаика

Поверхность

Полигональная модель

Включить заполнение отверстий

Да

Включить фильтрацию шумов

Нет

Время обработки

7 минут 1 секунда

Использование памяти

2.51 Гбайт

Дата создания

2022:11:03 23:50:00

Версия программы

1.7.6.13315

Размер файла

4.30 Гбайт

Система

Название программы

Agisoft Metashape Professional

Версия программы

1.7.6 build 13315

ОС

Windows 64 bit

ОЗУ

31.94 Гбайт

ЦПУ

Intel(R) Core(TM) i7-4790K CPU @ 4.00GHz

ГПУ

AMD Radeon HD 7900 Series (Tahti)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

ОТЧЕТ AGISOFT METASHAPE ОБРАБОТКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИМЕРА

Agisoft Metashape

Отчёт об обработке
03 November 2022



Калибровка камеры

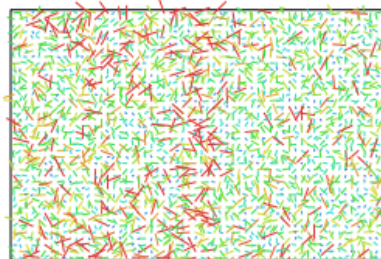


Рис. 2. Невязка по связующим точкам для unkown.

unkown
269 снимков

Тип	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя
Кадровая	5472 x 3648	8.8 мм	2.36 x 2.36 мкм
F:	3728.81		
Sx:	0	B1:	0
Sy:	0	B2:	0
K1:	0	P1:	0
K2:	0	P2:	0
K3:	0	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Исходные данные

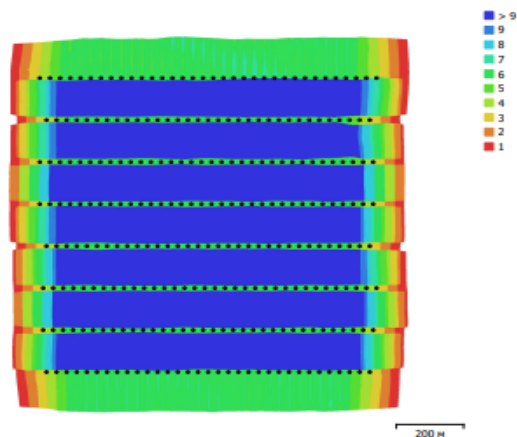


Рис. 1. Положение центров фотографирования и перекрытие снимков.

Всего снимков:	269	Позиций съёмки:	269
Высота полёта:	205 м	Связующих точек:	99,214
Разрешение съёмки:	4.97 см/пикс	Проекций:	814,461
Площадь покрытия:	1.48 км ²	Ошибка репр-я:	0.744 пикс

Опорные точки

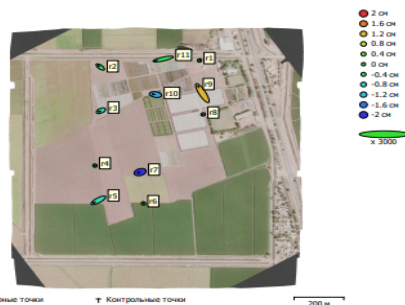


Рис. 3. Положения опорных и контрольных точек и оценка ошибок. Ошибка по Z отображается цветом эллипса. Ошибки в плане отображаются формой эллипса. Рассчитанные позиции опорных точек отмечены чёрной точкой, контрольных - перекрестием.

Кол-во	Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Ошибка XY (см)	Общая (см)
4	0.029377	0.0412317	0.0293404	0.0506267	0.0585142

Таблица 2. СКО по опорным точкам.

Кол-во	Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Ошибка XY (см)	Общая (см)
7	1.13555	0.998005	1.10618	1.51178	1.87326

Таблица 3. СКО по контрольным точкам.

Модель камеры	Разрешение	Фокусное р-е	Размер пикселя	Калибровка
unkown	5472 x 3648	8.8 мм	2.36 x 2.36 мкм	Нет

Таблица 1. Камеры.

Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Общая (см)	Снимок (пикс)
0.0334819	0.0454636	-0.0292552	0.0635912	0.132 (12)
-0.0429965	-0.0411502	0.0401208	0.0717755	0.168 (6)
-0.0100249	0.0367704	-0.0268669	0.0466304	0.311 (6)
0.0195396	-0.0410838	0.0160013	0.0482257	0.324 (12)
0.029377	0.0412317	0.0293404	0.0585142	0.248

Таблица 4. Опорные точки.

Цифровая модель местности

Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Общая (см)	Снимок (пикс)
0.0334819	0.0454636	-0.0292552	0.0635912	0.132 (12)
-0.0429965	-0.0411502	0.0401208	0.0717755	0.168 (6)
-0.0100249	0.0367704	-0.0268669	0.0466304	0.311 (6)
0.0195396	-0.0410838	0.0160013	0.0482257	0.324 (12)
0.029377	0.0412317	0.0293404	0.0585142	0.248

Таблица 4. Опорные точки.

Ошибка, X (см)	Ошибка, Y (см)	Ошибка, Z (см)	Общая (см)	Снимок (пикс)
-0.579844	0.525935	-0.25587	0.823588	0.222 (9)
-0.512359	-0.31825	-0.714473	0.935022	0.226 (12)
-1.27468	-0.862134	-0.780585	1.72552	0.329 (7)
-0.511371	-0.208174	-1.99313	2.06819	0.061 (6)
-1.23139	2.32885	1.22922	2.90704	0.195 (6)
-0.723896	0.171048	-1.35784	1.54823	0.217 (12)
-2.12153	-0.595642	-0.22994	2.21552	0.191 (12)
1.13555	0.998005	1.10618	1.87326	0.219

Таблица 5. Контрольные точки.

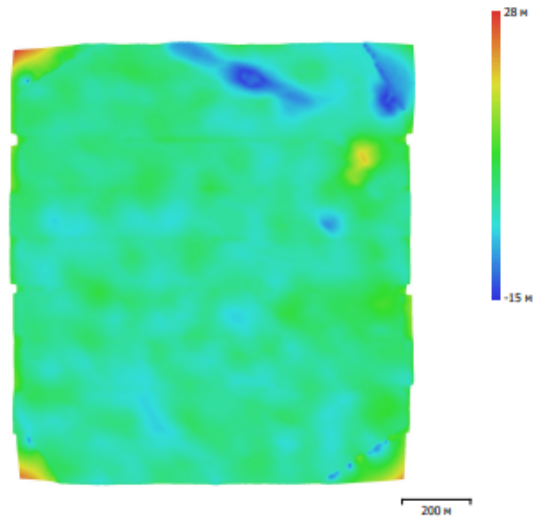


Рис. 4. Рассчитанная цифровая модель местности.

Разрешение: 3.73 м/пикс
Плотность точек: 0.0719 точек/м²

Параметры обработки

Основные

Камеры	269
Выровненные камеры	269
Маркеры	11
Система координат	Local Coordinates (m)
Углы поворота	Курс, тангаж, крен

Облако точек

Точек	99,214 из 139,906
СК ошибка репроецирования	0.106577 (0.744101 пикс)
Макс. ошибка репроецирования	0.3854 (12.6663 пикс)
Средний размер точек	6.62588 пикс
Цвета точек	3 канала, uint8
Характерные точки	Нет
Средняя кратность связующих точек	8.29146

Параметры выравнивания

Точность	Средняя
Общая преселекция	Да
Преселекция по привязке	Нет
Характерных точек на кадр	40,000
Макс. количество точек на Мпикс	1,000
Связующих точек на кадр	4,000
Подавлять неподвижные связующие точки	Да
Локальное отождествление снимков	Нет
Адаптивное уточнение модели камеры	Нет
Время отождествления	42 минуты 22 секунды
Пиковое потребление памяти отождествления	1.53 Гбайт
Время выравнивания	7 минут 29 секунд
Пиковое потребление памяти фототриангуляции	145.25 Мбайт

Параметры оптимизации

Адаптивное уточнение модели камеры	Нет
Время оптимизации	11 секунд
Дата создания	2022:11:02 17:39:30
Версия программы	1.7.5.13100
Размер файла	20.41 Мбайт

Карты глубины

Количество	269
------------	-----

Параметры построения карт глубины

Качество	Среднее
Фильтрация карт глубины	Мягкая
Макс. число соседей	40
Время обработки	25 минут 41 секунда
Использование памяти	2.26 Гбайт
Дата создания	2022:11:03 17:58:49
Версия программы	1.7.6.13315
Размер файла	16.65 Мбайт

Плотное облако точек

Точек	8,971,610
Цвета точек	3 канала, uint8

Параметры построения карт глубины

Качество	Среднее
----------	---------

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

ОТЧЕТ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЙ ПУНКТОВ

STAR*NET-PLUS Version 9.1.4
 Copyright 2001-2012 Starplus Software, Inc.
 Licensed for Use by
 Run Date: Wed Apr 25 2018 010:24:22

Summary of Files Used and Option Settings

=====

Project Folder and Data Files

Project Name EARTH TRV
 Data File List EARTH TRV.dat

Project Option Settings

STAR*NET Run Mode : Adjust with Error Propagation
 Type of Adjustment : 2D
 Project Units : Meters; GONS
 Coordinate System : LOCAL
 Default Project Elevation : 700.0000 Meters
 Apply Average Scale Factor : 0.9998855000
 Input/Output Coordinate Order : East-North (Shown as X-Y)
 Angle Data Station Order : At-From-To
 Distance/Vertical Data Type : Hor Dist/DE
 Convergence Limit; Max Iterations : 0.010000; 10
 Default Coefficient of Refraction : 0.070000
 Earth Radius : 6378137.00 Meters
 Create Coordinate File : Yes
 Create Ground Scale Coordinate File : No
 Create Dump File : No

Instrument Standard Error Settings

Project Default Instrument
 Distances (Constant) : 0.005000 Meters
 Distances (PPM) : 5.000000
 Angles : 2.000000 MilliGons
 Directions : 2.000000 MilliGons
 Azimuths & Bearings : 2.000000 MilliGons
 Centering Error Instrument : 0.005000 Meters
 Centering Error Target : 0.005000 Meters

Summary of Unadjusted Input Observations

=====

Number of Entered Stations (Meters) = 3

Fixed Stations	X	Y	Description
S527	45342.9100	21180.7300	
S5	45010.6203	20784.4406	
S6	45501.5009	20424.2748	

Number of Angle Observations (GONS) = 22

At	From	To	Angle	StdErr
K7	J7	S527	192.736500	9.76
A8	S5	B8	200.604500	5.65
B8	A8	C8	196.752000	5.31

C8	B8	S6	231.119000	5.65
S6	C8	S5	375.962500	4.15
S527	S8	A9	279.075000	6.36
A9	S527	B9	144.453000	9.00
B9	A9	C9	210.327000	9.00
C9	B9	D9	201.497000	8.76
D9	C9	E9	178.229000	9.50
E9	D9	F9	149.829500	9.99
F9	E9	G9	220.751000	10.80
G9	F9	H9	277.495000	8.87
H9	G9	I9	232.047000	6.81
I9	H9	S6	187.610000	6.05
S6	I9	S5	317.650000	3.85
A18	S5	B18	226.143000	8.99
B18	A18	C18	280.397000	9.30
C18	B18	D18	194.824500	9.88
D18	C18	E18	191.106000	9.54
E18	D18	J7	203.997500	11.93
J7	E18	I7	88.663000	8.69

Number of Distance Observations (Meters) = 24

From	To	Distance	StdErr
J7	K7	80.885	0.0089
K7	S527	82.061	0.0089
S5	A8	169.318	0.0092
A8	B8	131.6	0.0091
B8	C8	203.233	0.0093
C8	S6	114.785	0.009
S6	S5	608.906	0.0107
S527	A9	75.275	0.0089
A9	B9	94.193	0.0089
B9	C9	83.837	0.0089
C9	D9	100.744	0.009
D9	E9	71.443	0.0089
E9	F9	80.45	0.0089
F9	G9	66.678	0.0089
G9	H9	103.518	0.009
H9	I9	136.176	0.0091
I9	S6	136.288	0.0091
S6	S5	608.906	0.0107
S5	A18	101.369	0.009
A18	B18	77.749	0.0089
B18	C18	72.987	0.0089
C18	D18	90.212	0.0089
D18	E18	77.802	0.0089
E18	J7	58.146	0.0088

Adjusted Coordinates (Meters)

=====

Station	X	Y	Description
---------	---	---	-------------

S527	45342.91	21180.73
S5	45010.6203	20784.44
S6	45501.5009	20424.27
J7	45197.8602	21107.1
K7	45271.9587	21139.51
A8	45153.7684	20694.07
B8	45264.3508	20622.76
C8	45440.5184	20521.5
A9	45319.2422	21109.28
B9	45368.692	21029.12
C9	45400.6084	20951.6
D9	45436.765	20857.58
E9	45483.2816	20803.37
F9	45563.5033	20797.45
G9	45624.9218	20771.5
H9	45620.1166	20668.1
I9	45548.947	20552.02
A18	44957.2298	20870.6
B18	44946.0651	20947.53
C18	45011.7148	20979.41
D18	45089.3886	21025.28
E18	45150.216	21073.77

Adjusted Observations and Residuals

=====

Adjusted Angle Observations (GONS)

At	From	To	Angle	Residual	StdErr	StdRes
K7	J7	S527	192.7411	0.004594	9.76	0.5
S5	S9	A8	182.8637	0.001687	3.65	0.5
A8	S5	B8	200.608	0.003508	5.65	0.6
B8	A8	C8	196.7547	0.002675	5.31	0.5
C8	B8	S6	231.1218	0.002844	5.65	0.5
S6	C8	S5	375.9624	-8.3E-05	4.15	0
S527	S8	A9	279.0689	-0.00614	6.36	1
A9	S527	B9	144.4483	-0.00471	9	0.5
B9	A9	C9	210.3219	-0.00513	9	0.6
C9	B9	D9	201.494	-0.00305	8.76	0.3
D9	C9	E9	178.228	-0.001	9.5	0.1
E9	D9	F9	149.8301	0.000582	9.99	0.1
F9	E9	G9	220.766	0.015038	10.8	1.4
G9	F9	H9	277.5043	0.009305	8.87	1
H9	G9	I9	232.0579	0.010908	6.81	1.6
I9	H9	S6	187.6249	0.014911	6.05	2.5
S6	I9	S5	317.6586	0.008558	3.85	2.2
A18	S5	B18	226.1438	0.000764	8.99	0.1
B18	A18	C18	280.3953	-0.00173	9.3	0.2
C18	B18	D18	194.8231	-0.00143	9.88	0.1
D18	C18	E18	191.105	-0.00101	9.54	0.1
E18	D18	J7	203.9957	-0.00181	11.93	0.2

		Adjusted Distance		Observations (Meters)	
J7	K7	80.8855	0.0005	0.0089	0.1
K7	S527	82.0668	0.0058	0.0089	0.7
S5	A8	169.309	-0.009	0.0092	1
A8	B8	131.5912	-0.0088	0.0091	1
B8	C8	203.2238	-0.0092	0.0093	1
C8	S6	114.7774	-0.0076	0.009	0.8
S6	S5	608.9073	0.0013	0.0107	0.1
S527	A9	75.2763	0.0013	0.0089	0.1
A9	B9	94.1987	0.0057	0.0089	0.6
B9	C9	83.8375	0.0005	0.0089	0.1
C9	D9	100.7445	0.0005	0.009	0.1
D9	E9	71.4439	0.0009	0.0089	0.1
E9	F9	80.4487	-0.0013	0.0089	0.1
F9	G9	66.6843	0.0063	0.0089	0.7
G9	H9	103.521	0.003	0.009	0.3
H9	I9	136.1758	-0.0002	0.0091	0
I9	S6	136.2891	0.0011	0.0091	0.1
S6	S5	608.9073	0.0013	0.0107	0.1
F9	E9	80.4487	0.0027	0.0089	0.3
S5	A18	101.3692	0.0002	0.009	0
A18	B18	77.75	0.001	0.0089	0.1
B18	C18	72.9891	0.0021	0.0089	0.2
C18	D18	90.2142	0.0022	0.0089	0.2
D18	E18	77.8041	0.0021	0.0089	0.2
E18	J7	58.1481	0.0021	0.0088	0.2
J7	I7	108.8307	-0.0023	0.009	0.3

Adjusted Azimuths (GONS) and Horizontal Distances (Meters)

=====
) Relative Confidence of Azimuth is in MilliGons(

From	To	Azimuth	Distance	95% Azi	RelCon Dist	confidence PPM
A18	B18	190.8255	77.7411	169.54	0.0211	271.3575
A18	S5	364.6818	101.3575	98.7	0.0216	213.0294
A8	B8	336.4589	131.5762	73.63	0.0192	145.727
A8	S5	135.8508	169.2896	67.98	0.0193	114.2411
A9	B9	364.8122	94.1879	156.73	0.0209	221.5933
A9	S527	220.3639	75.2677	134.09	0.0212	281.9672
B18	C18	271.2208	72.9808	178.57	0.0204	278.9334
C18	D18	266.0439	90.2038	155.62	0.0204	226.2862
D18	E18	257.1489	77.7952	170.63	0.0203	260.8278
E18	J7	261.1446	58.1415	186.26	0.0202	347.2786
E9	F9	304.6861	80.4395	157.55	0.0152	189.0902
J7	K7	273.7513	80.8763	153.31	0.0199	246.5068
K7	S527	266.4924	82.0574	116.42	0.0193	235.7205
S5	S9	152.9872	655.5858	0	0	0.0005

Error Propagation

=====
 Station Coordinate Standard Deviations (Meters)
 Station X Y

S527	0	0
S5	0	0
S6	0	0
J7	0.01094	0.010351
K7	0.007633	0.006463
A8	0.007748	0.007546
B8	0.009015	0.00932
C8	0.006369	0.007358
A9	0.006673	0.00852
B9	0.01272	0.011029
C9	0.01678	0.013498
D9	0.020248	0.014782
E9	0.021509	0.014693
F9	0.021189	0.013793
G9	0.02005	0.013786
H9	0.01399	0.012141
I9	0.007422	0.008484
A18	0.007089	0.008293
B18	0.011602	0.01183
C18	0.013684	0.012126
D18	0.01396	0.012888
E18	0.012905	0.012218

Station Coordinate Error Ellipses (Meters)
Confidence Region = 95%

Station	Semi-Major Axis	Semi-Minor Axis	Azimuth of Major Axis
S527	0	0	0
S5	0	0	0
S6	0	0	0
J7	0.027494	0.024558	133.67
K7	0.019378	0.01496	72.57
A8	0.01934	0.018076	137.21
B8	0.022874	0.022001	17.33
C8	0.019497	0.013684	163.86
A9	0.021229	0.015845	18.13
B9	0.031529	0.026536	81.17
C9	0.041926	0.031951	79.94
D9	0.050324	0.035116	84.44
E9	0.053306	0.034983	86.69
F9	0.052644	0.032533	86.01
G9	0.049146	0.033644	104.63
H9	0.034355	0.029591	110.09
I9	0.021769	0.016955	31.74
A18	0.021598	0.015707	166.86
B18	0.028959	0.028397	195.72
C18	0.034659	0.028315	129.38
D18	0.036027	0.029409	136.96
E18	0.033056	0.028277	138.52

Relative Error Ellipses (Meters)

		Confidence Region = 95%		
Stations From	To	Semi-Major Axis	Semi-Minor Axis	Azimuth of Major Axis
A18	B18	0.021235	0.020561	21.08
A18	S5	0.021598	0.015707	166.86
A8	B8	0.019177	0.015215	138.29
A8	S5	0.01934	0.018076	137.21
A9	B9	0.02325	0.020802	75.28
A9	S527	0.021229	0.015845	18.13
B18	C18	0.021261	0.01953	19.12
B8	C8	0.020302	0.019011	191.76
B9	C9	0.021593	0.020724	76.8
C18	D18	0.022057	0.020404	170.32
C8	S6	0.019497	0.013684	163.86
C9	D9	0.025547	0.02069	87.07
D18	E18	0.021047	0.020087	126.95
E18	J7	0.020199	0.017002	64.39
E9	F9	0.01991	0.015206	6.53
G9	H9	0.026076	0.020984	91.06
H9	I9	0.025467	0.021756	125.36
J7	K7	0.020378	0.019014	112.81
K7	S527	0.019378	0.01496	72.57
S5	S6	0	0	0

Elapsed Time

```

00000000 01Top of File
00000006 01Summary of Files Used and Option Settings
00000009 02Project Folder and Data Files
00000015 02Project Option Settings
00000033 02Instrument Standard Error Settings
00000035 03Project Default Instrument
00000044 01Summary of Unadjusted Input Observations
00000047 02Entered Stations
00000049 03Fixed Coordinates
00000059 02Angle Observations
00000214 02Distance Observations
00000369 01Adjustment Statistical Summary
00000389 01Adjusted Coordinates
00000519 01Adjusted Observations and Residuals
00000522 02Adjusted Angle Observations
00000677 02Adjusted Distance Observations
00000832 01Adjusted Azimuths and Horizontal Distances
00000980 01Error Propagation
00000983 02Station Coordinate Standard Deviations
00001112 02Station Coordinate Error Ellipses
00001243 02Relative Error Ellipses
00001389 01End of File
00014413 STARPLUS
000247BE

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

(обязательное)

МЕТОДИКА 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОЙ
СЪЕМКИ И ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В
ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «BLENDER» ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ
ВАРИАЦИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ
БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ТОЧНОСТЬ СОЗДАНИЯ
ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

1 ВВЕДЕНИЕ

Имитационное моделирование – это метод исследования, при котором изучаемая система или процесс заменяется моделью, описывающей ее с достаточной степенью приближения, с которой проводятся эксперименты для получения информации об особенностях функционирования этой системы с целью дальнейшего ее усовершенствования.

Исходя из определения, имитационное моделирование применяется для изучения производственных процессов путем создания их цифровых моделей в специальном программном обеспечении и проведения симуляции их работы на разных стадиях и всего технологического процесса в целом.

Процесс имитационного моделирования аэрофототопографической съемки, как и моделирования любого научного или производственного процесса, дает надежные и наглядные результаты, на которые можно положиться в научной работе, и на их основе можно формулировать подход к получению адекватных параметров в реальных полевых экспериментах, при условии выбора значений, соответствующих конкретным условиям съемки.

В представленной здесь методике рассматривается комплекс вопросов имитационного моделирования планирования и выполнения аэрофото- и лазерно-локационной съемок, с учетом методов и средств постобработки съемочных материалов для создания 2D-3D цифровых документов о местности в изучении влияния работы бортового съемочного оборудования.

Таким образом, ключевым моментом в этих процедурах является их реализация в среде имитационного цифрового компьютерного 3D-моделирования с привлечением необходимого дополнительного инструментария в виде геоинформационной системы (ГИС), цифровых фотограмметрических станций (ЦФС) и т. д. Предлагаемый в работе подход позволяет перебрать любое разумное количество вариантов решения поставленной задачи, не прибегая к натурным экспериментам. Это позволяет сэкономить время и средства для получения оптимальных парамет-

ров аэросъемки с учетом изучения влияния съемочных и навигационных параметров на качество и, прежде всего, точность конечной продукции – ЦММ, (ЦМР).

На рисунке Г.1 представлена общая блок-схема имитационного моделирования процессов, составляющих аэрофототопографической метод съемки при создании ЦММ (ЦМР) с использованием БВС различным навигационным оснащением.



Рисунок Г.1. Обобщенная схема имитационного моделирования аэрофототопографической съемки для создания ЦММ

2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «Blender»

2.1 Вводные замечания

Отметим, что в настоящее время программы 3D-моделирования реальности достигли такого уровня, что количество задач, решаемых ими, стало огромным. Сегодня в этом секторе рынка имеется очень широкий спектр программного обеспечения для 3D-моделирования как бесплатных, так и коммерческих продуктов разной степени сложности и стоимости, из которых нами был выбран программный комплекс «Blender» (далее – ПК Blender) в текущей версии 3.3.1. Среди многих программных средств для трехмерного моделирования реальности, среда 3D моделирования «Blender» выделяется универсальностью применения и уникальными возможностями подключения внешних программных средств для выполнения «внутренних» задач и привлекаемых процессов в цепочке процедур моделируемой технологии, а также доступностью для широкого круга пользователей. Являясь профессиональным свободным и открытым программным обеспечением для создания трехмерных компьютерных моделей, в настоящее время ПК «Blender» пользуется большой популярностью среди бесплатных 3D-графических редакторов в связи с его быстрым стабильным развитием и хорошей технической поддержкой.

Ставя целью нахождение оптимального набора параметров и условий аэрофототопографической аэросъемки, нами предлагается методика использования ПК «Blender» для имитационного компьютерного моделирования аэрофотосъемочного процесса, 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, такие как съемочное оборудование – БВС платформу, съемочную камеру, условия съемки и т. д.

При имитационном 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.

Очевидным преимуществом такого подхода в выборе оптимальных параметров аэрофотосъемочного процесса является его простая реализация, перебор всех разумных параметров съемки с возможными (случайными) отклонениями от заданных и, главное, экономия времени и средств ПК сравнению с экспериментальными реальными съемками для тех же целей.

В целом, ПК «Blender» позволяет спроектировать корректную схему съемочных маршрутов, учесть и изучить влияние погрешностей определения координат элементов внешнего и внут-

ренного ориентирования камеры, включая дисторсию, которые так или иначе, влияют на точность создаваемой по снимкам ЦММ. Также можно подбирать оптимальные параметры съемки, выявлять геометрию расположения и необходимое количество опорных и контрольных точек в зависимости от сложности ситуации, что позволит получить ЦММ (ЦМР) высокой точности и качества.

Аналогичным образом можно моделировать процессы наземной фотограмметрической съемки и наземного и воздушного лазерного сканирования.

2.2 Интерфейс ПК «Blender» и подготовка его к работе

При запуске ПК «Blender» появляется главное окно программы с дополнительными окнами – *a*, *b*, *v*, *z* для настройки комплекса под текущую задачу (рисунок Г.2).

***a* – окно «3D-Viewport»:** в котором визуализируются, обрабатываются, проектируются и модифицируются объекты, настраиваются сцены, освещение, цвет и текстура объектов, движение камеры (здесь фотограмметрическая аэрофотокамера) и других элементов.

По умолчанию, любой проект начинается с объекта «куб», его цвета, освещения, текстуры и параметров камеры.

***b* – окно «Time-line»:** ниже окна «3D-Viewport» располагаются основные окна, необходимые для моделирования движения и изменения объектов в окне 3D-Viewport и создания анимации.

***v* – окно структура проекта «Outliner»:** в правой верхней части находится структура проекта, где схематично показаны все объекты, добавленные в сцене, и можно показать или скрыть любой предмет в окне «3D-Viewport».

***z* – окно настройки параметров (Properties):** в правой нижней части располагается множество вкладок с различными настройками, где можно установить, моделировать и редактировать характер и величины всех компонентов окна «viewport».

Для удобства работы можно разделить окно «3D Viewport» продольно или поперечно с целью увеличения количества вспомогательных окон и каждое окно наделять функцией изменения или моделирования параметров проекта или просмотра характеристик элементов и компонентов, участвующих в построении проекта в целом.

На рисунке Г.3 показаны четыре группы окон, которые добавлены в рабочее окно для удобства выполнения проекта, а на рисунке Г.4 показаны все возможные варианты рабочих окон с пометкой выбранных и вставленных как показано на рисунке Г.3.

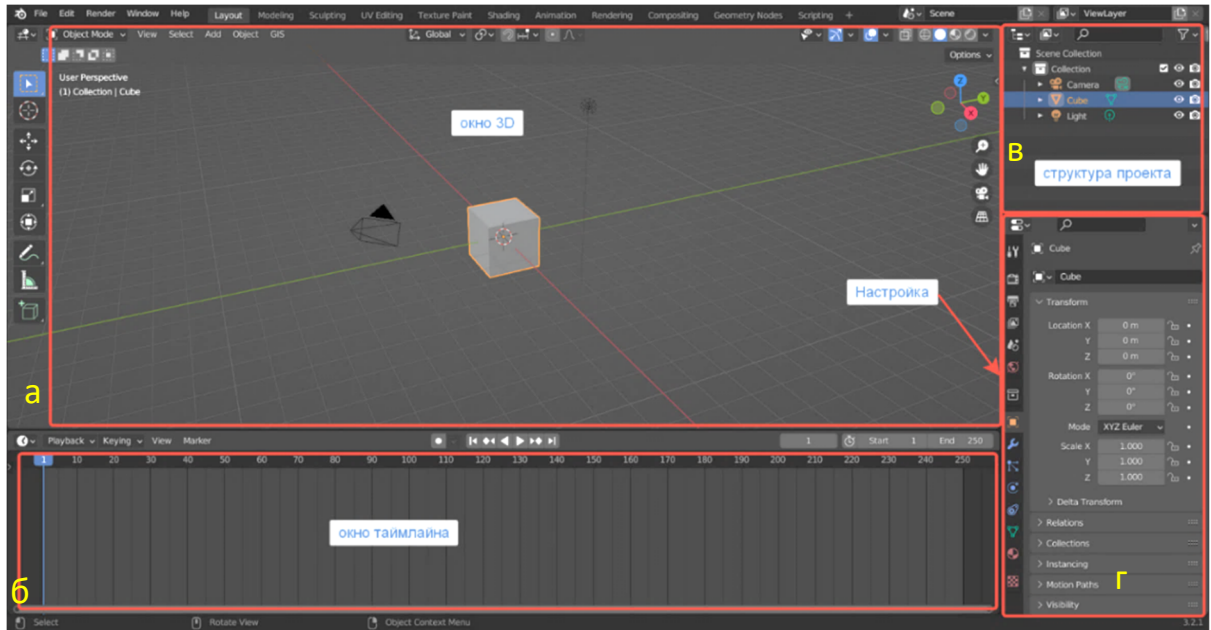


Рисунок Г.2 – Входной интерфейс ПК «Blender»

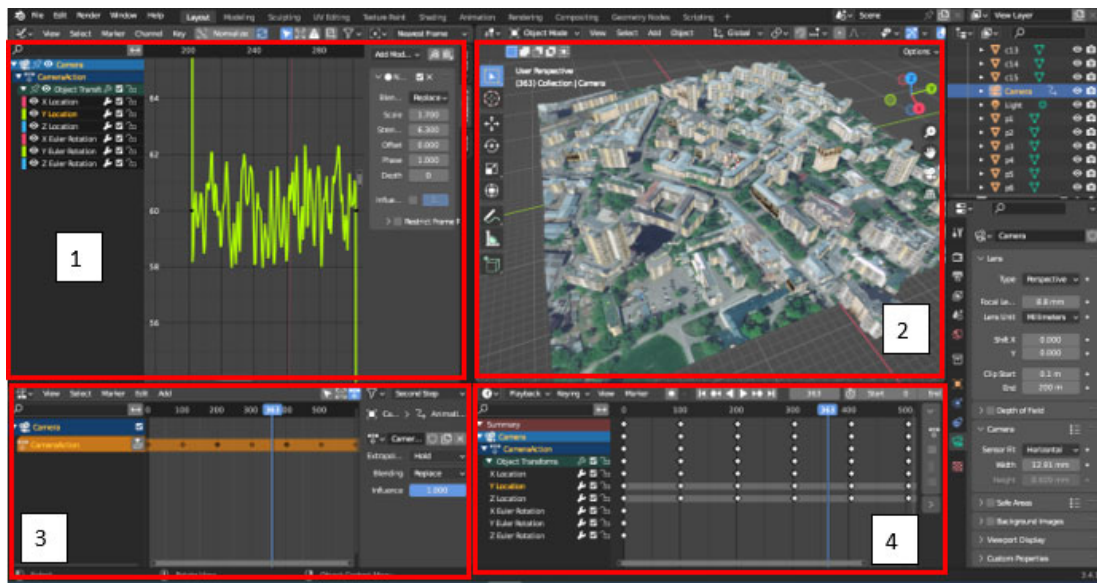


Рисунок Г.3 – Варианты расположения и назначения окон в интерфейсе программы Blender



Рисунок Г.4 – Все варианты назначения окон в программе Blender

2.3 Основные пространственные объекты среды Blender

В ПК Blender есть множество простых готовых геометрических объектов, которые можно добавлять, а затем модифицировать в соответствии с задачами, которые будут решаться с помощью 3D-программы. Основные из этих объектов представлены на рисунке Г.5.

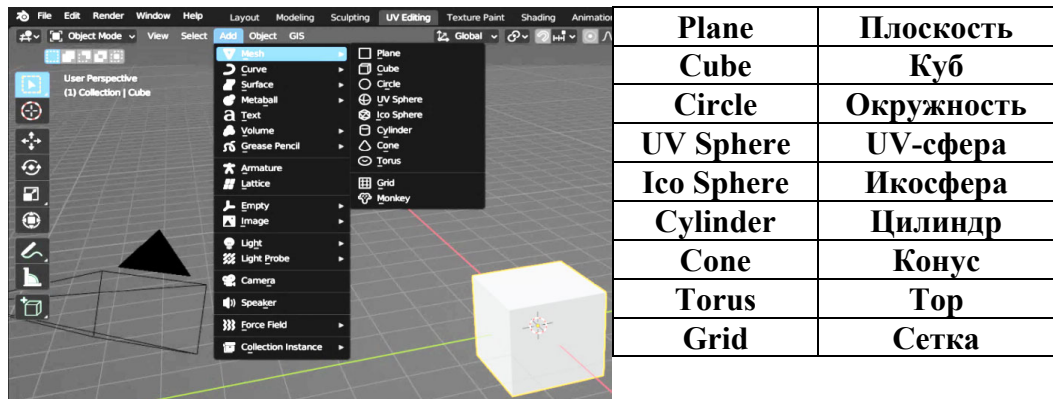


Рисунок Г.5 – Геометрические «3D-примитивы» в программе Blender

Пользователю чаще всего приходится иметь дело с двумя из шести вариантов работы с моделью в главном окне 3D-view. Это вариант «Project mode» (проектирование, создание модели) или вариант «Edit mode» (редактирование модели) (рисунок Г.6).

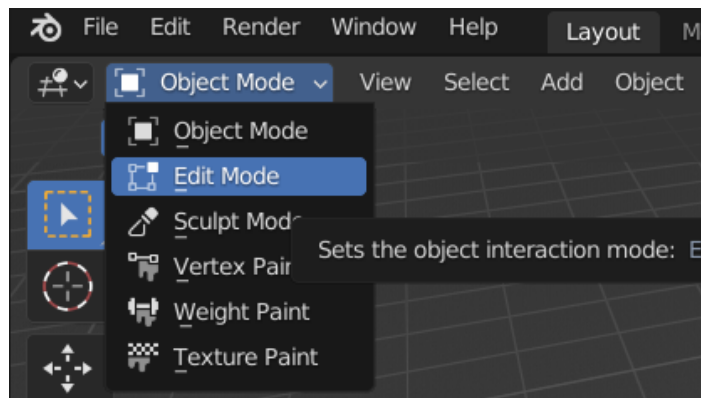


Рисунок Г.6 – Переключение между двумя режимами project mode и edit mode

В варианте «**Object mode**» модель объекта (группы объектов) отображается как есть в целом, а модель можно перемещать, изменять ракурс просмотра, измерять и моделировать фото (рендеринг модели) модели, запускать анимацию и т. д. В варианте «**Edit mode**» – любой элемент проекта модифицируется отдельно.

В ПК «Blender», как и в других программных комплексах 3D-моделирования имеется набор функций, для выполнения необходимых действий в рамках имитационного моделирования процессов технологической схемы аэрофототопографических работ. Отметим некоторые важные функции для моделирования аэрофотосъемки и воздушного лазерно-локационного сканирования:

- импорт моделей исходной местности с возможностью ее рендеринга и редактирования встроенным инструментарием;
- имитация полета ВС (вместе с камерой) в части движения его по заданным маршрутам с определенной высотой и скоростью согласно предварительным расчетам параметров аэрофотосъемки.
- фиксирование пространственных координат по траектории полета в точках фотографирования;
- получение массива виртуальных снимков исходной модели местности с фиксированными элементами внешнего и внутреннего ориентирования камеры.

Очень важно, что при этом можно имитировать различные условия полета воздушного судна с учетом влияния метеоусловий (направления и скорости ветра), моделировать качество снимков вследствие задымленности атмосферы, облачности и освещения и вносить результат действия эти факторов как случайные или систематические погрешности (в терминах ПК Blender – шум). Для нас важно иметь возможность вносить «шум» в запланированные координаты положения ВС в виде погрешностей, искажающих элементы внешнего ориентирования аэрофотоснимков, задавая при этом закон распределения вносимых случайных погрешностей.

2.4 Подключение дополнительных программных средств и внешних данных

Проведение процедур имитационного моделирования топографической АФС местности предполагает создание реалистичной эталонной (первичной) модели территории с необходимыми морфологическими и тематическими характеристиками объектами на ней с заданной метрической точностью их описания. Последнее является ключевым, поскольку модель территории по замыслу эксперимента является эталоном, с которым мы будем сравнивать производные модели этой местности, получаемые в процессе ее моделирования как результат имитации различных вариантов аэрофототопографической съемки и средств ее обработки.

Для создания первичной модели в ПК Blender предусмотрено подключение ГИС-инструментов, а также источников данных, которые можно использовать для загрузки исходной модели территории для съемки. В ПК Blender эта задача решается при помощи интернет-ресурсов ГИС

с сайтов «GoogleMap» или ресурса OSM с сайта <https://prochitecture.gumroad.com/l/blender-osm>. После скачивания дополнительных приложений в виде zip-файлов они активируются в программе через команду **Edit -> Preferences -> Add-ons -> install** (рисунок Г.7). (Видео Add OSM & GIS to Blender).

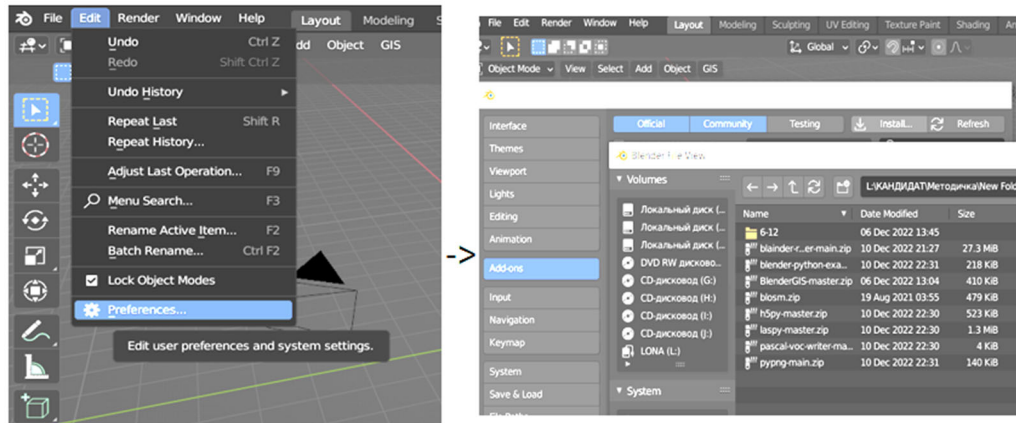


Рисунок Г.7 – Добавление приложений ГИС, данных OSM в среду ПК Blender

На рисунке Г.8 приведен интерфейс ПК Blender, в котором стрелками показаны загрузка ГИС (1) инструментария, ресурса OSM (2).

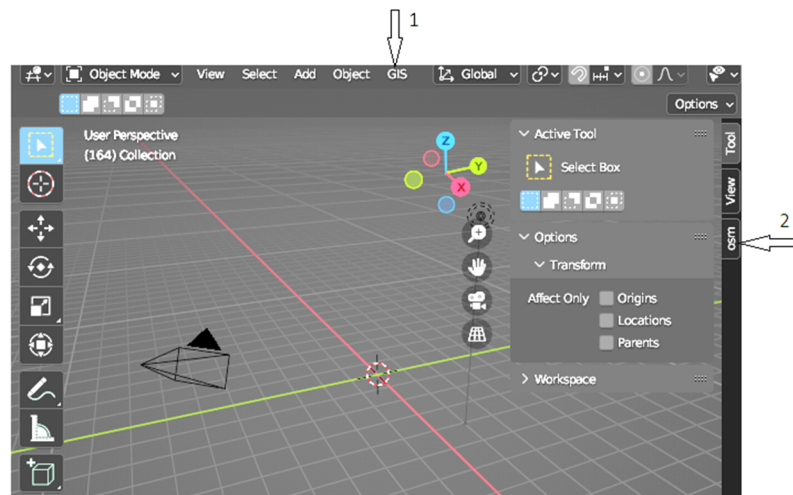


Рисунок Г.8 – Местоположение ссылок на внешние функциональные комплексы в среде «Blender» (1- GIS, 2 – OSM)

2.5 Импорт и подготовка первичной модели местности

Функцией «GIS» легко импортировать в среду Blender готовые 3D-модели территорий из нескольких источников (GoogleMap, OSM, Bing, Esri и пр.) Для этого выбираем источник данных из предлагаемого программным комплексом списка по цепочке **Google.GIS -> Web Geodata ->**

Basemap. В результате в главном окне открывается карта мира Google Earth, в которой можно выбрать прямоугольником необходимую область (территорию). Затем, нажав клавишу «E», импортируем выбранную область в виде 2D-карты в программную среду Blender, как показано на рисунке Г.9. Для того, чтобы импортировать рельеф к модели этой области, нажимаем кнопку «Webgeodata»-> Get elevation (from SRTM). Импорт рельефа SRTM произойдет для территории выбранной ранее области из Google Earth.

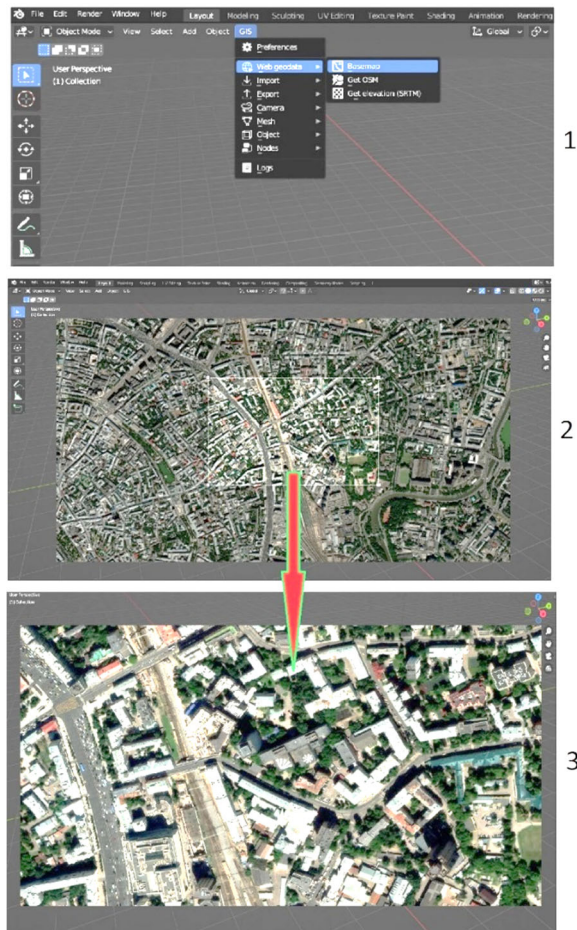


Рисунок Г.9 – Импортирование модели местности через ГИС приложение

В окне «3D-Viewport» можно вывести на экран характеристики рельефа в пределах выбранной территории в боковой панели (Sidebar), нажав на клавиатуре «N» (см. рисунок Г.9, п. 2).

Кроме модели рельефа, тоже можно импортировать данные для создания цифровой модели местности, например, с сайта OSM. Это зачастую может быть более предпочтительным решением, потому что это можно сделать быстрее и проще (рисунок Г.10). Если известны координаты импортируемой области, их можно записать прямо в окне «Blender-OSM», если нет, то через опцию «select» в появившейся карте мира выбираем необходимую прямоугольную область (рисунок Г.10, б_1), которую мы будем далее импортировать в среду «Blender». В дополнительных

окнах «Area size» «Coordinates» появляются размеры и координаты границ выделенного региона (рисунок Г.10, б_2,3). Эти данные необходимо копировать (рисунок Г.10, б_4) и вставить в окно «blender-osm» (рисунок Г.10, а_1,2). (Видео: Импортировать Местность через OSM).

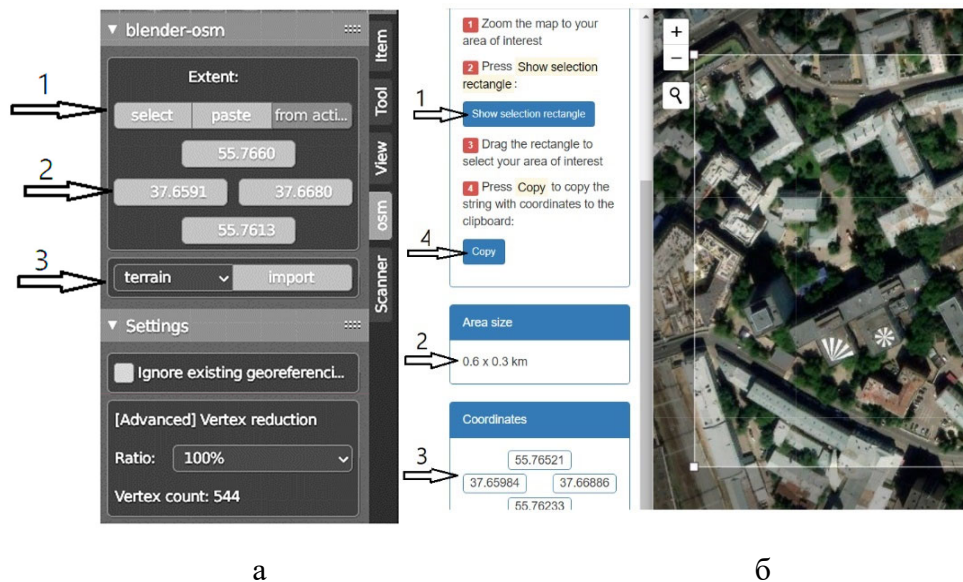


Рисунок Г.10 – Этапы импорта местности через OSM

Таким образом, модель формируется поэтапно. Первым этапом формируют рельеф (**terrain**) (рисунок Г.10, а_3) импортом данных из SRTM (**Get elevation**). Следующим шагом импортируются объекты местности из 3D OSM (**Open Street Map**), в которую можно включить по желанию здания, водные объекты, дорожную сеть и т. д.

Последним шагом в создании модели является текстурирование объектов модели спутниковым изображением (**Image overlay**) методом совмещения спутниковых снимков этой территории с моделью (Видео Крыша с спутниковых данных). Для операции формирования модели местности с наложенными спутниковыми изображениями создается новое окно, и по цепочке команд **Editor type -> UV Editor -> Browse image to be linked** выбираем опцию «наложение», стараясь не удалить его и не изменить ни расположение, ни имя, потому что программа будет вызывать космическое изображение каждый раз при открытии сохраненного проекта. Интерфейс процедуры наложения показан на рисунке Г.11.

В результате этой процедуры на «голую» модель территории накладываются текстуры космического снимка. На крышах, дорогах и дневной поверхности рельефа появляется наложенное спутниковое изображение объектов с характерными цветом, текстурой и освещением.

Для наложения спутниковых изображений на крыши и горизонтальные поверхности модели (рисунок Г.11, а) необходимо проделать следующее:

– «отделить» крышу от построек. В режиме редактирования - (**Edit mode**) по цепочке команд **Material properties -> Roof -> Select -> Separate (P)** выделяем целевые поверхности для текстурирования;

– добавить новое окно и выбрать вкладку, **Shade editor -> Use nodes**. Для открытия новой текстуры нажимаем **Ctrl t**. При этом автоматически всплывают три взаимосвязанных оконных меню (**Overlay, Mapping, Texture coordinate**), через которые можно добавить спутниковый снимок;

– совместить (наложить) спутниковое изображение с «голой» моделью без текстур посредством последовательной активизации опции **UV mapping (U) -> Project from view** с перемещением изображения, регулируя его масштаб, так чтобы совместить его с контурами крыш зданий модели.

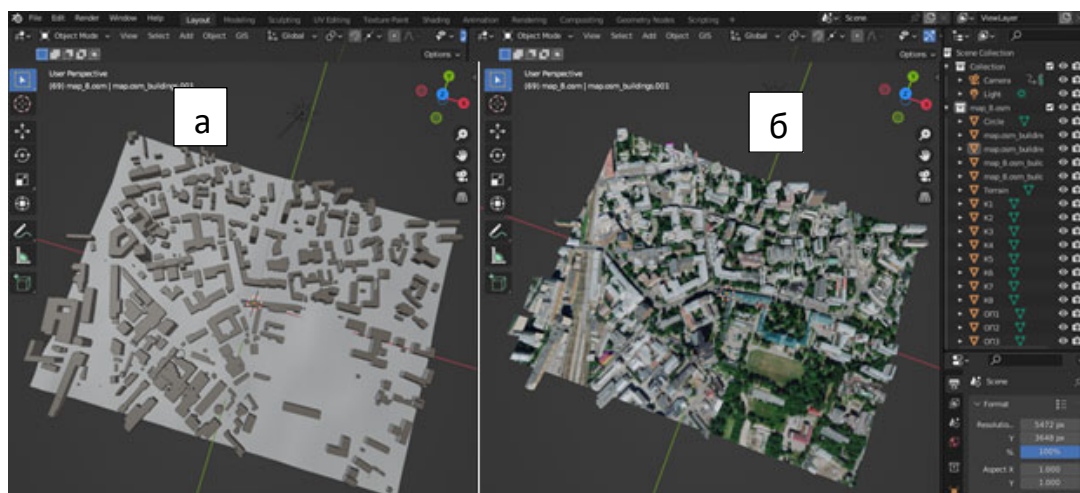


Рисунок Г.11 – Завершающий этап создания первичной (эталонной) модели местности

Что касается вертикальных частей зданий, то их текстура создается отдельно. В интернете имеется очень большой выбор текстур, большинство из которых доступны без лицензии. Мы рекомендуем использовать текстуры сайта **«textures.com»**. Для наложения текстуру на вертикальные элементы модели (стены) необходимо: (Видео Текстура к стенам):

– здания выбираем в режиме редактора (**Editor mode**) -> **UV mapping (U) -> Cube projection** (номер проекции – показатель масштаба текстуры на стенах);

– открываем новое окно – **Shade editor -> Use nodes -> Add -> Texture -> Image texture**, и из него добавляем текстуру стен согласно пути сохранения;

– можно добавить несколько текстур с более чем одним изображением стен и управлять освещением, цветом и масштабом.

На этом заканчивается формирование эталонной модели, в которой имеется рельеф поверхности, рельеф жилой застройки, зеленые насаждения и любые природные или промышленные объекты как показано на рисунке Г.12.



Рисунок Г.12 – Вид проекта после установления текстур

2.6 Создание и маркировка сети пунктов съёмочного обоснования на первичной модели

Важным этапом в технологии аэрофототопографической съемки являются работы по созданию на местности геодезического съёмочного обоснования в виде сети опорных точек, на основании которых уравниваются и масштабируются аэрофотоснимки, а также сеть контрольных точек, позволяющих оценить точность создания вторичной модели.

Это делается путем расстановки опорных и контрольных точек на первичной модели, изображение которых хорошо распознается на снимках. Для нашего примера мы выбрали «кубики» размерами 2 x 2 x 2 м, окрашенные в два цвета, как показано на рисунке Г.13, так, чтобы точка пересечения отличалась наименьшей площадью пикселя. На рисунке Г.13 показаны два вида маркировки знаков: слева маркер опорной точки выделенный желтым и зеленым цветом, а справа маркер контрольной точки, выделенный красным и зеленым цветом.

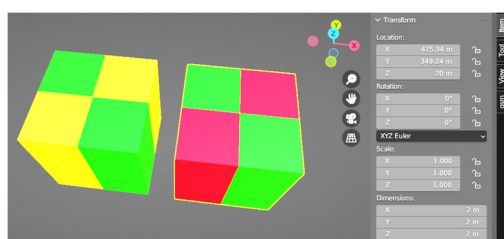


Рисунок Г.13 – Пример модели маркеров в качестве опорных(слева) и контрольных точек (справа)

Размещение на модели опорных и контрольных точек производилось в окне «Item -> Location» (рисунок Г.14, а) в соответствии с размерами первичной эталонной модели и особенностями ее рельефа. На рисунке Г.14, б показан вид контрольной точки на снимке.



Рисунок Г.14 – Расположение опорных (в красном круге) и контрольных (в желтом квадрате) точек на территории съемки (а) и опорная точка на местности (б)

В нашем примере было запланировано 6 опорных и 15 контрольных точек, расположение которых на первичной модели показано на рисунке Г.14, а их пространственные координаты представлены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Координаты опорных и контрольных точек на эталонной модели

	Обозн.	X, m	Y, m	H, m
Опорные точки	p1	-256.53	243.77	20.565
	p2	220.06	251.64	10.634
	p3	-275.01	-269.91	13.85
	p4	267.85	-269.3	1.64
	p5	-117.88	9.6257	13.4
	p6	157.37	-25.7	10.0
Контрольные точки	c1	-127.86	127.76	18.2
	c2	197.29	136.8	9.4
	c3	-80.841	-42.859	35.5
	c4	-224.49	-197.87	11.3
	c5	-49.369	-173.57	44.3
	c6	-165.74	-15.93	65.2
	c7	89.244	193.11	30.2
	c8	169.59	-163.78	25.3
	c9	-258.66	-110.49	14.32
	c10	-261.8	137.33	37.4
	c11	198.69	-225.06	19.0
	c12	72.878	68.624	43.3
	c13	27.994	-258.84	5.4
	c14	84.122	-62.138	14.5
	c15	312.09	7.6023	31.0

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ЦММ И ЦМР

3.1 Выбор оборудования для имитационной аэрофотосъемки созданной модели

После подготовки объекта съемки можно приступить к реализации имитационного моделирования аэрофототопографической съемки. Для этого необходимо определить (выбрать) съемочное оборудование и рассчитать основные параметры аэрофотосъемки. Для модельного примера нами выбрано и использовано в моделировании воздушной съемки БВС «DJI Phantom 4 Pro», которое комплектуется цифровой фотокамерой. Для нас важно, что модель «DJI Phantom 4 pro» может снимать до 4 кв. км за один полет.

Основные характеристики носителя и параметры фотосъемочной системы приведены в таблице Г.2.

Таблица Г.2 – Параметры съемочной системы на основе DJI Phantom 4 pro

Взлетный вес (не более), г	1391
Макс. высота полета, м.	6000 м
Макс. время полета, мин	до 30 мин
Съемочная камера	
Фокусное расстояние, мм	8,8 мм
Размер изображения, пиксель	4864×3648 (4:3), 5472×3648 (3:2)
Подвес (аэрофотоустановка)	
Стабилизация	3-осевая (наклон, поворот, сгибание)
Контролируемый диапазон	Наклон: от -90° до +30°
Угловая точность управления	± 0,02°

Параметры съемочной системы камеры необходимо вставить в соответствующие окошечки интерфейса настройки параметров камеры, которые имеют следующие значения: фокусное расстояние $f = 8,8$ мм (рисунок Г.15, б_3), размер фотоматрицы $X_n (l_x) = 8,61$ мм, $Y_n (l_y) = 12,91$ мм (рисунок Г.15, б_4) или в пикселах 3648 x 5472 (рисунок Г.15, а_2) при размере пикселя $\delta = 2,4$ мкм. Здесь же необходимо заранее указать место сохранения и формат получаемых снимков (рисунок Г.15, а_3 и рисунок Г.15, а_4).

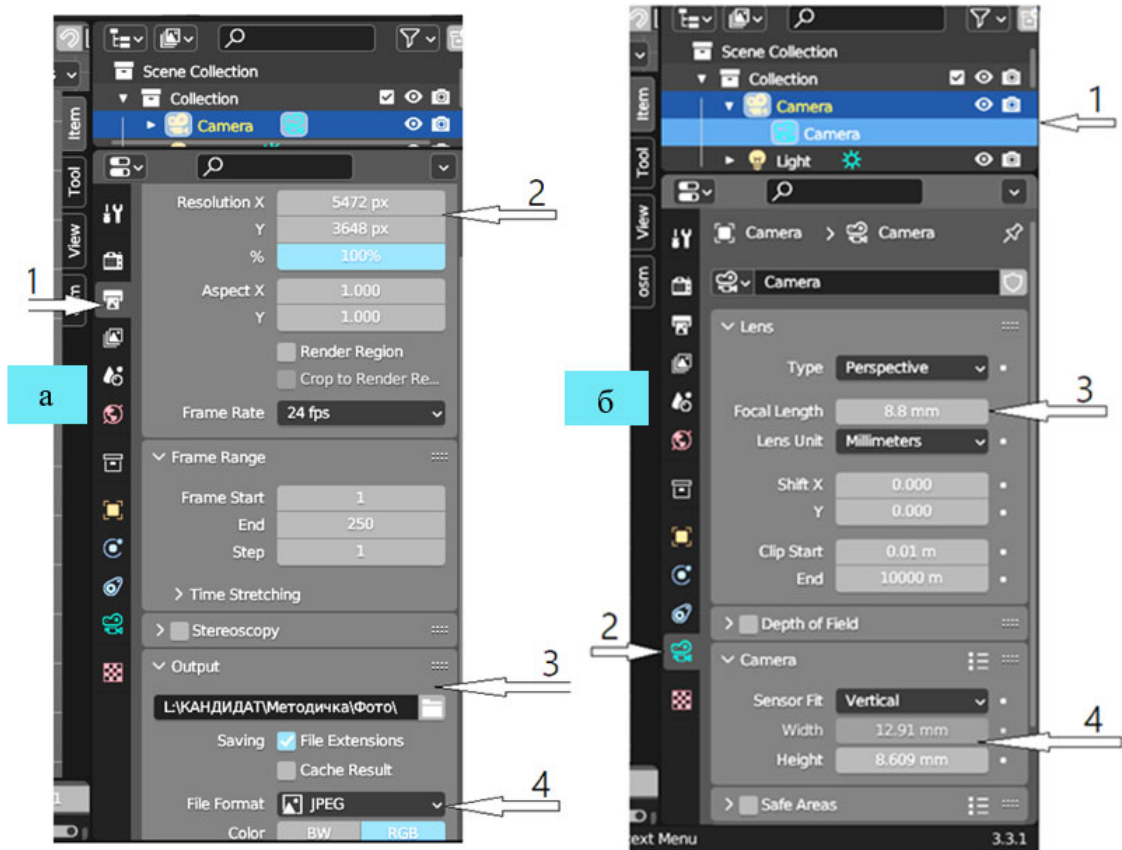


Рисунок Г.15 – Установка параметров съемочной камеры, типа файлов и место хранения виртуальных снимков

3.2 Расчет параметров съемки

Необходимо установить следующие параметры для аэрофотосъемки: высота съемки H_ϕ , продольный и поперечный базис фотографирования B_x и B_y , продольное и поперечное перекрытие снимков p_x и p_y , количество маршрутов N_y , количество снимков в маршруте N_x , а также время пролета базиса фотографирования. Расчет производится согласно существующим нормативным документам с учетом заданного линейного разрешения на местности (GSD), фокусного расстояния объектива камеры (f_k) и размера пикселя фотоматрицы (δ). Приведем расчет основных аэро-съемочных параметров:

а) расчетная высота фотографирования H_ϕ

$$H_\phi = 2R \cdot GSD \cdot \frac{f_k}{\delta},$$

где f_k – фокусное расстояние фотосистемы (м);

GSD – проекция пикселя матрицы ЦАФА на заданной поверхности (м);

R – разрешение на матрице (цикл. /пиксель)

δ – размер пикселя матрицы (м);

б) Расчетное продольное перекрытие аэрофотоснимков, p_x %

$$p_x = p_{x0} + \Delta p_h + \Delta p_n,$$

где p_{x0} – минимальное продольное перекрытие = 60%1

Δp_h – поправка за рельеф:

$$\Delta p_h = \Delta h \cdot \frac{(100 - p_{x0})}{H_\phi};$$

Δh – разность между самой высокой точки и самой низкой точки участка;

Δp_n – навигационная поправка за ошибку самолетовождения;

в) расчетное поперечное перекрытие аэрофотоснимков p_y % для масштаба 1 : 10 000 и крупнее:

$$p_y = 40 \% + \left(50 \times \frac{\Delta h}{100 \times H_\phi} \right);$$

г) продольный базис фотографирования, B_x (м)

$$B_x = \frac{(X_M \cdot M_\phi)(100 - p_x)}{100},$$

где $M_\phi = \frac{H_\phi}{f}$: знаменатель масштаба фотографирования;

д) поперечный базис фотографирования B_y (м)

$$B_y = \frac{(Y_\Pi \cdot M_\phi)(100 - p_y)}{100},$$

где X_Π, Y_Π – физический размер матрица (м);

е) Интервал фотографирования τ (сек):

$$\tau = \frac{X_M \cdot H_\phi}{f \cdot w} \cdot \frac{100 - p_x}{100},$$

где $X_{\text{п}}$ – физический размер фото матрицы вдоль линии полета (м);

W – путевая скорость БВС (м/с);

ж) Количество аэроснимков в одном маршруте N_x :

$$N_x = \frac{L_x}{B_x} + N_3; \quad N_3 = 4,$$

где L_x – длина участка съемки (м);

з) Количество маршрутов N_y :

$$N_y = \frac{L_y}{B_y} + 0.5 \cdot j; \quad j = 2,$$

где L_y – ширина участка (м).

В таблице Г. 3 приведены расчетные значения параметров съемки.

Таблица Г.3 – Параметры съемки

	Название элементов	Знач. элементов по участкам
Участок съемки	Длина участка (L_x), км	0.6
	Ширина участка (L_y), км	0.6
	Максимальная высота участка, м	360
	Минимальная высота участка, м	300
	Высота среднего уровня участка, м	330
	Абсолютная высота полета, м	516
Параметры фотокамеры	физический размер матрицы (l_x, l_y) мм	8,61
		12,91
	размер изображения (X_i, U_i)	3 648
		5 472
	Фокусное расстояние f , мм	8,8
размер пикселя, мкм	2,4	
Параметры аэросъемки	Ground Sample Distance (GSD) м	0,05
	знаменатель масштаба фотографирования	22 000
	высота съемки (H_f), м	185
	заданное (минимальное) продольное перекрытие ($p_{\text{хо}}$) 60%	60
	поправка за рельеф (Δp_h), м	13
	навигационная поправка за ошибку самолето- товождения (Δp_n), м	4
	Расчетное продольное перекрытие аэрофото- снимков, (p_x) %	77
	Скорость БВС (W , м/сек)	15

Окончание таблицы Г.3

	Название элементов	Знач. элементов по участкам
	Расчетное поперечное перекрытие аэрофото-снимков (p_y)	56
	Продольный базис фотографирования (B_x), м	42
	Поперечный базис фотографирования (B_y), м	120
	Интервал фотографирования (τ) секунд	2,81
	Количество аэроснимков в одном маршруте (N_x)	18,22
	Количество маршрутов (N_y)	6
	Общее количество аэроснимков на участке (N)	125
	Общая длина маршрутов на участке, км	3,58
	размер захвата на местности, (D_x, D_y) м	182,4
		273,6

3.3 Проектирование маршрутов съемки

В нашем примере, исходя из таблицы Г.3, отметим, что количество маршрутов равно шести. Начальная точка (точка 1) устанавливается как начало съемки, очевидно, определяется координатами левого верхнего угла первичной модели, $X_1 = -300$ м, $Y_1 = -300$ м, $Z_1 = 185$ м, записываются координаты этой точки в программе через **Item** → **location** → **rotation** → **Insert KeyFrame**.

Поскольку направление полета на первом маршруте запад-восток с курсом 90 градусов, координаты второй и последующих точек вычисляем с учетом скорости БВС и длины маршрутов.

Учитывая, что заданная скорость равна БВС 60 км/час (или 15 м/с), он преодолевает расстояние 600 м (длина маршрута) за 40 секунд (или за любое дискретных число шагов «Steps» в действиях Blender для упрощения расчета.

Расчетной интервал фотографирования 2,8 секунды, чтобы убегать от десятичных чисел, сменяем шкал времени (40 секунд = 100 шагов), и интервал фотографирования становится 7 шагов в «Blender».

Остальные поворотные точки показаны всего залета (6 маршрутов) показаны в таблице Г.4 с учетом того, что время перехода между маршрутами установлено как 2,8 секунды (7 шагов) в связи с тем, это время расчетного интервала (шага) фотографирования. Поэтому за «время разворота» на

следующий маршрут не будет произведен снимок, а новые снимки будут к началу следующего маршрута. (Видео Маршруты и ключевые точки).

Таблица Г.4 – Координаты начала и концов маршрутов съемки и время прохождения маршрута

№ (key frame)	(frame) шаг (Step)	X (м)	Y, м	Z (H _ф), м
1	0	-300	300	185
2	100	300	300	185
3	107	300	180	185
4	207	-300	180	185
5	214	-300	60	185
6	314	300	60	185
7	321	300	-60	185
8	421	-300	-60	185
9	428	-300	-180	185
10	528	300	-180	185
11	535	300	-300	185
12	635	-300	-300	185

На рисунке Г.16 показаны маршруты и ключевые (поворотные) точки, которые в интерфейсе программы не высвечиваются, а изображены в условном виде в нижнем окне вертикальными линиями.

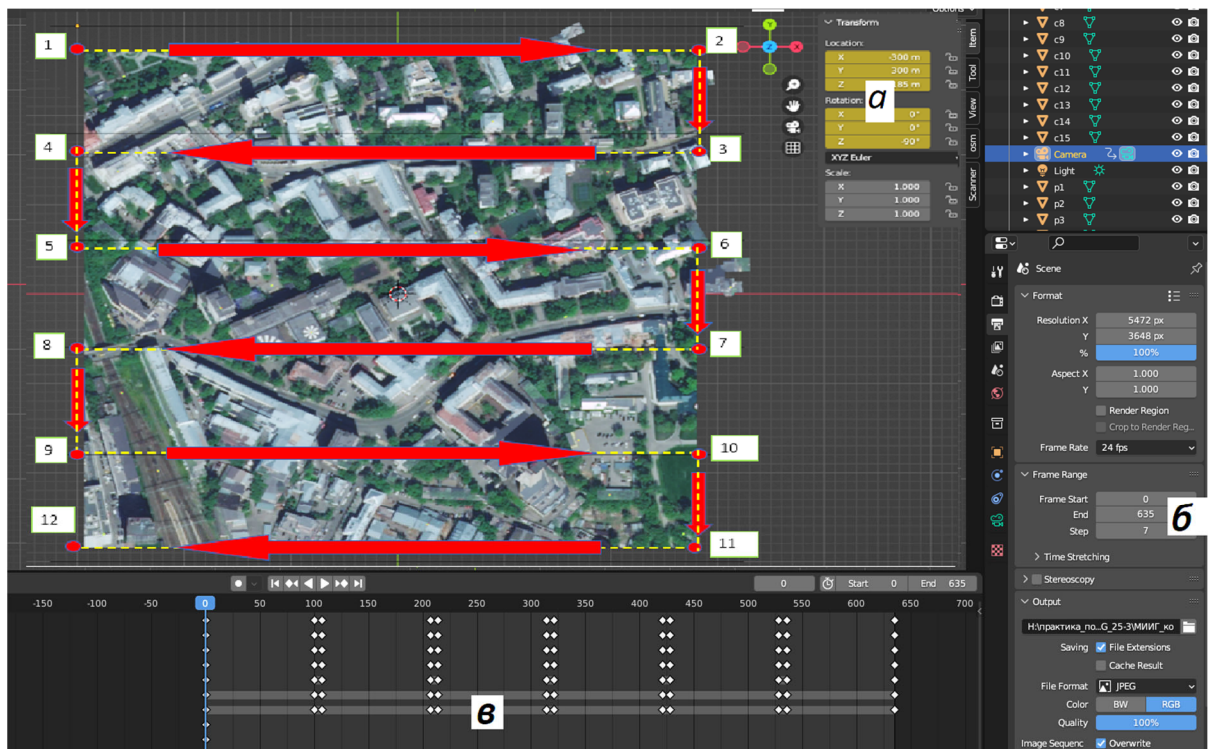


Рисунок Г.16 – Установка ключевых (поворотных) точек маршрутов (insert keyframes)

Следует обратить внимание на установку опции равномерно-прямолинейного режима полета БВС (с камерой), нажав правую кнопку в окне (**Time line**), и затем выбрать **Dope sheet context menu** → **Interpolation mode** → **Linear**.

Таким образом, устанавливаются параметры съемки с точки зрения движения носителя с камерой, высоты полета БВС и фиксации координат точек фотографирования с большой точностью.

3.4 Проведение имитационного моделирования аэрофотосъемки

Необходимо сделать один фотоснимок (**Render** → **Render image**) для проверки освещения, ориентации камеры, маркеры и вида в целом.

Что касается полного моделирования процесса съемки, то анимация всего снимка через (**Render** → **Animation**). Программа Blender начинает создавать снимки в соответствии с заданными координатами и временным интервалом. Снимки хранятся в том месте, которое указал пользователь, и в указанном формате.

Полученные данные виртуальной съемки далее обрабатываются в одном из фотограмметрических программных средств.

3.5 Фотограмметрическая обработка виртуальных снимков

Помимо процессов моделирования самой съемки, чрезвычайно важным исходным условием моделирования аэрофототопографической съемки является выбор одного или нескольких вариантов программ фотограмметрической обработки, которые подключаются в схему моделирования, аэрофототопографического метода создания ЦММ.

Для обработки снимков в программе (Видео добавить фото и обработка в AGISOFT):

1 – добавить снимки полученные имитационного моделирования путем:

Файл → **Обработка** → **Добавить снимки**;

2 – добавить параметры обработки камеры путем:

Инструменты → **Калибровка камеры** → **Размер пикселя и фокусное расстояние**.

Размер пикселя определяется от деления размера матрицы на размер изображений, и в нашем случае это равно:

$$12,9139/5472 = 0,00236 \text{ мм}; 8,609/3648 = 0,00236 \text{ мм};$$

$$\text{фокусное расстояние} = 8,8 \text{ мм}.$$

Загрузить файл параметра калибровки камеры:

Тип → Автоматический → Зафиксированные все параметры → Ок → Сохранить программу.

После этого можно обрабатывать снимки

(Обработка → Выровнять снимки, выбрать точность)

В результате будет облако точек.

Следующие два примера (рисунок Г.17), – на результат обработки снимков в идеальных условиях и реальных условиях.

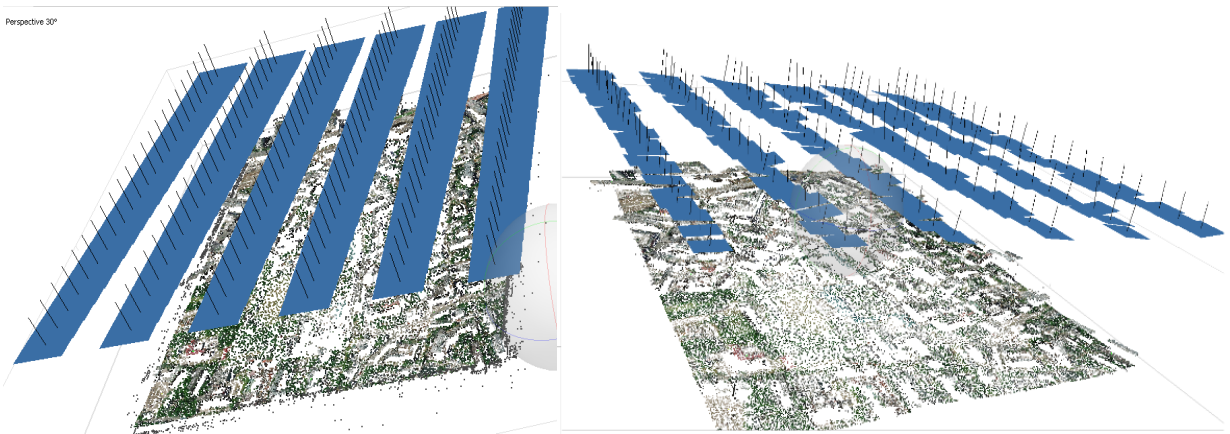


Рисунок Г.17 – Вид снимок слева в идеальных и справа в реальных условиях в аэрофотограмметрической программе (AGISOFT)

После этого опорные точки (на основании которых изменяется масштаб модели) расставляют по своим местам, определяя область, в которой находится маркер.

(Прямоугольное выделение – Фильтровать по точки).

Появляются все снимки, включающие в себя выделенную область, ищем маркеры на снимке и добавляем новую метку (**Добавить маркер**), открываем остальные снимки и пытаемся поставить маркеры на правильном месте во всех снимках.

Повторяем тот же процесс для всех опорных точек и называем их тем же именем, в котором опорные точки были сохранены в текстовом файле (координаты опорных точек в программе Blender).

Затем опорные точки импортируются следующим образом: (**Привязка - импортировать привязку**) в место сохранения текстового файла, содержащего опорные точки, и мы должны обратить внимание на порядок координат и порядок строк и столбцов в импортируемом файле так, чтобы они совпадали с записями в программе Agisoft metashape.

Затем, чтобы модель приняла реальные размеры всех точек облака точек, нажать (**Обновить привязку**) (рисунок Г.18).

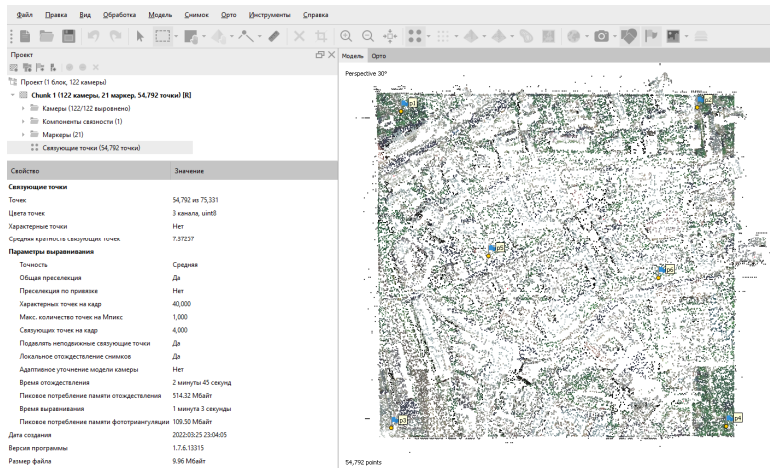


Рисунок Г.18 – Уравнить и масштабировать снимки по координатам наземных опорных точек

Следующим шагом является построение плотного облака точек (**Обработка → Построить плотное облако точек → Качество → Ок**).

После обработки, которая требует времени, образуется плотное облако, количество точек можно посмотреть на вкладке (**Проект**) и сравнить с количеством точек неплотного облака точек (рисунок Г.19).

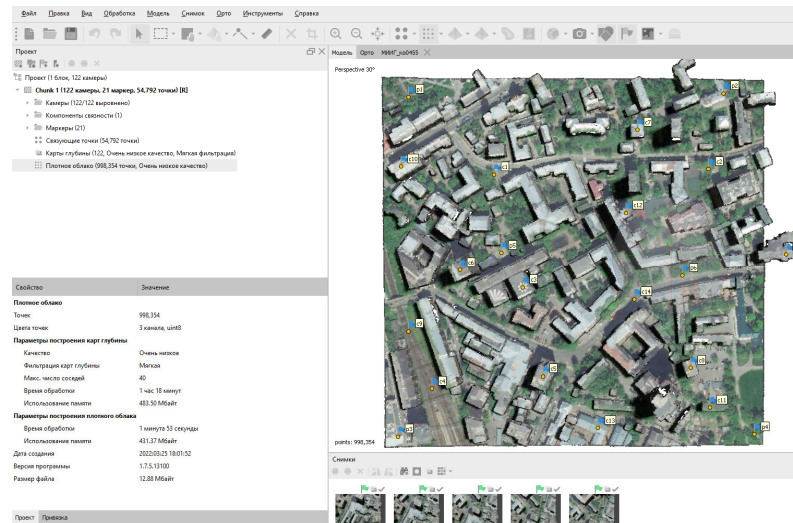
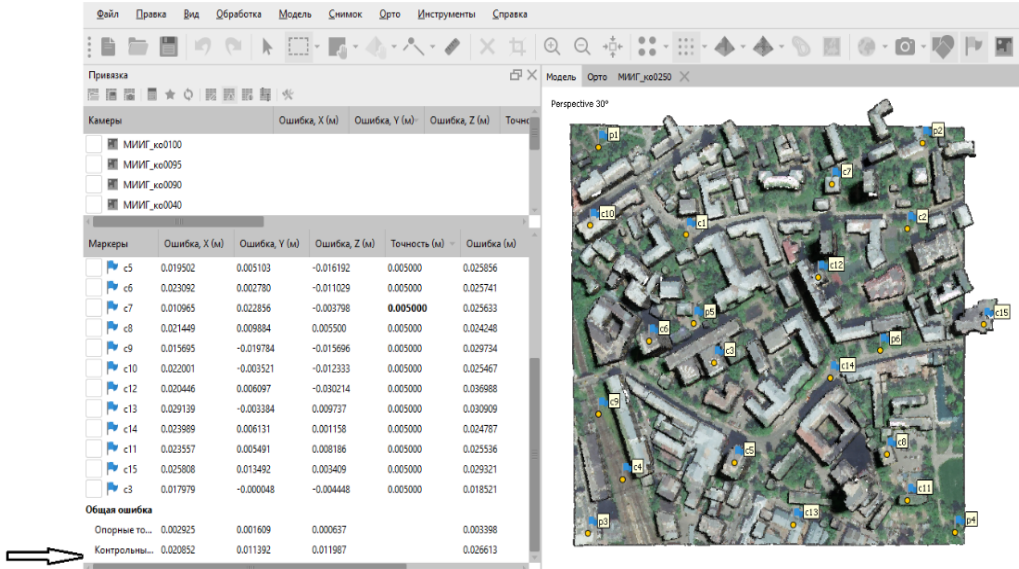


Рисунок Г.19 – Построение плотного облака точек

Контрольные точки могут быть импортированы в проект. Они будут расположены рядом с их координатами, с простой ошибкой, являющейся ошибкой создания цифровой модели, измерение которой возможно либо путем сопоставления импортируемых точек с центрами контрольных точек, и в этом случае ошибка автоматически рассчитывается в программе Agisoft: (**Привязка → Просмотр ошибок → Маркеры → Ошибка**) (рисунок Г.20), либо добавляя новые

точки в места отметок контрольных точек, а затем сравнивая координаты этих точек с координатами контрольных точек, разница между которыми считается ошибкой цифровой модели.



Камеры	Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Точность	Ошибка (м)
<input type="checkbox"/> МИИГ_кx0100					
<input type="checkbox"/> МИИГ_кx0095					
<input type="checkbox"/> МИИГ_кx0090					
<input type="checkbox"/> МИИГ_кx0040					
Маркеры	Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Точность (м)	Ошибка (м)
<input type="checkbox"/> c5	0.019502	0.005103	-0.016192	0.005000	0.025856
<input type="checkbox"/> c6	0.023092	0.002780	-0.011029	0.005000	0.025741
<input type="checkbox"/> c7	0.010965	0.022856	-0.003798	0.005000	0.025633
<input type="checkbox"/> c8	0.021449	0.009884	0.005500	0.005000	0.024248
<input type="checkbox"/> c9	0.015695	-0.019784	-0.015696	0.005000	0.029734
<input type="checkbox"/> c10	0.022001	-0.003521	-0.012333	0.005000	0.025467
<input type="checkbox"/> c12	0.020446	0.006097	-0.030214	0.005000	0.036988
<input type="checkbox"/> c13	0.029139	-0.003384	0.009737	0.005000	0.039009
<input type="checkbox"/> c14	0.023989	0.006131	0.001158	0.005000	0.024787
<input type="checkbox"/> c11	0.023557	0.005491	0.008186	0.005000	0.025536
<input type="checkbox"/> c15	0.025808	0.013492	0.003409	0.005000	0.029321
<input type="checkbox"/> c3	0.017979	-0.000048	-0.004448	0.005000	0.018521
Общая ошибка					
Опорные то...	0.002925	0.001609	0.000657		0.003398
Контрольные...	0.002852	0.011392	0.011987		0.026613

Рисунок Г.20 – Ошибки модели по контрольным точкам

Следующий шаг – построить модель и текстуры (**Обработка** → **Построить модель (Текстура)** → **Ок**) (рисунок Г.21).

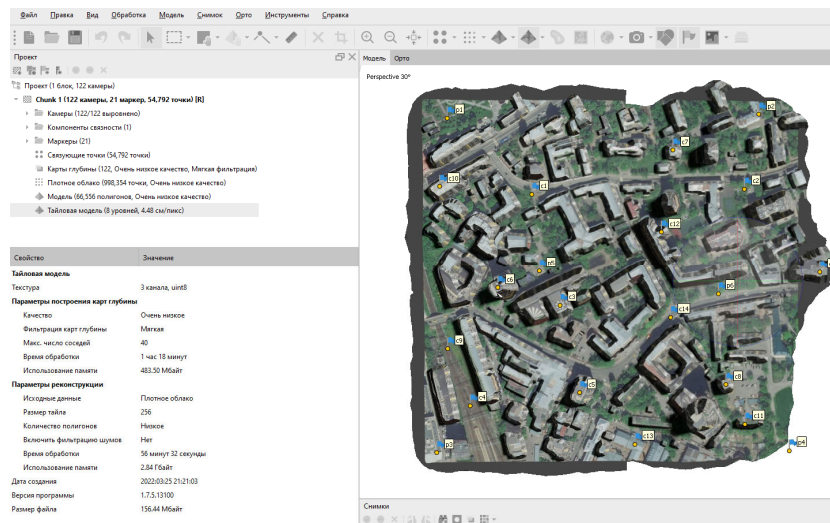


Рисунок Г.21 – Построение модели и текстур

Теперь можно построить цифровую модели местности (**Обработка** → **Построить ЦММ**) (рисунок Г.22).

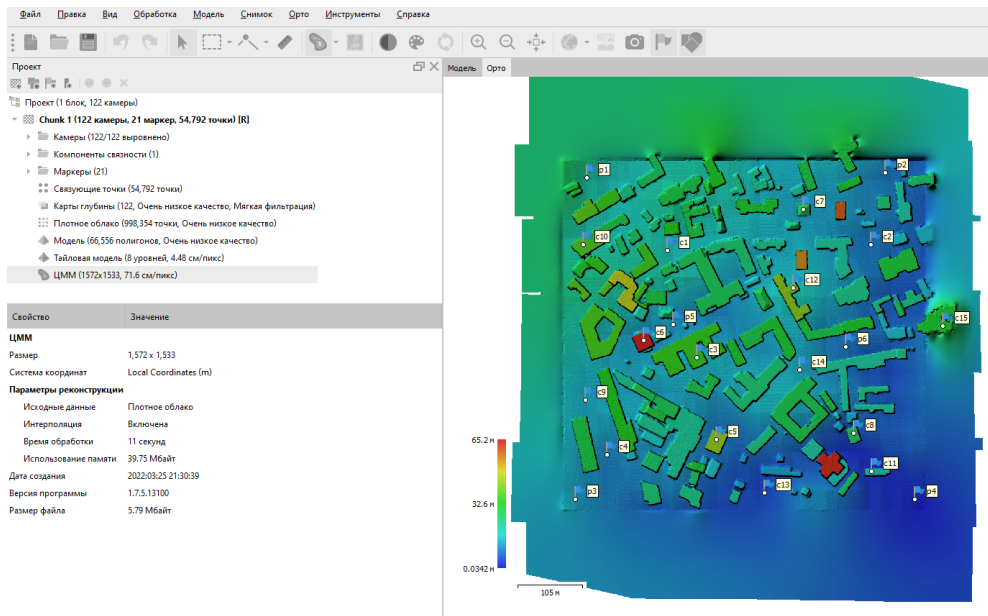


Рисунок Г.22 – Построение цифровой модели местности

Последний этап построение ортофотоплана (рисунок Г.23).

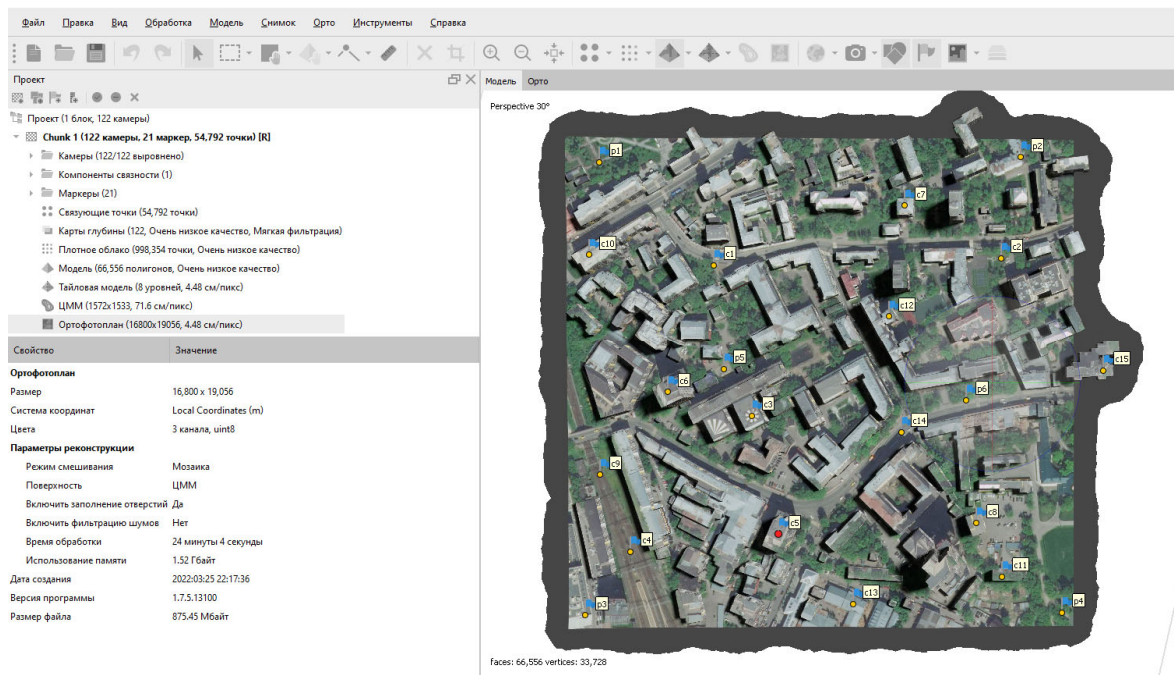


Рисунок Г.23 – Построение ортофотоплана

По окончании обработки возможно получить отчет по всем этапам работы через (**файл – Экспорт – Создать отчет**), в котором содержится подробная информация о каждом этапе работы, спецификации площади, параметрах используемого оборудования, количестве облака то-

чек, ошибке в опорных и контрольных точках, в метрах и пикселях, а также дополнительная подробная информация.

3.6 Изучение влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы БВС

Можно ввести некоторые параметры движения камеры, такие как шум, случайные или статистические ошибки скорости самолета, его высоты и его координаты в момент фотографирования (элементы внешнего ориентирования) или элементы внутреннего ориентирования, такие как фокусное расстояние и координаты главной точки.

Добавление внешних эффектов происходит следующим образом (Видео: Добавить случайные погрешности): **Editor type** → **Graph editor** → **Modifiers** → **Add modifier** → **Noise** → **Replace**.

Затем выбираются значение, масштаб, смещение и тип шума (рисунок Г.24).

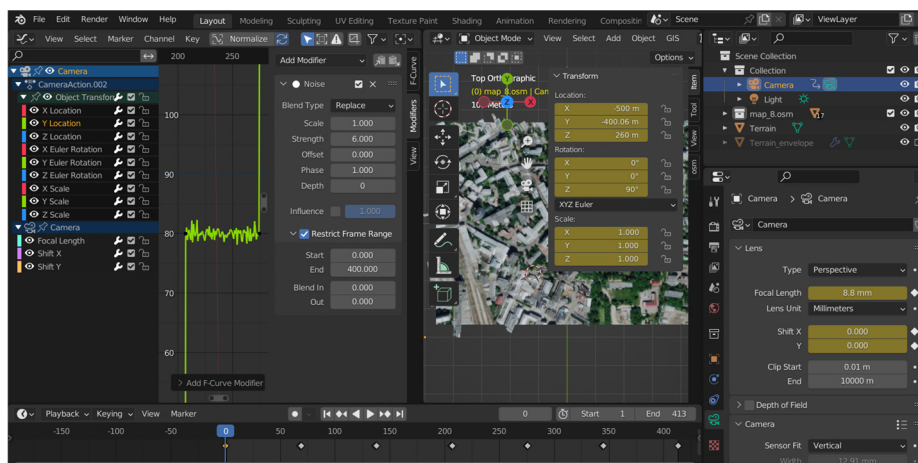


Рисунок Г.24 – Ввести погрешности в съемочные параметры

При имитационном 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.

Очевидным преимуществом такого подхода в выборе оптимальных параметров аэрофото-съемочного процесса является его простая реализация, перебор всех разумных параметров съемки с возможными (случайными) отклонениями от заданных и, главное, экономия времени

и средств по сравнению с экспериментальными реальными съемками для тех же целей. Кроме того, компьютерное имитационное моделирование обладает высокой точностью и наглядностью воспроизводимых результатов.

К переменным параметрам съемки, изменения которых существенно влияют на точность конечной модели, относятся:

- координаты центров проекций снимков, точек фотографирования $S(X_s, Y_s, Z_s)$ и погрешности их определения;
- высота фотографирования $H_\phi = Z_s$ и погрешность ее выдерживания;
- угловые элементы внешнего ориентирования снимков $A(\alpha, \omega, \kappa)$;
- элементы внутреннего ориентирования снимков (фокусное расстояние камеры (f_k) и параметры дисторсии, размер пикселя (p);
- метеорологические условия (M), которые влияют на изменения скорости и устойчивость самолета;
- 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 т. д.

На рисунке Г.25 представлена блок-схема имитационного моделирования аэрофототопографического процесса, которая позволяет выявить и учесть влияние изменений каждого навигационного и съемочного параметра на конечную точность и производительность создания ЦММ.

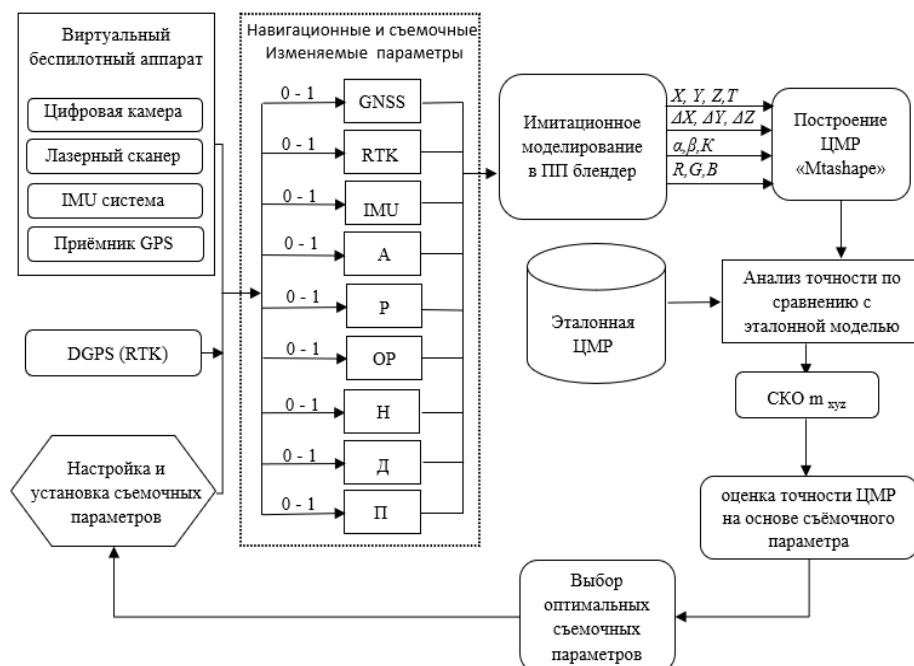


Рисунок Г.25 – Общая схема экспериментальных модельных аэрофотосъемок

Вход схемы — беспилотный аппарат со съемочным оборудованием.

В блоке навигационных и съемочных изменяемых параметров устанавливаются эти параметры в каждом процессе экспериментального моделирования.

Результатами являются цифровые модели местности, которые по измерениям координат контрольных точек сравниваются с эталонной моделью, таким образом выводя влияния отсутствия или различия указанного параметра, и в результате, оптимальные съемочные параметры определяются.

Выдерживание навигационных параметров будет изменяться оператором в режиме имитационного моделирования во время предполагаемой аэросъемки.

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 результатом идеальной съемки и съемкой с моделью, полученной по результатам фотосъемки с искусственно введенными случайными отклонениями в навигационные параметры аэрофотографирования (с распределением по закону Гаусса – шумом), можно выбрать оптимальный набор параметров для достижения заданного результата.

На рисунке Г.26, для иллюстрации корректной реализации процесса имитационного моделирования приведены результаты «проведения» АФС с набором параметров съемки, соответствующих варианту наличия наземных опорных точек (красный цвет) и варианту отсутствие этих точек на земле, и использование вместе их координат центров фотографирований (зеленый цвет), и связанные с этим вариантами погрешности по точности построения ЦММ на контрольных точках (с1-с9).

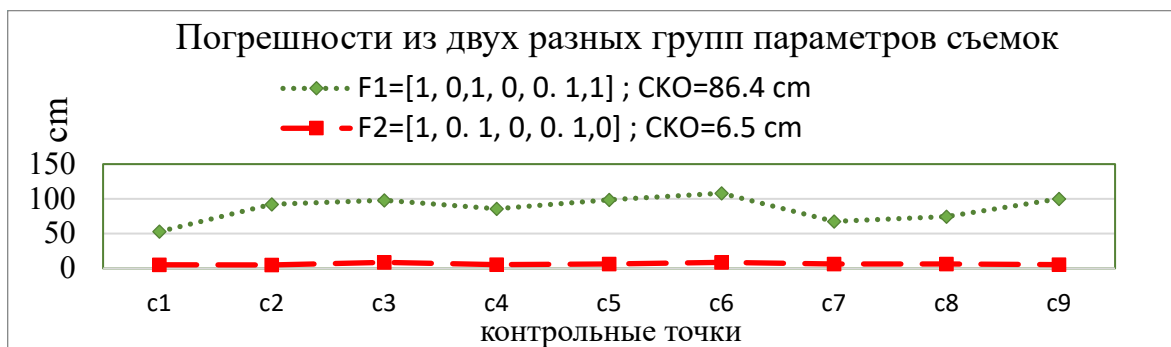


Рисунок Г.26 – Среднеквадратические ошибки в двух «экспериментальных съемках»

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ МЕСТНОСТИ

4.1 Моделирование параметров лазерного сканирования российского сканера АГМ-МС1

Аналогичным образом был привлечен для моделирования лазерный сканер, приспособленный для использования на платформах малогабаритных БВС.

В программу Blender (также в Sidebar), можно добавить эмулятор лазерного сканера, получивший название Scanner.

Для версии 2.93.1 добавить сканер следующим образом (main) (рисунок Г.27).

Запустить командную строку (**Cmd**) от имени администратора и написать следующую команду:

"C:\Program Files\Blender Foundation\Blender 2.93\2.93\python\bin\python.exe" -m pip install laspy h5py pascal_voc_writer pypng pyyaml pypng.

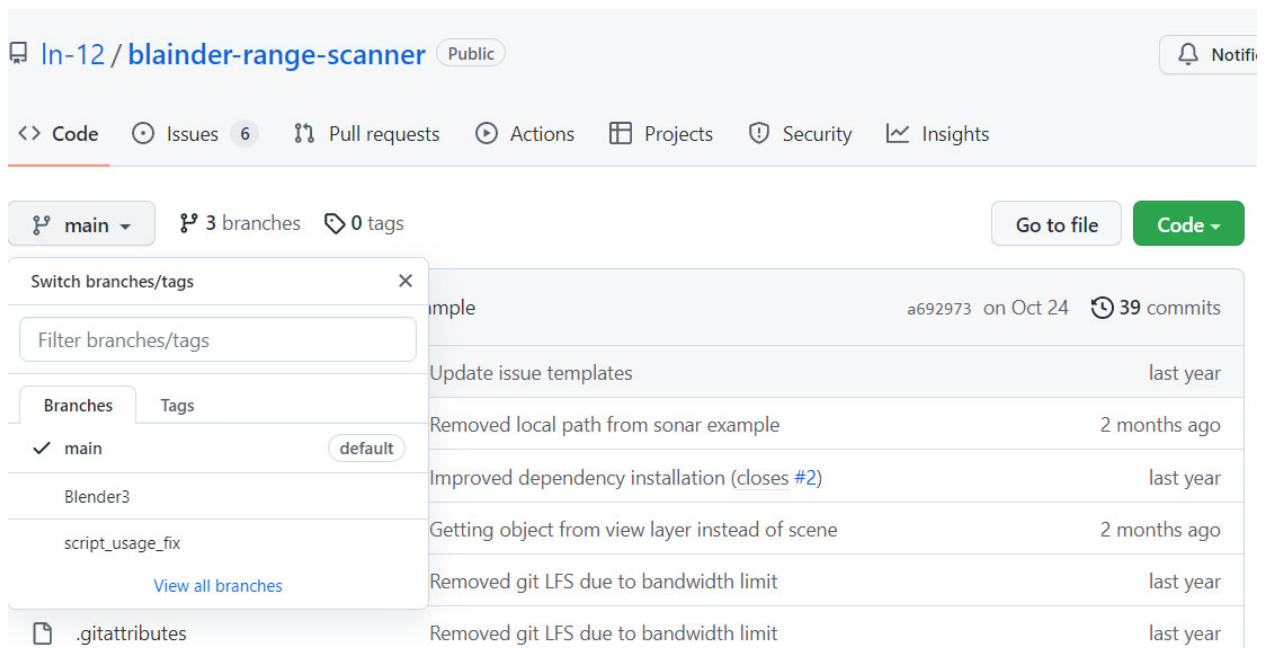


Рисунок Г.27 – Добавить код лазерного сканера

Что касается версии 3.3.1, которая пока находится в разработке, то добавление осуществляется с помощью субиндикации (**Branches**), затем следует написать следующие команды в командной строке (**Cmd**) запуск от имени администратора:

Call d: " вызов диска d или любой доступный диск "

Mkdir install_lidar " Создать папку install_lidar или любое имя, чтобы скачать нужные файлы в ней"

Cd install_lidar " Сделать эту папку install_lidar, папка среды работы "

Git clone <https://github.com/ln-12/blainder-range-scanner.git> "Использовать программное обеспечение "git" для копирования кода "Add-on". Обязательно установите программное обеспечение git перед началом работы"

Cd blainder-range-scanner "Просмотр содержимого папки blainder-range-scanner которая уже скачалась в папку install_lidar"

Git checkout Blender3 "Код включает в себя несколько веток, основная ветка кода предназначена для работы с Blender 2.93, поэтому необходимо изменить ветку на ветку совместимую с Blender 3.3 путем выполнения следующей команды"

Cd range_scanner "Просмотр содержимого папки range_scanner"

"C:\Program Files\Blender Foundation\Blender 3.3\3.3\python\bin\python.exe" -m pip install -r requirements.txt "Затем мы используем Python, поставляемый с дистрибутивом Blender, для автоматической установки требований к надстройке и необходимых для корректной работы копий через этой командой"

Затем мы сжимаем файл «range_scanner» в формат .zip.

После этого загружаем сжатый файл в программу Blender через: **Edit -> Preferences -> Add-ons**, появляется новую функцию под названием «scanner» (рисунок Г.28)

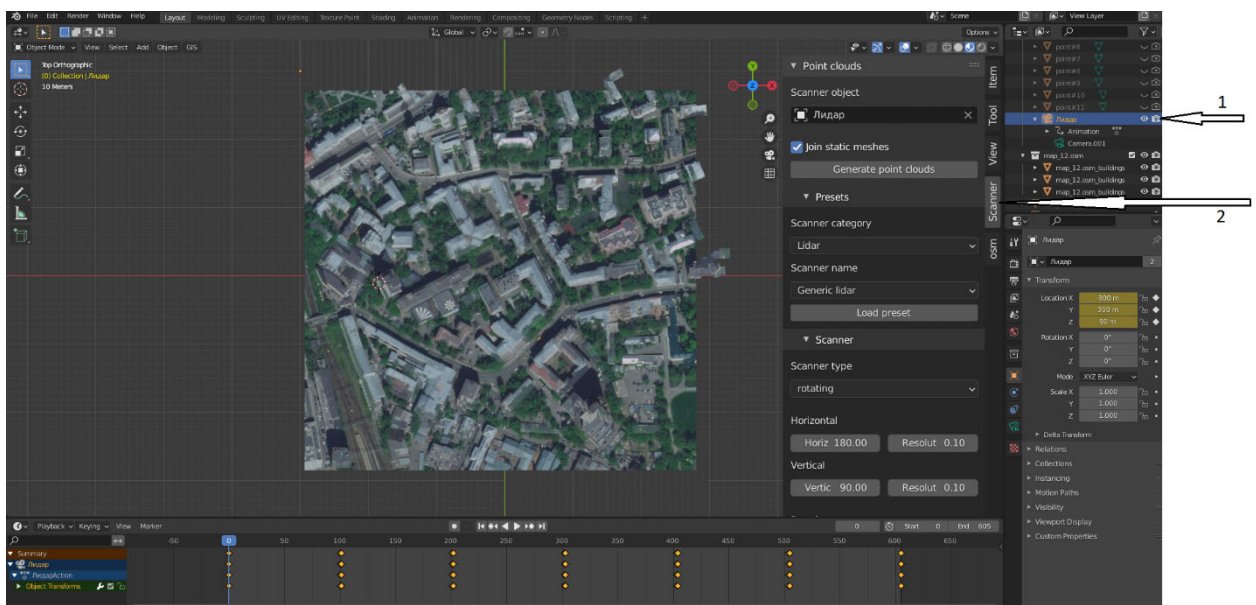


Рисунок Г.28 – Расположение эмулятора лазерного сканера в программе

Моделирование аэросъемки возможно как при помощи цифровой камеры отдельно, так и с помощью лазерного воздушного сканера, и в результате двух способов будет облако точек.

Установленные первоначальные настройки и значения выглядит следующим образом (рисунок Г.29).

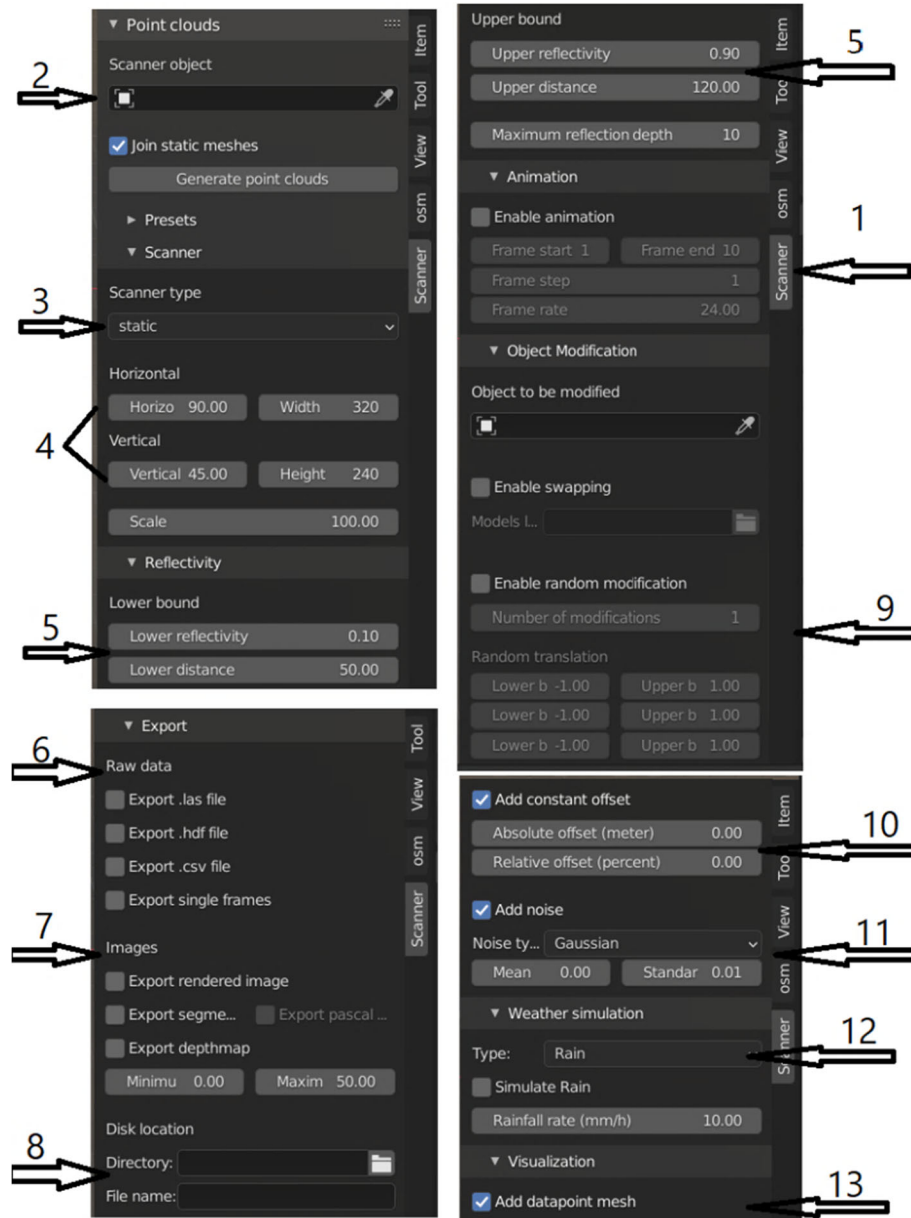


Рисунок Г.29 – Функции и установка параметров лазерного сканера : 1 – Scanner: эмулятор лазерного сканера; 2 – Scanner object: определить элемент, который играет роль сканера (например, можно добавить новую камеру и определить ее как сканер); 3 – Scanner Type (Static, **rotating**, sideScan): выбрать тип сканера; 4 – horizontal and vertical field of view in degree, установить угол обзора и разрешение в градусах; 5 – lower bound, upper bound, определить минимальное и максимальные значения отражательных углов и дальность; 6 – raw data: выбрать тип и расширения файлов; 7 – images: выбрать тип и расширения фото; 8 – disk location, directory, file name: указывается название и место сохранения файлов; 9 – enable random modification: активировать случайное изменение; 10 – add constant offset: добавить постоянное (систематическое) смещение; 11 – add noise: внести случайные погрешности по закону Гаусса; 12 – weather simulation (rain, dust): моделирование метеостанции и погода (дождь и пыль); 13 – add datapoint mesh: добавить сетку точек данных (всегда должно активировано)

Исходными данными для имитации лазерно-локационной съемки является та же территория, которая являлась базовой для моделирования аэрофототопографической съемки.

Использованы параметры российского лазерного сканера АГМ-МС1 от компании «АГМ Системы». Сканер отличается малым весом, что позволяет в зависимости от задач устанавливать его на различные летательные аппараты, в том числе БВС любого типа. Основные характеристики представлены в таблице Г.5.

Таблица Г.5 – Характеристики воздушного лазерного сканера АГМ-МС1

Частота сканирования	600 кГц
Максимальная дальность	200 м
Угол поля зрения	360 градусов
Скорость вращения сканирующего зеркала	20 об/секунду
Точность определения дальности	3 см
Точность определения координат	3–5 см
Размеры сенсорного блока	120x116x112 мм
Вес сенсорного блока	1,2 кг
Источник питания	9–18 V, 1.3 A
Температура использования	-10...+50 °С

После установки значений эмулятора пропорционально требуемому сканеру и задания маршрута для сканера аналогично как с цифровой камерой (в нашем примере камера и сканер считались расположенными на одном БВС), начинается процесс сканирования. Нажав кнопку (Generate point clouds), надо создать облака точек.

На рисунке Г.30 показан результат имитационного моделирования процесса лазерного сканирования той же области с помощью симулятора лазерного сканера типа АГМ-СМ1, который представляет собой облако точек (кампус МИИГАиК), экспортированное с инструментарием программы Blender в специализированное ПО «CloudCompare» для обработки и визуализации.

Облако также можно экспортировать как проект, модель или разные форматы, на вкладке «File- Export» следующим образом (рисунок Г.31).

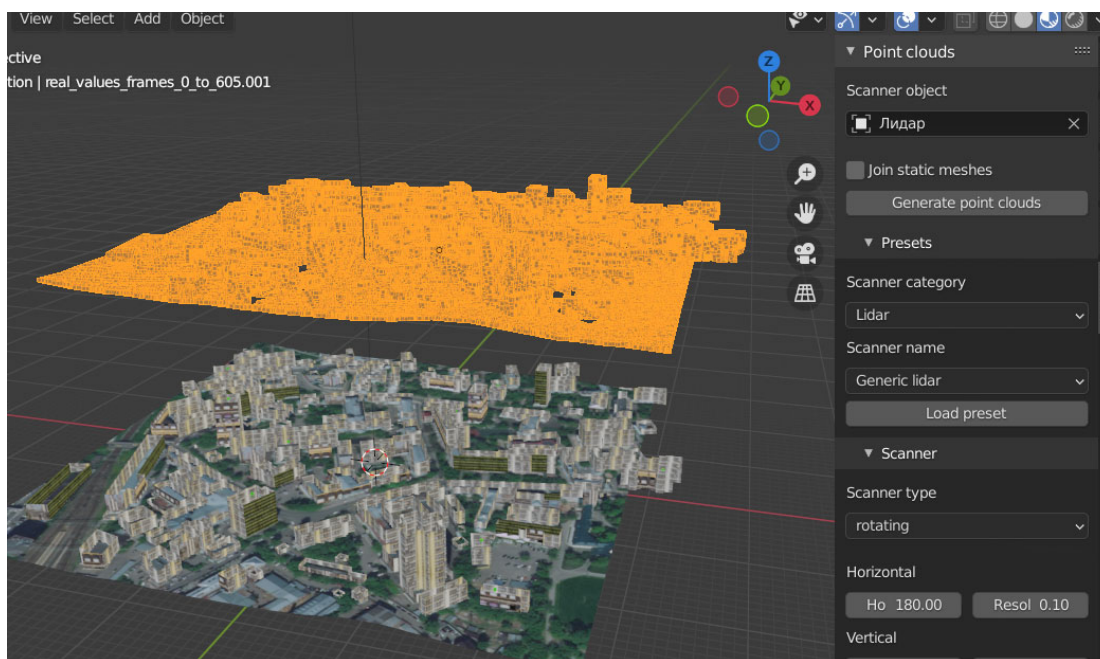


Рисунок Г.30 – Облако точек кампуса МИИГАиК, полученное лазерным сканером

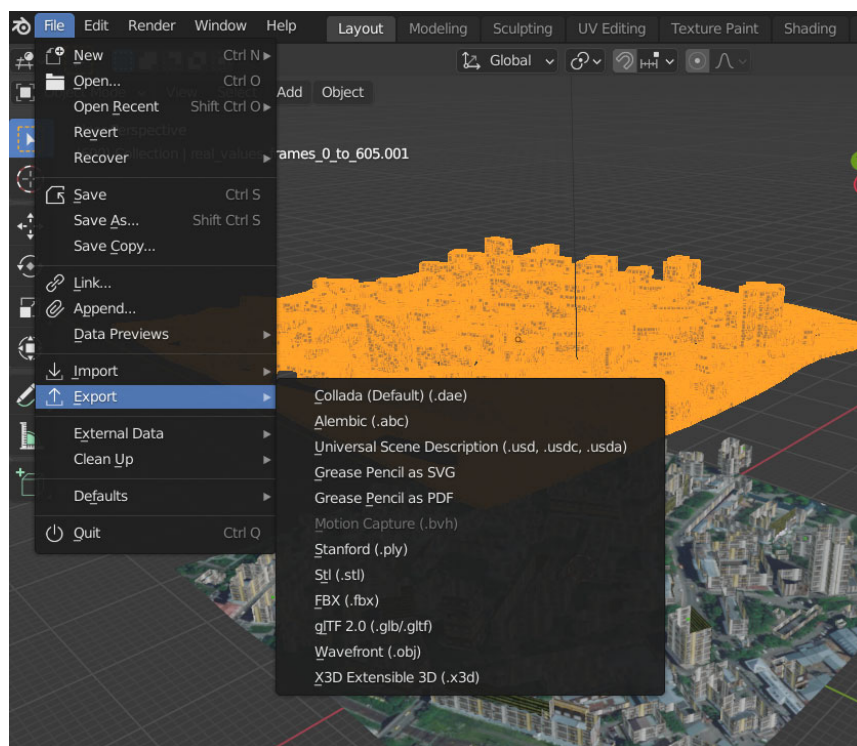


Рисунок Г.31 – Экспортировать облака точек в разные форматы

4.2 Обработка и отображение цифровой формы в облачной программе сравнения

Визуализация и экспорт данных. Результатом имитационного моделирования аэро-съемки и лазерно-локационной съемки является облако точек. Для обработки и визуализации

в других программах требуется экспорт в виде сохраняемого файла. Облако точек состоит из записей данных для каждой точки, каждая из которых содержит следующую информацию:

- положение точки в пространстве (координаты X, Y и Z);
- семантическая метка;
- интенсивность измерения точки;
- спектральная яркость точки;
- расстояние между датчиком и поверхностью объекта.

Данные ВЛС в ПО «Blender» можно экспортировать в другие программные средства посредством файлов в форматах *.ls, *.hdf, *.csv.

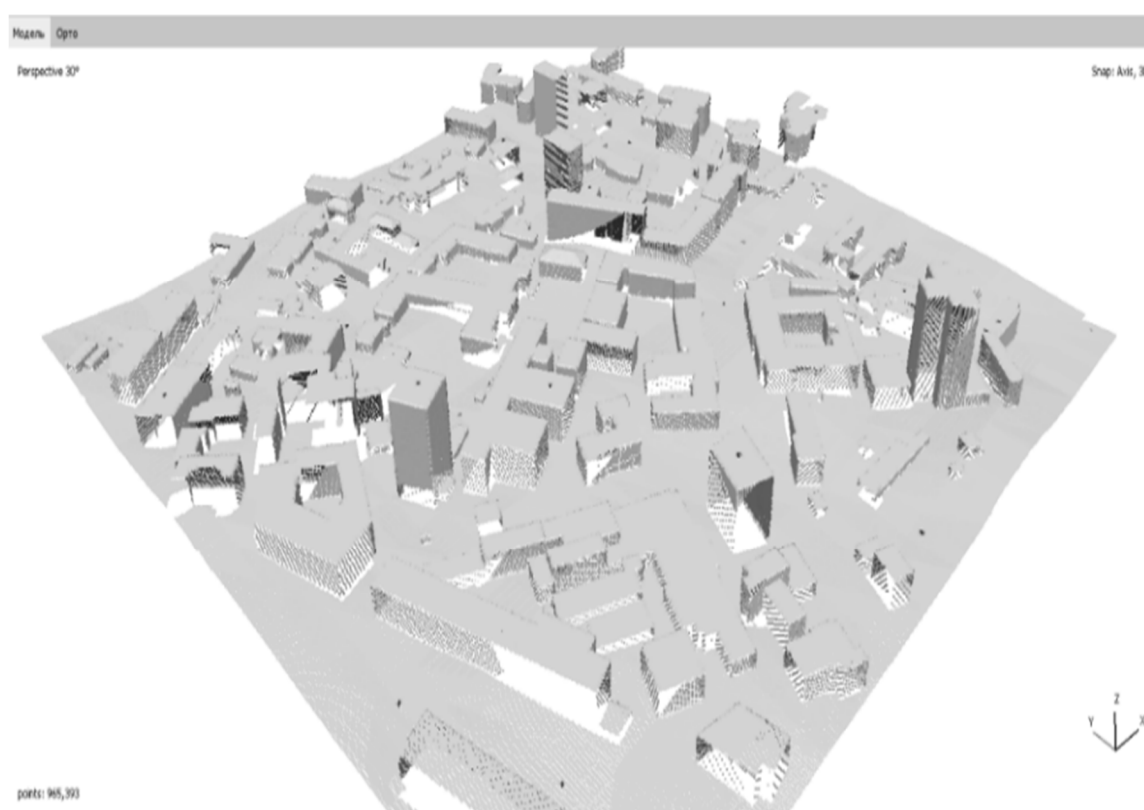


Рисунок Г.32 – Облако ТЛО, полученных при моделировании лазерно-локационной съемки кампуса МИИГАиК

В результате моделирования процесса сканирования с высоты, как и при аэрофотосъемке (185 м), было получено облако ТЛО в количестве 9513469 точек, среднее расстояние между которыми равно 20 см, то есть порядка 25 точек на кв. метр (рисунок Г.32). А с высоты 90 метров было получено облако ТЛО в количестве 31562727 точек (рисунок Г.33). Представленная ЦММ получена способом моделирования лазерного сканера

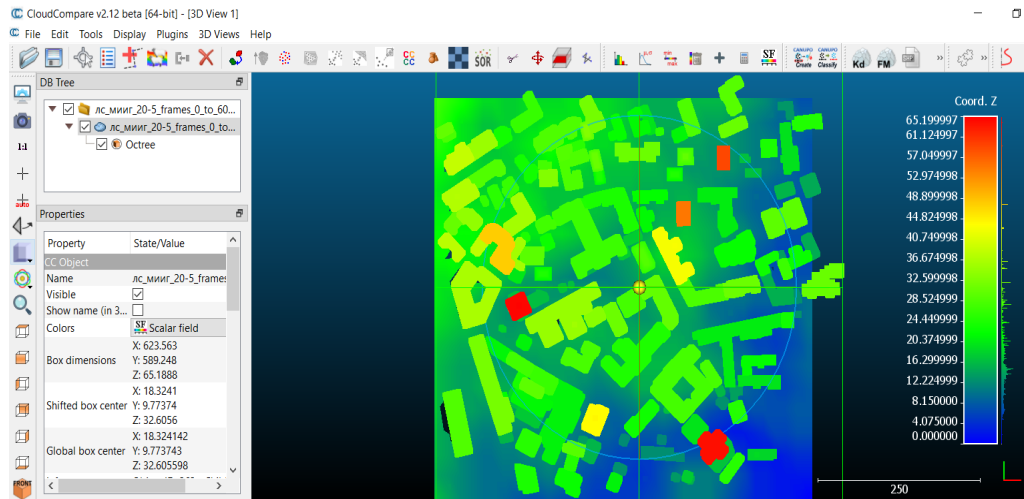


Рисунок Г.33 – ЦММ получена способом моделирования лазерного сканера