

Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени
К.И. Сатпаева

УДК 528.71

На правах рукописи

ЕРЖАНҚЫЗЫ АЙНУР

**Разработка методики и технологии создания ЦМР при проектировании и
реконструкции автодорог**

6D071100 – Геодезия

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
Рысбеков К.Б.
кандидат технических наук

Зарубежный научный консультант:
Левин Е. доктор технических
наук, профессор

Республика Казахстан
Алматы, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦМР.....	11
1.1 Современное состояние методов сбора геопространственных данных для создания ЦМР	30
1.1.1 Создание ЦМР с помощью тахеометрической съемки	16
1.1.2 Создание ЦМР с помощью ГНСС технологии	17
1.1.3 Создание ЦМР с помощью лидарной технологии.....	19
1.1.4 Сравнительный анализ современных методов создания ЦМР (тахеометрия, ГНСС, лазерное сканирование, аэрофотосъемка с БПЛА).....	20
1.4 Проблемы и перспективы применения НЛС и UAV технологии для задач проектирования и реконструкции	25
Вывод по главе 1	26
2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СБОРА ДАННЫХ: ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЙ	27
2.1 Нормативные требования в задаче реконструкции и проектирования	27
2.2 Методика и технология создания ЦМР по данным НЛС.....	27
Вывод по главе 2	56
3 ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СОЗДАНИЯ ЦМР	58
3.1 Практика внедрения технологии БПЛА для проектирования и реконструкции	58
3.2 Создание ЦМР по данным НЛС и БПЛА для задач реконструкции	68
3.3 Оценка достоверности и экономическая эффективность разработанной методики	71

Вывод по главе 3	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	85
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler	92
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler.....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler.....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Pix4D.....	97
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Pix4D.....	98

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие документы и стандарты:

- 1 Правила присуждения ученых степеней, утвержденных приказом МОН РК от 31 марта 2011 года № 127.
- 2 ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила
- 3 СП РК 3.03-101-2013, СН РК 3.03-01-2013 «Автомобильные дороги»
- 4 СТ РК 1053 Автомобильные дороги. Термины и Определения
- 5 СН РК 1.03-03-2018 Геодезические работы в строительстве
7. Закон Республики Казахстан «Об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности в Республике Казахстан» от 16 июля 2001 года № 242-ІІ.
8. Закон Республики Казахстан «Об автомобильных дорогах» от 17 июля 2001 года № 245-ІІ.
9. СТ РК 1399-2005 «Дороги автомобильные. Инженерные изыскания для строительства, реконструкции и капитального ремонта. Требования к составу работ»
10. Руководящий документ в строительстве Республики Казахстан 1.03-01-2018 «Геодезическая служба и организация геодезических работ в строительстве» (приложение 1 к приказу председателя Комитета по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 20 апреля 2018 года № 88-НК)
11. Приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 31 декабря 2020 года № 706 "Об утверждении правил эксплуатации беспилотных летательных аппаратов в воздушном пространстве Республики Казахстан": устанавливает правила эксплуатации БПЛА, включая требования к проведению аэрофотосъемки.
12. Приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 12 мая 2023 года № 340 (Поправки в Приказ №706)
13. ISO 21384-3:2023 Беспилотные авиационные системы (UAS). Часть 3. Правила эксплуатации
14. ISO 7077:1981 Методы измерения для строительства - Общие принципы и процедуры проверки соответствия измерений
15. Документация FIG № 49: Экономически эффективные методы позиционирования с помощью ГНСС
16. ISO 19157:2013 — "Географическая информация — Качество данных"

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ЦМР – Цифровая Модель Рельефа
ГИС – Географические Информационные Системы
ПО – Программное Обеспечение
ГНСС – Глобальные Навигационные Спутниковые Системы
БПЛА – Беспилотные Летательные Аппараты
СКО – Среднеквадратическая Ошибка
PPK – Post-Processed Kinematic (постобработанная кинематика)
GPS (Global Position System) - Глобальные Спутниковые Системы
GCP – Ground Control Points (опорные наземные точки)
АФС – Аэрофотосъемка
ISO – Международная организация по стандартизации
ГИС – Географическая информационная система
DEM – Digital Elevation Model (цифровая модель рельефа)
Лидар – Light Detection and Ranging (лазерное сканирование)
БД – База Данных
ПО – Программное Обеспечение
RTK – Real-Time Kinematic (кинематика в реальном времени)
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission (Миссия радарной топографии шаттла)
НЛС — Наземное лазерное сканирование
ГОСТ — Государственный стандарт
СНиП — Строительные нормы и правила
СП — Свод правил
СН — Строительные нормы

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые модели рельефа (ЦМР) играют ключевую роль на всех этапах проектирования, строительства и реконструкции автомобильных дорог. Современные технологии геопространственного моделирования позволяют получать точные данные о рельефе, обеспечивая высокую степень детализации, необходимую для автоматизации процессов и контроля качества строительных работ. Исследование эффективности геопространственных технологий в строительстве и обслуживании автомобильных дорог подчеркивает их важность для улучшения процессов и повышения точности данных. Технологии, такие как БПЛА, лидар, аэрофотосъемка и ГНСС, позволяют оптимизировать расходы.

Актуальность темы. Последние десятилетия характеризуются интенсивным внедрением высокотехнологичных средств и оборудования в процессы строительства и реконструкции автомобильных дорог. Особенно влияние данных технологий ощущается при строительстве современных высокоскоростных автомагистралей и глобальных транспортных коридоров, которые в том числе проходят через территорию Республики Казахстан. Применение методов современного цифрового проектирования, технологий строительства автодорог становится невозможным без внедрения и всестороннего использования технологий и инновационных геопространственных методов, которые являются основой всех дальнейших этапов строительства. Геопространственной основой проектирования и реконструкции автомобильных дорог является цифровая модель рельефа. Создание цифровых моделей рельефа осуществляется с использованием передовых методов и технологий сбора геопространственных данных к которым относятся геодезические методы, включающие различные виды топографической съемки с использованием электронных тахеометров и глобальных систем спутниковой навигации, фотограмметрические методы наземной и аэросъемки, методы воздушного и наземного лазерного сканирования, а также картографический метод, использующийся при наличии архивных картографических данных.

Проблеме создания цифровых моделей рельефа посвящены работы ученых Hofgman H, Young Hu. Задача сбора и анализа данных, как основы для создания цифровых моделей рельефа отображены в работах Шульц Р.В., Середовича В.А.

Существующие методы и технологии создания цифровых моделей рельефа разработаны для решения топографических и картографических задач и призваны удовлетворить требованиям к созданию и обновлению топографических карт. Эти требования в свою очередь регламентируются нормами к созданию и обновлению топографических карт и планов (точность отображения рельефа местности, соответственно $1/3 - 1/4$ от высоты сечения рельефа местности, что даже для равнинной местности не превышает 7,5 см), которые не соответствуют строительным нормам, которые зачастую требуют

более высокой точности и детальности (до 10 см при проектировании, и до 5 мм при реконструкции). С другой стороны, получившие на сегодняшний день широкое распространение технологии наземного лазерного сканирования, аэросъёмки с использованием беспилотных летательных аппаратов, и воздушного лазерного сканирования, позволяют достичь указанных выше требований, но не отображены должным образом в строительных нормативных документах, в которых отсутствуют разработанные технологии, критерии и рекомендации по применению этих технологий. В следствии этого, внедрение этих технологий в практику выполнения высокоточных строительных работ сдерживается отсутствием взаимосогласованных нормативных требований, которые в свою очередь должны быть обеспечены разработанной методикой и технологией создания цифровых моделей рельефа для решения задач проектирования и реконструкции автомобильных дорог.

Таким образом, достижение указанной цели диссертационного работы связано с исследованием современных методов и технологий сбора геопространственных данных для создания цифровых моделей рельефа, а также усовершенствованием существующих математических моделей построения цифровых моделей рельефа, что в комплексе является актуальной задачей, решение которой имеет научную и высокую практическую ценность.

Цель исследования – является разработка методики и усовершенствование технологий создания цифровых моделей рельефа для решения задач проектирования и реконструкции автомобильных дорог

Объект исследования – цифровые модели рельефа автомобильных дорог города Алматы

Предмет исследования – методы и модели создания ЦМР для проектирования и реконструкции автодорог

В соответствии с темой диссертационного исследования, в работе поставлены и решены следующие **задачи исследования**:

1. Разработка технологических схем сбора данных и геодезического обеспечения создания цифровых моделей рельефа при проектировании и реконструкции автодорог с использованием аэросъёмки с беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования.

2. Исследование точности получения исходных геопространственных данных для создания цифровых моделей рельефа методами аэросъёмки с беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования.

3. Усовершенствование методики выбора метода построения цифровых моделей рельефа.

Методы исследования позволяют достичь цели поставленной в диссертационной работе и раскрыть суть и содержание полученных научных результатов. Использован комплексный метод исследований, который включает: анализ литературных источников по применению технологии аэросъёмки и наземного лазерного сканирования; моделирование различного рельефа местности; интерполяцию данных и построение цифровых моделей рельефа.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Технологическая схема сбора данных и геодезического обеспечения, основанная на интеграции аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземного лазерного сканирования, заключается в объединении двух методов для достижения максимальной точности и детализации геопространственных данных в зависимости от характера рельефа
2. Методика исследования точности исходных геопространственных данных для создания цифровых моделей рельефа методами аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования
3. Методика построения цифровых моделей рельефа, которая позволяет разрядить модель и сократить время и обеспечить точность, соответствующей требованиям проектирования и реконструкции дорог

Научная новизна:

1. Усовершенствована технология сбора данных для создания цифровых моделей рельефа при проектировании и реконструкции автодорог с использованием аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования.
2. Разработана методика исследования точности исходных геопространственных данных для создания цифровых моделей рельефа
3. Усовершенствована методика построения цифровых моделей рельефа методом математического моделирования

Практическая значимость – улучшение точности цифровых моделей рельефа (ЦМР). Разработанные методические подходы и алгоритмы позволяют повысить точность ЦМР, что особенно важно для проектирования и строительства инфраструктурных объектов.

Внедрение новых методов обработки данных, полученных с различных высот полета, обеспечивает более точное и детализированное представление рельефа. Предложенные методики и рекомендации позволяют снизить трудоемкость и стоимость создания ЦМР за счет оптимального выбора высоты полета и технологий съемки.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: применением теории ошибок измерений для исследования точности различных методов сбора геопространственных данных, статистических методов, в том числе аналитического моделирования для исследования математических моделей построения цифровых моделей рельефа, а также метод сравнительного анализа для определения лучшего метода и технологии геодезического обеспечения создания цифровых моделей рельефа.

Личный вклад автора заключается в проведении анализа существующих исследований и публикаций по методам создания и оценки цифровых моделей рельефа (ЦМР). Сформулированы практические рекомендации по выбору оптимальных методов и высот полета для создания ЦМР в зависимости от специфики задач и условий территории.

Выводы и заключение:

1. Разработаны новые методические подходы к созданию ЦМР с учетом специфики различных высот полета и источников данных.
2. Предложены алгоритмы для повышения точности и эффективности обработки данных, полученных с помощью различных методов съемки.
3. Разработаны рекомендации по камеральной обработке данных и интеграции различных источников информации для повышения точности, и полноты ЦМР.
4. Разработана технология сбора, основанная на аэросъемке с беспилотных летательных аппаратов и наземном лазерном сканировании, обеспечивает высокую точность и детализацию геопространственных данных путем интеграции воздушных и наземных данных улучшает качество проектирования, сокращая время на сбор данных на 20% и минимизирует ошибки при реконструкции и строительстве автодорожной инфраструктуры за счет оптимального выбора высоты полета с учетом рельефа и методов съемки.

Публикации и апробация работы. По материалам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе: одна статья в международном рецензируемом научном журнале, имеющем импакт-фактор, Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Himychoho Universytetu (база Scopus Q2); четыре статьи в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования МНВО РК; четыре статьи в сборниках международных конференций, форумов и конгрессах.

Результаты исследований внедрены в учебный и производственный процесс, подтверждаются соответствующими Актами.

Работа выполняется в рамках программы целевого финансирования ИРН проекта: BR21882179 «Разработка прогнозно-поисковых решений для геологического картирования рудных залежей наземно-космическими методами». В рамках данного проекта одно из направлений заключается в разработке методики дешифрирования данных с БПЛА, и создании высокоточных цифровых моделей рельефа (ЦМР), которые не только отображают топографические особенности, но и выявляют линейные и структурные элементы.

Для повышения точности создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) в проектировании и реконструкции автомобильных дорог ключевое значение имеет выбор методики сбора геопространственных данных и использование современного геодезического оборудования. В рамках исследования использовался роботизированный тахеометр ТМ 60, предоставленный лабораторией «Геомеханики и геотехнологии» Инжинирингового центра Сатпаев университета.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных литературы. Работа изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 36 таблиц, 55 рисунков, список литературы из 120 наименований.

1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦМР

1.1 Современное состояние методов сбора геопространственных данных для создания ЦМР

Цифровые модели рельефа (ЦМР) являются важным инструментом в геоинформационных системах (ГИС) и геоинженерии. Они широко применяются для решения задач, связанных с проектированием, строительством и реконструкцией инфраструктурных объектов [1,2,3,4]. ЦМР можно классифицировать по ряду критериев, таких как источник данных (лазерное сканирование, фотограмметрия, спутниковые снимки), пространственное разрешение (высокое, среднее, низкое) и временная характеристика (статические или динамические модели, обновляемые в реальном времени) [5,6,7]. Эти модели служат основой для различных пространственных и инженерных расчетов, позволяя точно оценивать топографию и строить планы для дальнейших этапов реализации проектов.

Цифровые модели рельефа играют ключевую роль на всех этапах проектирования, строительства и реконструкции автомобильных дорог [8]. Однако точность этих моделей варьируется в зависимости от этапа: на стадии проектирования достаточно использовать модели с умеренным уровнем детализации, чтобы получить общее представление о рельефе и взаимодействии объекта с окружающей средой [10,11,12]. Это позволяет оптимизировать проектные решения и минимизировать затраты на начальных стадиях.

На стадиях строительства и реконструкции требуется более высокая точность ЦМР, так как модели становятся основой для автоматизации строительных процессов, таких как автоматическое управление строительной техникой [13,15]. Более того, детализированные модели необходимы для точного геодезического контроля и мониторинга выполнения работ в реальном времени [16,17]. Это позволяет не только повышать эффективность выполнения строительных и реконструкционных работ, но и обеспечивать их соответствие нормативным стандартам.

Цифровые модели рельефа являются важнейшим элементом комплексного подхода к управлению проектами на всех этапах, начиная от проектирования и заканчивая эксплуатацией и реконструкцией объектов [1,8]. Разработка и внедрение методологии для адаптации ЦМР к специфическим задачам каждого этапа строительства является актуальной задачей, требующей научного подхода и комплексного исследования [2].

Процесс создания ЦМР начинается с первого и самого важного этапа — сбора данных. позволяет получить детализированные данные о поверхности Земли. [3,6].

Существует несколько методов сбора данных о рельефе, включая LiDAR (Light Detection and Ranging), фотограмметрию, GPS (Global Positioning System) и радарные методы. LiDAR является одним из наиболее распространенных методов и представляет собой технологию активного зондирования,

использующую лазерный свет для измерения расстояний до поверхности Земли [2,7]. Фотограмметрические методы используют изображения, полученные с помощью аэрофотосъемки или спутников, для измерения высотных данных [6,9,11]. GPS позволяет определять координаты точек на земной поверхности, что также может быть использовано для создания ЦМР [11]. Радарные методы, такие как синтетическая апертурная радиолокация (SAR), могут проникать сквозь облака и туман и обеспечивать данные о рельефе в различных условиях [11].

Эти различные источники данных предоставляют необходимую информацию для построения ЦМР [3,13]. Они позволяют получить точные и детализированные данные о высотах земной поверхности, которые затем могут быть использованы для создания цифровых моделей рельефа с высокой точностью и разрешением. Вот некоторые основные типы цифровых моделей:

1. По источнику данных:

- Модель цифрового рельефа (DEM) - предоставляет информацию о высоте над уровнем моря для каждой точки на земной поверхности [14,15].
- Модель цифровой поверхности (DSM) - включает все объекты и растительность на земле, отображая верхний слой [16].
- Модель цифрового рельефа без объектов и растительности (DTM), которая показывает только наземный рельеф [17].

2. По пространственному разрешению:

- Высокое разрешение: модели с высоким уровнем детализации и мелкими ячейками сетки [18,19].
- Среднее разрешение: модели с умеренной детализацией и средними ячейками сетки [20].
- Низкое разрешение: модели с низким уровнем детализации и крупными ячейками сетки [21].

3. По временной характеристике:

- Статические модели: представляют данные в определенный момент времени и не изменяются со временем [22].
- Динамические модели: изменяются со временем, отражая динамику изменения земной поверхности, такие как естественные катастрофы или строительство [23].

4. По способу сбора данных:

- Модели LiDAR (Light Detection and Ranging): получены с использованием лазерного сканирования, что позволяет точно измерять высоту [6,13,15]

Фотограмметрические модели - это результат обработки аэрофотоснимков или спутниковых изображений с использованием фотограмметрии [2,10,11]. Когда речь идет о представлении данных, мы можем выделить два основных типа моделей: растровые и векторные. Растровые модели представляются в виде сетки пикселей, где каждый пиксель содержит информацию о высоте. Векторные модели, напротив, представлены в виде векторных данных, где каждая точка или линия содержит информацию о

высоте[13,24]. Это всего лишь некоторые общие критерии классификации. Цифровые модели играют важную роль при анализе и моделировании поверхности земли в различных областях применения, таких как география, геология, гидрология, градостроительство и многие другие [1,19].

Цифровые поверхности рельефа могут быть представлены математически и графически.

Ряды Фурье и полиномы являются распространенными математическими представлениями. Регулярная сетка, нерегулярная сетка, контурное изображение и секционная диаграмма являются распространенными графическими представлениями. [25,26]

Существующие цифровые модели делятся по характеру описания объекта на цифровые модели рельефа, цифровые модели местности и цифровые модели ситуации, как показано на рисунке 1.1 [2,18].

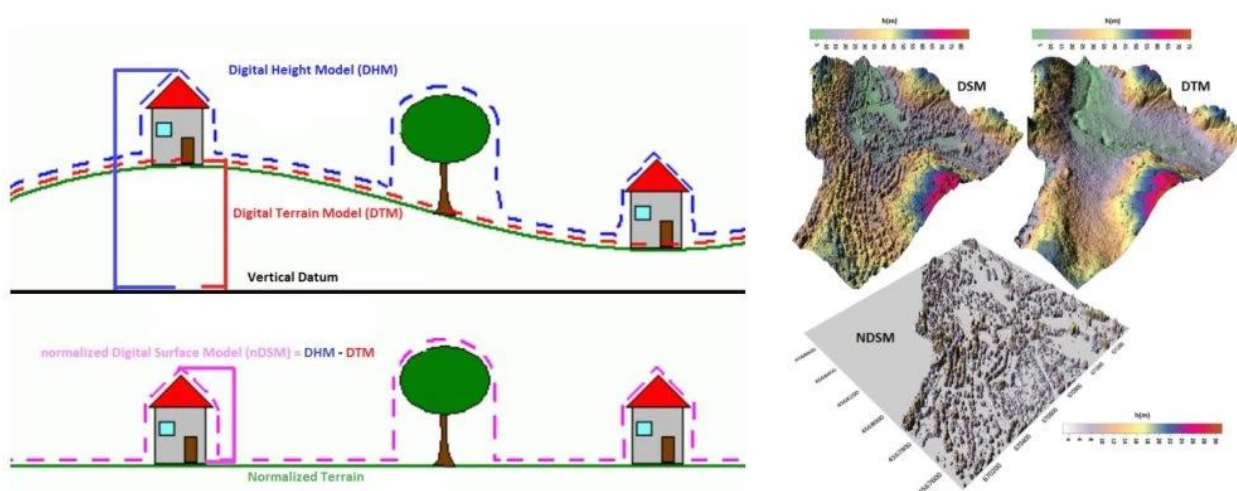


Рисунок 1.1 – Разница между ЦМР и ЦММ

Существует обширное количество литературы, посвященной изучению цифровых моделей [27,28,29], и в общем определении они представляют собой трехмерные математические модели, которые подробно описывают поверхность объекта. Цифровые модели могут включать в себя как реальные, так и воссозданные поверхности, такие как рельеф земной поверхности, атмосферное давление, температура, геофизические поля, плотность дискретных явлений и другие характеристики. Эти модели являются важным инструментом во многих областях, включая географию, геологию, метеорологию, аэрокосмическую индустрию, медицину и другие. Они позволяют исследователям и инженерам лучше понять и прогнозировать различные физические процессы и явления в окружающем мире.

Классификация цифровых моделей по методу сбора исходных данных.

Согласно исследования П.Жоли в 1974 г. изучившего способы многообразного получения данных о рельефе, предложил классификацию ЦМР по типам пространственной организации данных о рельефе, с учетом традиционных классических инструментальных методов, и цифровых

технологий создания карт [6].

П. Жоли предложил следующие системы высотных отметок рельефа:

Высотные отметки в узлах нерегулярной сети, полученные из тахеометрической съемки.

Высотные отметки в узлах регулярных решеток, используемые при площадном нивелировании и инженерных изысканиях.

Высотные отметки в линейно упорядоченных множествах точек, полученные при цифровании карт (сканировании).

Высотные отметки в полностью или частично упорядоченных множествах точек, генерируемые в процессе фотограмметрической обработки стереомодели местности.

Цифровое моделирование подразумевает две основные задачи, это методы и решения по созданию ЦМР и вопросы применения полученных моделей.

К источникам данных относятся материалы, из которых могут быть получены данные для моделирования местности моделирования, а исходные данные ДТМ - данные, полученные из источников данных для цифрового моделирования рельефа. Такие данные могут быть измерены различными методами:

1. полевая съемка с использованием тахеометра, теодолита и GPS для прямого измерения с поверхности местности
2. фотограмметрия с использованием стереопар воздушных (или космических) снимков и фотограмметрических приборов и наземных
3. картографическая оцифровка с использованием существующих топографических карт [7]. Для поверхностей рельефа с различными типами покрытия могут использоваться различные методы измерений, поскольку некоторые методы могут быть менее пригодны для некоторых областей.

Классификация методов сбора данных

1. Картографический – создание ЦМР по архивным данным
2. Геодезический
3. Фотограмметрический – наземный и воздушный
4. Лазерное сканирование – наземное и воздушное

Согласно классификации, существуют четыре основных метода сбора данных, а именно: геодезическая съемка, фотограмметрия, картографическое обследование и лазерное сканирование [8,9]. Проведение анализа этих методов помогает выявить наиболее эффективный способ подготовки и создания исходных данных. Каждый из них обладает своими преимуществами и ограничениями, и выбор конкретного метода зависит от поставленных задач и требований к получаемой информации.

Картографические материалы являются одним из основных источников информации при цифровом моделировании, а именно крупномасштабные топографические карты.

Рельеф на топографических картах отображается с использованием горизонталей, дополненных отметками точек, бергштрихами и специальными

условными знаками для оврагов, промоин, скал-останцев и других форм рельефа. Основным методом изображения рельефа является использование горизонталей, которые сопровождаются отметками характерных точек местности. Высота сечения рельефа горизонталями зависит от типа территории и существенно варьируется на топографических картах разного масштаба. [10]

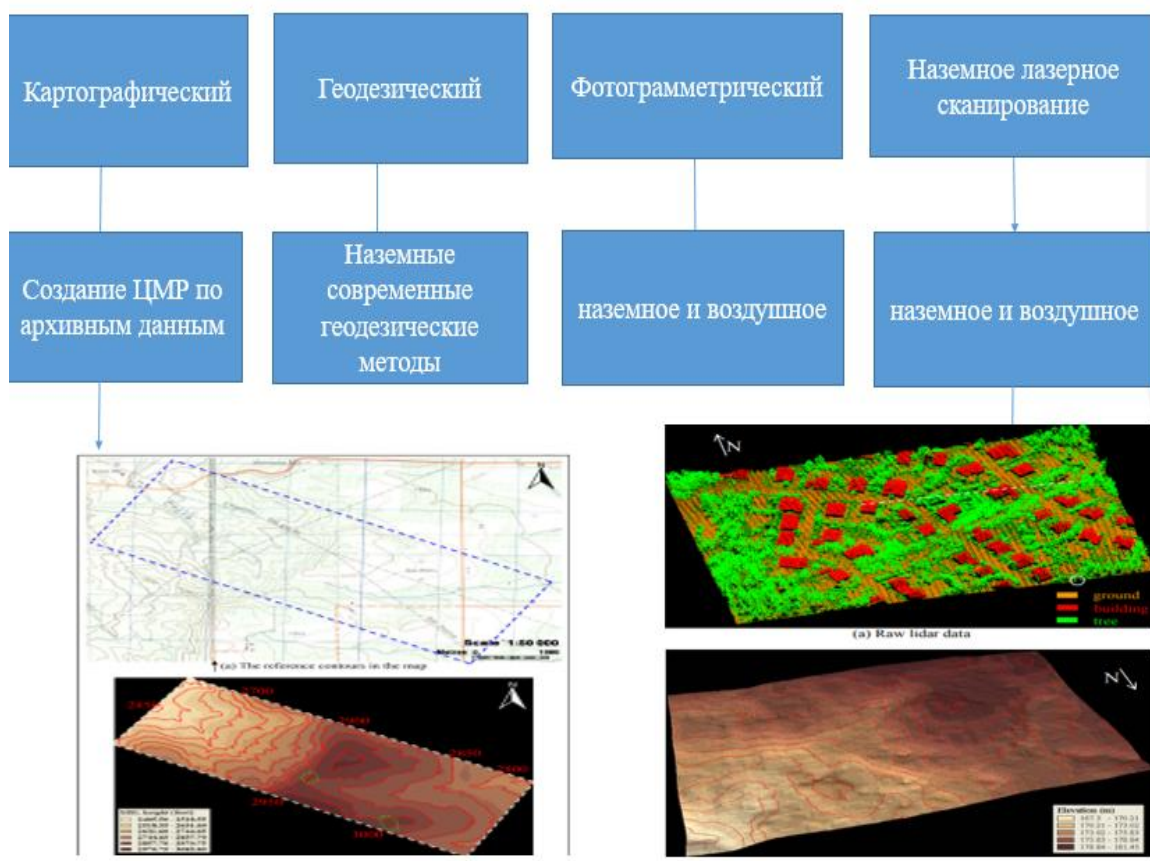


Рисунок 1.2 - Классификация методов сбора данных

Оцифровка данных о рельефе с карт очень важный момент, от которого зависит репрезентативность моделей, ответственность состоит в том, что необходимо точно смоделировать рельеф поверхности.

Сложный рельеф представляет особую сложность. В горных районах не всегда необходимо отображать каждую горизонталь. Если горизонтали параллельны и форма склона не меняется, то достаточно цифровать основные горизонтали. На масштабе 1:25000 может быть достаточно создать цифровые линии с интервалом в 25 метров по высоте, а не каждую.

Следующим источником данных для создания ЦМР, являются материалы полевых съемок, как классический метод, остающийся одним из самых точных способов получения данных [11,13].

Современная геодезическая техника существенно модернизировалась и с каждым годом лидирующие компании производители геодезических приборов конкурируют в первенстве предоставления новшеств в сверхточных и быстрых измерениях.

Литературный обзор геодезических измерений показал следующую классификацию:

Приборы для линейно-угловых измерений, приборы нивелирования, спутниковое геодезическое оборудование, а также оборудование, необходимое для решения инженерно-геодезических, прикладных, гравиметрических измерений и ориентирования.

Согласно В.Е. Дементьева, прецизионные геодезические измерения являются наиболее трудоемкими, сложными и дорогостоящими видами работ. Получаемая точность измерений ограничивается не только инструментальной точностью, которая заявлена производителем, как достаточно высокая, а влиянием внешних условий на результат [12].

В качестве данных для ЦМР во многих задачах невозможно обойтись без получения данных с помощью приемников систем спутникового позиционирования.

1.1.1 Создание ЦМР с помощью тахеометрической съемки

Тахеометрическая съемка остается одним из наиболее эффективных методов создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) благодаря высокой точности определения координат, высот и углов [9,10]. Этот метод базируется на интеграции теодолита и дальномера, что позволяет с высокой точностью измерять горизонтальные и вертикальные углы, а также расстояния.

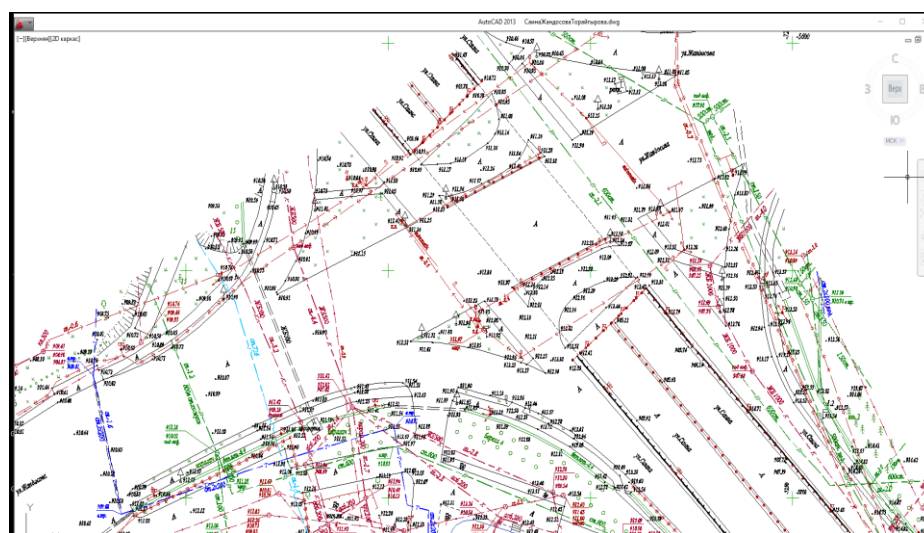


Рисунок 1.3 - Работа с данными с тахеометрической съемки, участок дороги г. Алматы, развязка Абая -Саина

Высокая точность данных, полученных с использованием тахеометрической съемки, делает этот метод особенно востребованным для инженерных изысканий, проектирования и мониторинга изменений рельефа [9,10].

В рамках данного исследования применялся роботизированный тахеометр ТМ 60, предоставленный лабораторией «Геомеханики и геотехнологии» Инновационного инженерингового центра энергогенерирующих технологий для ГМК по программе BR21881939 «Разработка ресурсосберегающих энергогенерирующих технологий для горно-металлургического комплекса и создание инновационно-инженерингового центра». Тахеометр ТМ 60 отличается высокой точностью измерений, возможностью автоматического слежения за отражателем и минимизацией ошибок, связанных с человеческим фактором. Его использование позволило добиться более детальной проработки рельефа исследуемой территории.

На этапе подготовки к тахеометрической съемке определяется граница исследуемой территории и разрабатывается съемочный план, который включает установку контрольных точек. Эти точки обеспечивают пространственную привязку данных и минимизируют систематические ошибки, влияющие на точность модели. При выборе мест для установки тахеометра учитываются особенности рельефа и необходимость равномерного покрытия территории измерениями. Во время полевых работ прибор фиксирует координаты и высоты ключевых точек рельефа, а данные регистрируются в электронном журнале, исключая возможность ошибок ручной записи. Тахеометр также позволяет значительно ускорить процесс сбора данных благодаря функции автоматического измерения и записи, что особенно важно при работе на больших территориях.

После завершения полевых работ начинается этап обработки данных. С использованием специализированного программного обеспечения, такого как AutoCAD Civil 3D или ArcGIS, применяются методы интерполяции и фильтрации, позволяющие устранить шумы и систематические ошибки. Высокая точность данных, полученных с помощью тахеометра ТМ 60, обеспечивает создание непрерывной цифровой поверхности рельефа, которая отвечает современным требованиям геодезии и проектирования. Тахеометрическая съемка таким образом становится ключевым инструментом для инженерных изысканий, проектирования инфраструктурных объектов и мониторинга территорий, особенно в сложных условиях, где требуется высокая точность и надежность данных.

1.1.2 Создание ЦМР с помощью технологии

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) играют важную роль в современных технологиях для создания цифровых моделей местности. Их высокая точность, гибкость и возможность интеграции делают их незаменимыми при решении различного рода задач - от инженерных

изысканий до картографирования и мониторинга земельных участков. Совмещение с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) открывает новые перспективы в сборе геопространственных данных: это позволяет оптимизировать рабочие процессы и повысить качество создаваемых моделей.

Технологии глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) сегодня являются основой современных методов формирования цифровых моделей рельефа (ЦМР). Благодаря высокой точности определения координат при использовании дифференциальных ГНСС систем (DGPS) или технологий кинематики в реальном времени (RTK), можно достичь точности измерений до уровня в несколько сантиметров. Это особенно важно для задач с высоким уровнем детализации геопространственных данных [5].

Современные навигационные приемники обладают разнообразными функциями, включая возможность интеграции данных из других сенсоров и геоинформационных систем (ГИС). Это упрощает последующую обработку информации и анализ данных, что позволяет сократить вероятность ошибок на этапе создания моделей рельефа [9]. Навигационные технологии ГНСС применяются в самых разнообразных задачах: от создания обширных моделей рельефа на больших территориях до детального изучения маленьких объектов.

Одним из важных трендов сегодня является соединение технологий ГНСС с беспилотными летательными аппаратами. Это сочетание привнесло значительные изменения в процесс сбора геопространственных данных. RTK и PPK (кинематика с последующей обработкой) обеспечивают точность координат до сантиметрового уровня, что необходимо для установки местоположений наземных контрольных точек (GCP), используемых при фотограмметрической обработке данных, полученных от беспилотников [17,20].

Применение наземных точек контроля на основе ГНСС помогает сократить ошибки позиционирования на этапах обработки фотограмметрических данных и увеличить точность создаваемых моделей рельефа. Современные приемники ГНСС обеспечивают высокую согласованность и надежность данных для получения точных геопространственных моделей даже в сложных условиях рельефа - таких как гористые местности или плотно заселенные районы [28]. Плюсы использования технологий спутниковой навигации (ГНСС).

Высокая точность измерений обеспечивается благодаря системам RTK и DGPS, которые обеспечивают необходимую для инженерных изысканий и картографирования субсантиметровую точность (согласно Hofmann-Wellenhof & Wasle, 2008).

Разностороннее использование: ГНСС системы могут быть применены для съемки как больших объектов, так и мелких деталей включая отдаленные районы.

Использование ГИС в современных технологиях позволяет автоматизировать объединение данных для повышения эффективности анализа и визуализации выводов [9].

Уменьшение временных издержек: применение автоматизированных систем для сбора и анализа информации позволяет сократить время, затрачиваемое на выездные работы [16]

Системы RTK и DGPS регулярно упоминались в научных исследованиях как база для разработки точных ЦМР (центры масс рамок). Например, [5] подчеркнули значение точности данных в инженерных проектах [17], рассматривая интеграцию ГНСС с беспилотными летательными аппаратами, отметили это как эффективное решение для сбора информации в труднодоступных областях [20], в свою очередь, подчеркнули важность использования наземных контрольных точек с целью сокращения ошибок фотограмметрической обработки.

Исследования Чена и др. а также Актюрк и Алтунель показывают эффективность применения ГНСС технологий при создании моделей рельефа в сложных условиях [16,27]. Эти исследования указывают на то, что совмещение ГНСС с другими технологиями, например с БПЛА, способствует значительному улучшению точности и эффективности процессов съемки. ГНСС технологии представляют собой важный инструмент для разработки цифровых моделей рельефа в настоящее время. Их высокая точность, гибкость и возможность интеграции делают их неотъемлемыми для широкого спектра задач: от инженерных изысканий до картографирования и мониторинга территорий. Использование беспилотных летательных аппаратов для сбора геопространственных данных открывает возможности для оптимизации рабочих процессов и улучшения качества создаваемых моделей.

Технология ГНСС, в частности системы кинематики в реальном времени (RTK) и кинематики с постобработкой (PPK), обеспечивают точность сантиметрового уровня, необходимую для установления опорных точек. Эти высокоточные системы обеспечивают согласованность и надежность координат опорных точек, тем самым значительно улучшая пространственную точность получаемой ЦМР. Интеграция опорных точек, полученных из ГНСС, исправляет позиционные ошибки на изображениях БПЛА, создавая высокоточные геопространственные модели. Приемники ГНСС обеспечивают быстрое развертывание и эффективный сбор данных, значительно сокращая время, необходимое для наземных измерений. Возможности автоматической регистрации и обработки данных, присущие системам ГНСС, оптимизируют рабочие процессы и сводят к минимуму человеческие ошибки. Быстрое создание опорных точек на больших территориях исследований повышает общую эффективность работы.

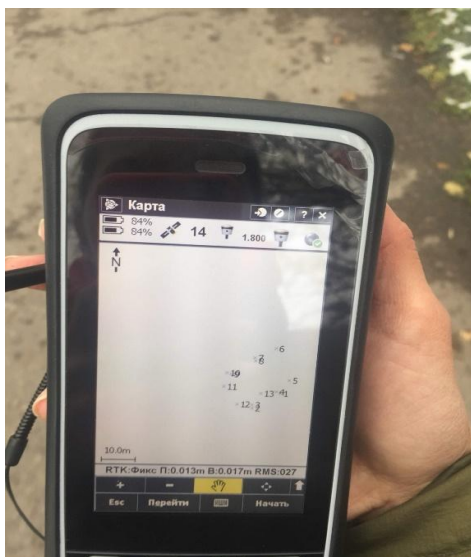


Рисунок 1.4 – Процесс выполнения съемки для получения GCP

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	460492.880000	264495.680000	252.000000	0.005000	2.004701	2	0.020
point 2	460168.460000	259814.020000	508.000000	0.005000	1.364719	2	0.048
point 3	459278.080000	259552.440000	460.000000	0.005000	1.164221	2	0.234
point 4	459224.750000	264752.500000	271.000000	0.005000	1.939037	2	0.018
Total Error							
Control points					1.658053		0.120
Check points							

Рисунок 1.5 – Процесс загрузки контрольных точек

Сочетание технологии ГНСС с БПЛА для создания ЦММ обеспечивает беспрецедентную точность, эффективность и универсальность. Высокая точность опорных точек, полученных с помощью ГНСС, повышает пространственную точность ЦММ, а эффективный и гибкий характер сбора данных ГНСС оптимизирует процессы геопространственной съемки. Эта интеграция не только оптимизирует рабочие процессы, но и обеспечивает получение высококачественных геопространственных данных, что делает их краеугольным камнем современного геопространственного анализа и приложений.

1.1.3. Создание ЦМР с помощью лидарной технологии

Лидар - передовая технология, используемая для создания цифровых моделей рельефа, обладает высокой точностью и универсальностью, что делает ее неотъемлемым инструментом в геодезических исследованиях сегодняшнего дня, особенно при работе в сложных условиях [14,16,18]. Комбинирование лидарных данных с ГИС и ГНСС позволяет автоматизировать процессы обработки информации и улучшить качество создаваемых моделей, что представляет особую значимость для проектирования инфраструктуры и мониторинга территорий.

В работах Чена и др [16] подробно описывается использование лидарных данных для создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) и анализируется их точность.

Li et al. (2005) представили теоретические основы работы лидарных систем и их применение для создания ЦМР. Chen et al. (2017) подробно рассмотрели этапы обработки облака точек и методы повышения точности моделей рельефа. Ackermann (1996) исследовал применение лидарных технологий в проектировании дорожной инфраструктуры и их эффективность при оценке объемов работ. Исследования Wack & Wimmer (2002) подтверждают высокую производительность лидарных систем для крупных территорий, особенно в сложных ландшафтных условиях.

Современные лидарные системы, установленные на воздушных, наземных и мобильных платформах, позволяют собирать данные с высокой плотностью точек, что делает их универсальным инструментом для создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) (Li et al., 2005; Wolf & Dewitt, 2014).

Лидар использует лазерные импульсы для измерения времени возврата от поверхности земли. Путем анализа времени возврата и угла излучения определяется расстояние до объекта для точного определения координат. Результатом измерений является трехмерное представление рельефа в виде облака точек, где каждая точка обладает высокой точностью координат и высоты (Chen et al., 2017). Лидарные данные широко используются в инженерных изысканиях, особенно для проектирования автомобильных дорог и других линейных объектов. Например, Ackermann (1996) демонстрирует, что лидар позволяет получать цифровые модели рельефа с высокой точностью, что необходимо для расчетов объемов земляных работ. Исследования Chen et al. (2017) подчеркивают, что применение лидарных технологий позволяет минимизировать ошибки, связанные с ручными измерениями, и повысить производительность геодезических работ.

Лидарные данные также применяются для мониторинга изменений рельефа. Работы Wack & Wimmer (2002) показывают, что регулярный сбор данных позволяет отслеживать эрозию склонов, осадки и другие геоморфологические процессы.

В результате формируется облако точек, представляющее поверхность земли.

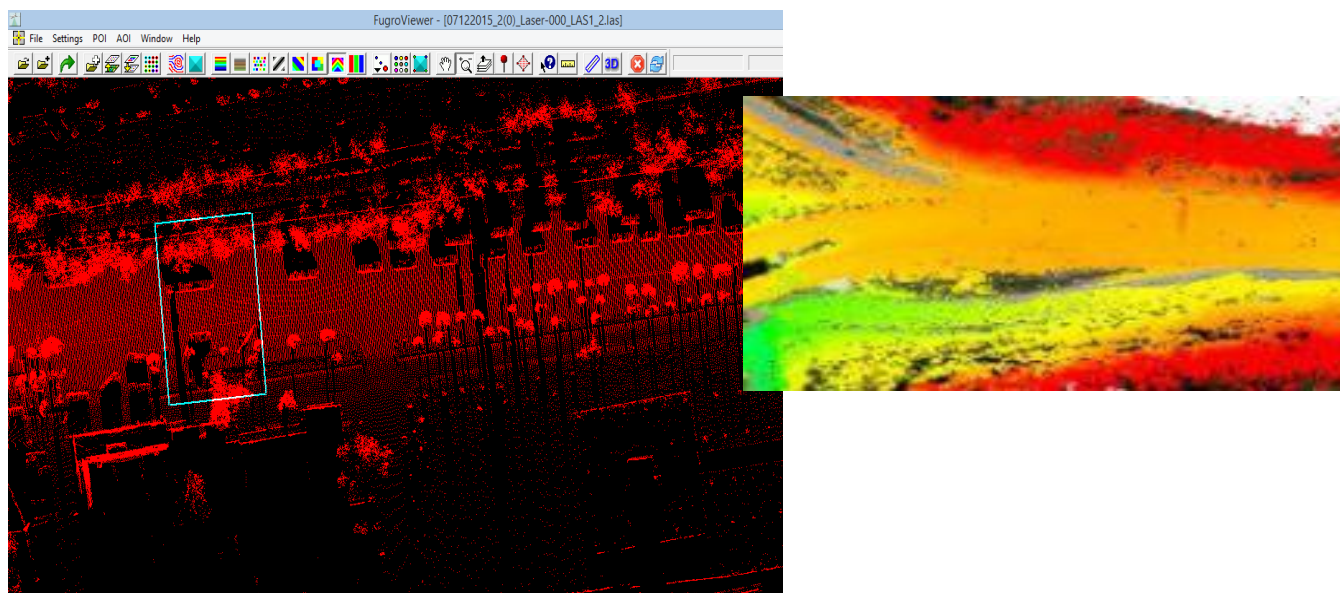


Рисунок 1.6- Тестовый участок дороги г. Алматы, съемка выполнена мобильным лазерным сканером

1.1.4. Сравнительный анализ современных методов создания ЦМР (тахеометрия, ГНСС, лазерное сканирование, аэрофотосъемка с БПЛА)

Для сравнительного анализа современных методов создания ЦМР составлена Таблица методов создания ЦМР 1.1. Этот подход позволит четко структурировать информацию и сравнить методы по различным критериям. Оцениваем каждый метод по ключевым критериям: точность, скорость, стоимость, доступность данных, применимость и ограничения.

Таблица 1.1 – Методы создания ЦМР

Метод	Точность	Скорость	Стоимость	Доступность данных	Применимость	Ограничения
Тахеометрия	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая	Местные работы	Трудоемкость, ограниченная зона
ГНСС	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Различные условия	Не работает в густых лесах
LIDAR	Очень высокая	Высокая	Высокая	Низкая	Большие территории	Дорогостоящее оборудование
НЛС	Очень высокая	Низкая	Высокая	Низкая	Местные работы	Трудоемкость, высокая стоимость
UAV	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Различные условия	Ограниченная зона покрытия
SRTM	Средняя	Очень высокая	Низкая	Высокая	Глобальные проекты	Низкая детализация
Обычная	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Большие территории	Зависимость от погоды

аэрофото- съемка						
---------------------	--	--	--	--	--	--

Для задач проектирования и реконструкции автомобильных дорог наиболее рациональным является использование НЛС и UAV.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ методов создания ЦМР

Параметры	Метод обследования		
	БПЛА	MLS (Мобильное Лазерное Сканирование)	Тахеометрическая съемка
Производительность	для разрешения 10 см/точку - до 30 км ² /выезд	300 тысяч измерений в секунду	300-500 пикетов в день
Организация съемки	Не влияет на движение	Не влияет на движение	Необходимо блокировать движение
Ошибка	10-30 мм	5-20 мм, зависит от качества плана и GPS сигнала	5 мм – 5 см (зависит от длины хода)
Производительность в день	70 км	100-250 км	Относительно
Плотность точечной модели	-	2 точки на м ²	1 точка на 100-200 м ²
Точность цифровой модели	15-20 см	5-10 см	Относительно
Продолжительность обработки			

В настоящее время требования к топографо-геодезической продукции становятся все более актуальными и приобретают непосредственное экономическое значение в связи с высокими темпами развития рынка. Основным требованием остается надежность и дифференцированность результатов картографических материалов, а наиболее важным вопросом - точность разрабатываемой продукции. На точность влияет множество факторов, зависящих как от средств измерения, так и от типа обработки. В настоящее время проектирование автомобильных дорог, как правило, базируется на данных топографической съемки, выполняемой традиционными

геодезическими приборами. Для повышения качества решений по проектированию объектов необходимо применять автоматизированную систему проектирования, содержащую компоненты программного, информационного, технического и организационного обеспечения.

Для обеспечения геодезической поддержки проектирования автомобильных дорог крайне важно провести детальное изучение классификации и категорий этих дорог.

Согласно источнику [18], автомобильные дороги классифицируются в зависимости от условий движения и доступа на них транспортных средств, и подразделяются на три основных класса:

Автомагистрали: характеризуются наличием многополосной проезжей части с центральной разделительной полосой на всем протяжении, отсутствием пересечений на одном уровне с другими видами дорожного движения, а также доступом через пересечения в разных уровнях, установленных на расстоянии не менее 5 км друг от друга [16].

Скоростные дороги: также имеют многополосную проезжую часть с центральной разделительной полосой, не имеют пересечений на одном уровне с другими видами дорожного движения, и доступ к ним возможен через пересечения в разных уровнях, а также через примыкания в одном уровне (без пересечения потоков прямого направления), установленные не реже, чем через 3 км друг от друга [18].

Дороги обычного типа: включают автомобильные дороги, не отнесенные к классам "автомагистраль" и "скоростная дорога". Они могут иметь единую проезжую часть или с центральной разделительной полосой, и доступ к ним возможен через пересечения и примыкания в разных и одном уровне, размещенные на определенном расстоянии друг от друга в зависимости от категории дороги [18,20].

Категории автомобильных дорог определяются на основе их транспортно-эксплуатационных характеристик и потребительских свойств, включая количество и ширину полос движения, наличие центральной разделительной полосы, тип пересечений с другими видами транспорта и условия доступа на дорогу [16].

Этот подход к классификации и категоризации автомобильных дорог играет важную роль в их проектировании, управлении и обеспечении безопасности движения.

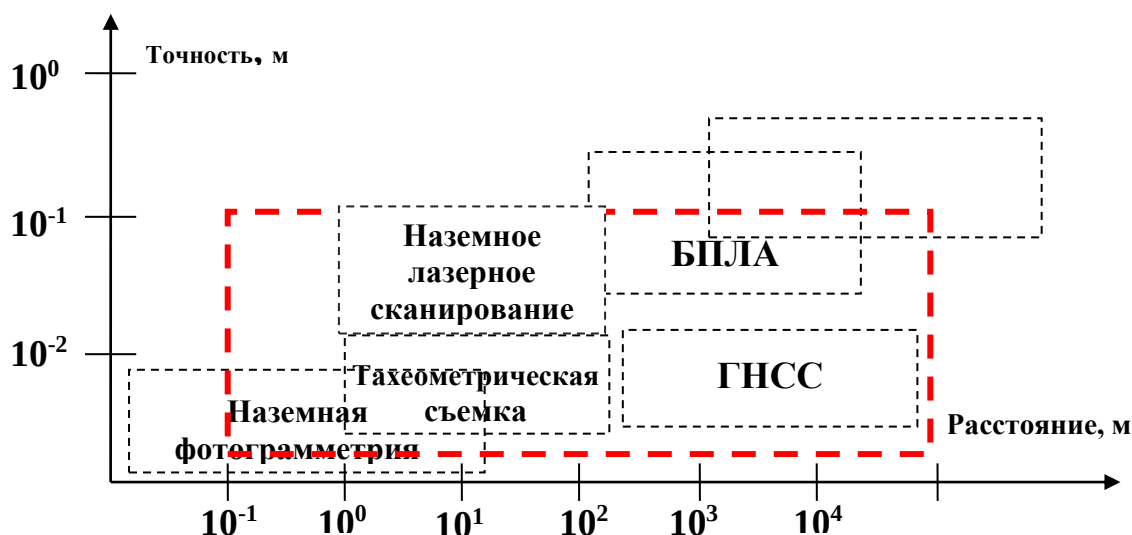


Рисунок 1.7 – Зависимость точности метода съемки от размера исследуемой территории

Исследование метода съемки по Luhman позволяет определить, как изменение размера исследуемой территории влияет на точность полученных данных. График может демонстрировать, как точность съемки изменяется при изменении масштаба исследуемой территории [19].

Возможно, что при небольших размерах территории точность метода съемки будет высокой, поскольку сбор данных будет происходить в более контролируемых условиях и на меньшем объеме территории. Однако с увеличением размера территории точность метода съемки может снижаться из-за различных факторов, таких как гетерогенность местности, ограничения технических средств, сложности обработки данных и других.

График может показать, как точность съемки изменяется в зависимости от размера исследуемой территории, и может помочь определить оптимальный размер территории для достижения требуемой точности данных.

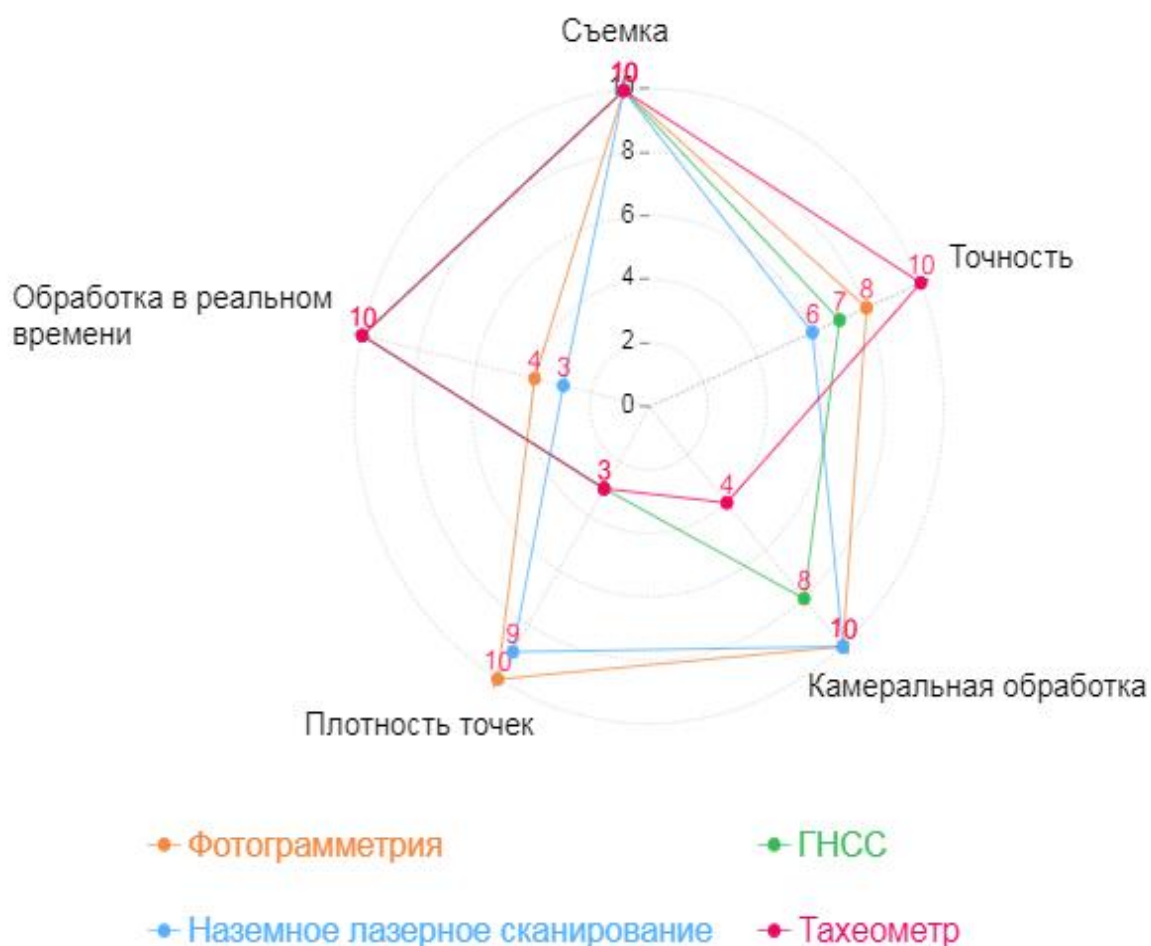


Рисунок 1.8 – Схема сравнения методов съемки

Зависимость точности метода съемки от размера исследуемой территории может быть весьма существенной и варьировать в зависимости от конкретных условий и требований проекта. Обычно можно выделить несколько общих тенденций.

Масштаб съемки: При увеличении размера исследуемой территории часто требуется использовать меньший масштаб съемки, что может привести к снижению точности. Это связано с тем, что при более крупном масштабе на кадре фиксируется большее количество объектов, что может привести к сокращению детализации и увеличению ошибок измерений.

Методы съемки: Разные методы съемки имеют разную точность и эффективность в зависимости от размера исследуемой территории. Например, при малых территориях тахеометрическая съемка может быть более эффективной и точной, чем аэрофотосъемка. Однако при крупных территориях аэрофотосъемка может оказаться предпочтительной, поскольку она позволяет быстро охватить большую площадь.

Геодезические условия: Точность съемки также зависит от геодезических условий на территории. Например, на территориях с сложным рельефом или плотной застройкой точность метода съемки может быть ниже из-за ограниченной видимости или сложности доступа к точкам съемки.

Используемое оборудование: Выбор оборудования также влияет на точность съемки. Например, при использовании современных технологий, таких как GPS или лазерное сканирование, можно добиться более высокой точности даже на крупных территориях.

В целом, точность метода съемки обычно уменьшается с увеличением размера исследуемой территории из-за различных технических и организационных ограничений. Однако правильный выбор методов съемки и оборудования, а также учет особенностей конкретной территории, может помочь минимизировать этот эффект.

Современные технологии предоставляют возможность объединения различных видов пространственной информации, что открывает широкие перспективы для использования разнообразных комбинаций методов съемки. Один из наиболее разработанных подходов с технологической точки зрения — измерение координат автомобильных дорог с применением традиционных геодезических методов, таких как электронные тахеометры и цифровые нивелиры. Этот метод, несмотря на то, что он проверен временем и обеспечивает высокую точность до миллиметра, требует значительных затрат на создание высокоточного координатного пространства в области проведения измерений.

Другим перспективным подходом является мобильное лазерное сканирование, которое позволяет получать геопространственные данные с движущихся платформ, таких как автомобили, суда и железнодорожные платформы. Этот метод интегрируется с фото- и видеокамерами, спутниковыми приемниками позиционирования, такими как ГЛОНАСС/GPS, что позволяет собирать большой объем данных лазерного сканирования и видеоизображений с высокой точностью в сжатые сроки. Еще одним важным методом является аэросъемка, включая использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которая благодаря новым алгоритмам обработки и изменению методологии стала способной обеспечить информативное и точное ортофотопокрытие в кратчайшие сроки. Технология аэросъемки применяется для массивированного картографирования и 3D-моделирования различных объектов инфраструктуры, таких как автомобильные и железные дороги, ЛЭП, а также для создания цифровых моделей площадных объектов [11].

Проведен анализ практических материалов лазерного сканирования, полученных в результате проведения работ, и сформулированы рекомендации по получению исходных данных, пригодных для последующей обработки. 1.2. Анализ технологии UAV в решении задач проектирования и реконструкции.

1.4 Проблемы и перспективы применения НЛС и UAV технологии для задач проектирования и реконструкции

Использование дронов регулируется законодательством, которое варьируется в разных странах и регионах. Существуют ограничения на высоту полета, зоны запрета и необходимость получения разрешений.

На территории Республики Казахстан полеты беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) регулируются "Правилами использования беспилотных авиационных систем в воздушном пространстве Республики Казахстан", начиная с 2021 были ужесточены правила эксплуатации дронов. Согласно этим правилам, использование беспилотных авиационных систем допускается только после их регистрации или постановки на учет в уполномоченной организации в сфере гражданской авиации. Полеты с применением БАС выполняются в соответствии с метеорологическими минимумами для полетов с применением беспилотных авиационных систем в зависимости от местности и вида полета [14].

Ограниченная емкость батарей UAV приводит к необходимости частой подзарядки или замены батарей, что снижает общую эффективность съемок на больших территориях. Разработка UAV с более емкими батареями, применение гибридных источников энергии или использование беспроводных систем зарядки.

Обработка больших объемов данных, полученных с НЛС и БПЛА, требует значительных вычислительных ресурсов и времени.

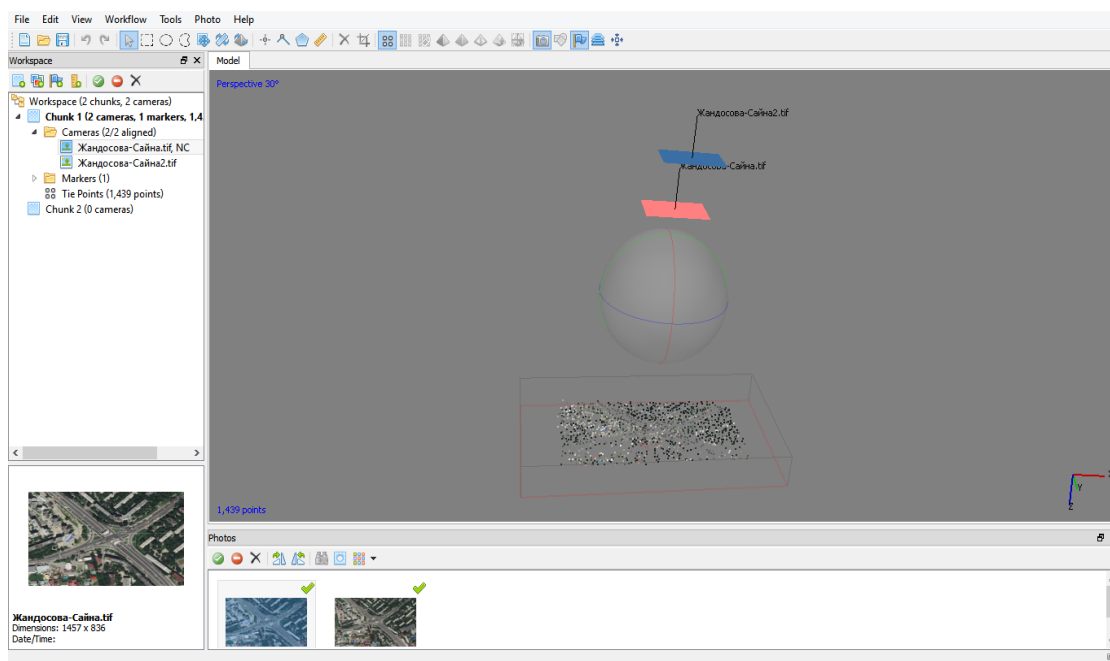


Рисунок 1.9 – Получение ортофоуплана тестового участка дороги Жандосова-Сайна-Абая

Вывод по 1 главе

Проведенный анализ литературных источников, показывает, что в настоящее время проблемы отображения земной поверхности на топографических картах остаются весьма актуальными. Анализ современных разработок в области цифрового картографирования подчеркивает значимость как построения самих моделей, так и их дальнейшей модификации с учетом стандартного программного обеспечения.

Прошлые исследования показывают тенденцию к созданию разреженных моделей, отвечающих требованиям точности отображения земной поверхности. В связи с этим разработка алгоритма построения цифровых моделей рельефа, использующего характерные черты ландшафта в максимальной степени, представляется весьма важной задачей.

Прогресс в области современной геодезии и картографии обусловлен не только переходом к цифровому уровню работы с пространственными данными, но и появлением новых типов геодезического оборудования, инструментов и технологий сбора информации о земной поверхности.

При использовании технологии лазерного сканирования необходимо уделить внимание камеральной обработке данных, включая классификацию точек лазерных отражений, выделение класса "земля" и контроль плотности точек лазерных отражений.

Для задач проектирования и реконструкции автомобильных дорог наиболее рациональным является использование НЛС и UAV.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СБОРА ДАННЫХ: ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЙ

2.1 Нормативные требования в задаче реконструкции и проектирования

Дорожная инфраструктура является ключевым элементом городского планирования, управления дорожным движением и реагирования на чрезвычайные ситуации. Точная информация о дорогах, их местоположении, ширине и характеристиках, необходима для различных приложений. Обычно эта информация хранится в геоинформационных системах (ГИС) и обновляется периодически, примерно каждые 1–5 лет. Однако, процесс оцифровки и обновления требует значительных трудозатрат и ресурсов, так как часто основывается на ортофотоснимках и топографических картах, а также на обследованиях на местности во время инженерных проектов.

С целью повышения эффективности и доступности создания и обновления дорожной инфраструктуры идут интенсивные исследования по использованию новых источников данных. Это включает в себя использование новых технологий, таких как спутниковая навигация, цифровая фотограмметрия, аэро и наземная фотограмметрия, а также инновационные геодезические методы и разработки. Одним из примеров таких исследований является воздушное лазерное сканирование (ВЛС), которое позволяет быстро и точно получать трехмерные данные о местности.

Для эффективной организации геодезических работ в строительстве применяются соответствующие нормативные документы, включая Строительные нормы и правила (СНиП) Республики Казахстан, а также руководящие документы, такие как «Геодезическая служба и организация геодезических работ в строительстве». Эти документы определяют классификацию геодезических работ и устанавливают правила и стандарты для их проведения, включая обеспечение безопасности труда на стройплощадке.

Создание топографических карт требует использования цифровых моделей рельефа, соответствующих нормативным требованиям к точности. При выборе метода съемки лучше всего учитывать геодезические методы, обеспечивающие высокую точность и надежность, а также использовать беспилотные летательные аппараты для фотограмметрической съемки, которые обеспечивают высокую эффективность в смысле скорости выполнения работ и обработки данных.

Целью данной работы является изучение современных методов сбора данных и сравнительного анализа результатов съемки для получения оценки точности и повышения производительности. Задачей нашей работы было выбрать такой метод получения цифровой модели местности (ЦММ), который позволил бы сократить время обработки и при этом оставить достоверность и дифференцированность. Создание и развитие построения может осуществляться как с помощью классических методов геодезических работ, так

и с помощью современных геодезических приборов. Наиболее проработанными с технологической точки зрения являются измерения координат дороги, выполняемые традиционными геодезическими методами с использованием электронных тахеометров и цифровых нивелиров (S.Babic, 2015, том 1)

Дорожные сети считаются, вероятно, самой важной инфраструктурой в современных путешествиях. Регулярная оценка их состояния необходима для осуществления надлежащего технического обслуживания и минимизации затрат. Например, раннее обнаружение трещин и их ремонт оказались эффективным методом продления срока службы дорог и поддержания безопасных условий движения. Хотя обнаружение трещин было целью ряда исследований в последние годы, многие проблемы все еще существуют. Например, обнаружение трещин на поверхностях с шероховатой текстурой требует большего внимания и исследования, поскольку шероховатая текстура может затруднить обнаружение трещин на цифровом изображении. Кроме того, текстура поверхности дорожного покрытия может быстро меняться в течение нескольких метров, что влияет на ходовые качества, сопротивление скольжению и безопасность дорожного движения. Существующие традиционные методы измерения текстуры поверхности, такие как тест песочных пятен (SPT), как правило, требуют много времени и отличаются качеством. Принимая во внимание, что современные методы, включающие мобильные лазерные сканирующие датчики (MLSS), могут давать точные результаты, но часто считаются слишком дорогими. В этом исследовании будет изучен альтернативный метод измерения текстуры поверхности дорожного покрытия с целью проверки потенциала цифровых изображений для мониторинга дорожного покрытия и оценки дорожного покрытия. Этот метод основан на быстром прогрессе в области обработки изображений и трехмерного моделирования на основе изображений. Данное исследование направлено на изучение возможности выявления повреждений дорожного покрытия из-за трещин и выбоин, а также характеристики глубины текстуры поверхности. Этот проект разделен на две части, первая часть предназначена для исследования или изучения использования цифровых изображений в видеорежиме для выявления трещин и выбоин. Во второй части проекта основное внимание будет уделено использованию цифровых неподвижных изображений для характеристики текстуры дорожного покрытия с целью извлечения соответствующих параметров безопасности, таких как глубина текстуры. Это исследование показало, что можно измерить глубину текстуры цифровых изображений с использованием разных камер с результатами, сравнимыми с SPT. Хорошая точность и высокая корреляция с SPT были достигнуты даже с камерами смартфонов. Также было показано, что можно собрать систему с помощью экономичных инструментов, таких как камера и портативный GPS. Затем, благодаря разработке алгоритма, стало возможным обнаруживать важные повреждения дороги, такие как трещины и выбоины, с хорошей точностью по сравнению с измеренными данными о доверии.

Транспортные службы многих стран нуждаются в высокоточных (2-20 см) цифровых моделях рельефа (ЦМР) вдоль дорог для различных приложений, связанных с транспортом. По сравнению с традиционными наземными съемками и аэрофотограмметрией, мобильное лазерное сканирование (MLS) имеет большой потенциал для быстрого получения высокоплотных и высокоточных трехмерных (3D) облаков точек, покрывающих дороги. Такие облака точек MLS могут быть использованы для создания высокоточных ЦМТ экономически эффективным способом. Однако большой объем, смешанная плотность и неравномерное распределение точек MLS, а также сложность дорожной обстановки делают создание ЦМР очень сложной задачей. Кроме того, большинство имеющихся программных пакетов были изначально разработаны для обработки облаков точек воздушного лазерного сканирования (ALS), которые нельзя напрямую использовать для обработки облаков точек MLS.

Карты мелкого масштаба, такие как масштаб 1:100000 и более детальные, применяются на начальных этапах проектирования для определения траектории. Результаты этого этапа позволяют сравнивать различные варианты и начинать их уточнение с использованием более крупномасштабных карт. Для создания длинных трасс используются карты различных масштабов, а также данные специальной аэрофототопографической съемки маршрутов. В начальной фазе выбора общего направления трассы используются карты меньшего масштаба, например, 1:500 000 или 1:100 000, в то время как для точной проработки положения трассы на более поздних этапах проекта требуются карты 1:25 000 или 1:10 000. По более детальным картам решаются вопросы проектирования преодоления естественных и искусственных препятствий и сооружений, прилегающих к трассе. Вид сооружения в значительной степени определяет основные параметры траектории. Сначала осуществляется анализ рельефа и обстановки по карте, после чего намечаются несколько возможных вариантов трассы. Отбирается наилучший вариант, который обеспечивает минимальные затраты на строительство и учет последующей эксплуатации дороги. Отклонения трассы в сторону для обхода препятствий могут привести к ее удлинению, поэтому желательно, чтобы углы поворота не превышали 15—25°. Однако на магистральных дорогах это требование является обязательным. При пересечении рек и оврагов не обязательно проводить линию нулевых работ до самой границы воды или тальвега; можно наметить необходимую точку на противоположном берегу на одной из горизонталей. Желательно пересекать реки под прямым углом к их направлению. В случаях, когда расстояние между горизонталями превышает определенное значение l , трасса пролегает в заданном направлении с учетом ситуационных факторов.

Для намеченной линии еще рано считать ее осью будущей дороги, поскольку она состоит из множества коротких отрезков, сопряжение которых кривыми невозможно из-за ограничения минимальных значений радиусов. В связи с этим линию нулевых работ необходимо заменить участками более

длинных прямых, или, иначе говоря, спрямить. Спрявление приводит к отклонению от линии нулевых работ, что вызывает появление насыпей и выемок на трассе. Однако, если спрявление выполнено с минимальными отклонениями от линии нулевых работ, объемы возникающих земляных работ будут незначительны. Началом проектируемой дороги следует считать место ее примыкания к существующей дороге.

Перед началом работ по проектированию необходимо провести следующие этапы: анализ имеющихся картографических, геодезических и прочих данных о районе, где планируется производство работ; выполнить проектные исследования для определения наиболее эффективных вариантов маршрута. В полевом этапе следует провести комплекс работ по топографической и геодезической съемке, а также выполнить необходимые проверочные работы для обеспечения качества, полноты и точности получаемых данных. На завершающем этапе, камеральном, выполняются следующие задачи: обработка данных, подготовка графических и текстовых материалов, составление технических отчетов и предоставление материалов для дальнейшего использования.

Проектирование инженерных объектов проходит через несколько стадий: разработка предварительной документации, инженерного проекта и рабочей документации. На стадии предварительного проектирования проводится анализ различных вариантов для выбора оптимального маршрута с учетом природных условий, экономических факторов и технологических возможностей. Стадия разработки предварительной документации включает три этапа: определение целей инвестиций, подготовка заявки на инвестиции и обоснование инвестиций. Для этой стадии используются обзорные карты с масштабами от 1:25 000 до 1:10 000, а также ситуационные планы с масштабами от 1:5000 до 1:1000.

Основные задачи инженерного проекта включают в себя обоснование технических решений для строительства, реконструкции или ремонта дорожных участков, а также определение объемов работ. На этой стадии разрабатывается тендерная документация и подготавливаются материалы для землеустройства. Для разработки инженерного проекта используются уточненные ситуационные планы с масштабами от 1:5000 до 1:500, а также топографические съемки с масштабами от 1:2000 до 1:500 с детализацией рельефа через 1-0,5 м.

Стадия разработки рабочей документации включает в себя обоснование технических решений для сложных участков маршрута, разработку дополнительной документации и подготовку тендерных материалов. На этой стадии используются топографические съемки с масштабами от 1:1000 до 1:500 для отображения текущих изменений вдоль маршрута.

Существует разнообразие методов создания топографических планов, включая теодолитную съемку, тахеометрическую съемку, нивелирование и фотограмметрическую съемку. Однако, в настоящее время, с развитием технологий дистанционного зондирования, особенно лазерного сканирования и

съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), точность, скорость и доступность сбора пространственных данных существенно возросли.

Классификация автомобильных дорог представлена в соответствии с нормативным документом СН РК «Автомобильные дороги» (Таблица 2.1). Расчетная скорость является ключевым параметром, используемым при проектировании автомобильных дорог различных категорий. Она учитывает максимально возможную скорость движения одиночного автомобиля в условиях нормального сцепления шин с покрытием дорожного полотна, а также соблюдение требований безопасности, удобства и комфорта передвижения.

Таблица 2.1. – Категории автомобильных дорог и расчетных скоростей

Категория дороги	Расчетные скорости (км/ч)		
	Основные расчетные скорости	На трудных участках местности	
		Пересеченная местность	Горная местность
I-a	150	120	80
I-б	120	100	60
II	120	100	60
III	100	80	50
IV	80	60	40
V	60	40	30

Эти значения расчетной скорости применяются для определения предельно допустимых параметров геометрических элементов плана, продольных и поперечных профилей на участках автомобильных дорог. Особенно важно учитывать эти параметры на участках, представляющих наибольшие трудности для проектирования, таких как пересеченные и горные местности.

Расчетные скорости зависят от категории дороги и типа местности, по которой она проходит. Основные скорости предназначены для условий нормального движения, тогда как на трудных участках местности (пересеченной и горной) они снижаются в соответствии с условиями безопасности и топографическими особенностями.

Пересечения и примыкания автомобильных дорог, как правило, следует проектировать на основании данных о перспективной интенсивности и составе транспортных потоков во всех направлениях.

Анализ параметров геометрических элементов дорожного проектирования позволяет обеспечить ясность и безопасность движения на автомобильных дорогах. Эти параметры применяются для управления видимостью дороги как в прямой линии, так и в изгибах, а также для предотвращения создания опасных ситуаций для водителей. Оценка плавности и зрительной ясности дороги часто осуществляется с помощью перспективных

изображений, что позволяет определить оптимальные параметры дорожной геометрии.

Нормативы и таблицы, представленные в тексте, определяют предельные значения продольных и поперечных уклонов дороги, а также требования к радиусам кривых и другим элементам проектирования. Например, уменьшение наибольших продольных уклонов на кривых малых радиусов напрямую зависит от радиуса самой кривой в плане, а допустимая длина участков с затяжным уклоном зависит от продольного уклона и высоты над уровнем моря. Эти нормативы регулируют проектирование серпантинных, а также предписывают использование определенных конструкций земляного полотна на косогорах.

Кроме того, при проектировании автомобильных дорог важно учитывать местные условия и экологические особенности. Например, устойчивость косогоров, склоны которых представляют особый интерес для инженеров, требует специальных расчетов и мер предосторожности. А также следует учитывать меры по охране окружающей среды, включая меры по снижению шума и минимизации воздействия на чувствительные экосистемы.

Таким образом, анализ параметров геометрических элементов дорожного проектирования позволяет обеспечить безопасность и удобство движения на дорогах, а также соблюсти требования экологической устойчивости и уровня комфорта для пользователей.

Классификация автомобильных дорог играет ключевую роль в планировании, строительстве и эксплуатации дорожной инфраструктуры. В Республике Казахстан автомобильные дороги подразделяются на несколько категорий в зависимости от их назначения и значимости. В данном обзоре рассматриваются основные типы автомобильных дорог, их наименование и индексация, а также принципы исчисления расстояний на дорогах общего пользования.

Автомобильные дороги Республики Казахстан делятся на основные категории (таблица 2.2.)

Таблица 2.2 – Категории автомобильных дорог РК

Тип дороги	Описание
Международного значения	Дороги, соединяющие столицы соседних государств, а также входящие в международную сеть автомобильных дорог в соответствии с межгосударственными соглашениями.

Продолжение таблицы 2.2

Республиканского значения	Дороги, обеспечивающие транспортное сообщение между крупными административными, культурными и экономическими центрами Республики Казахстан и соседних государств. Также сюда входят дороги оборонного значения, за исключением дорог международного значения.
Областного значения	Дороги, соединяющие административные центры с областными и районными центрами, а также с объектами туристической деятельности, находящимися вне населенных пунктов. Эти дороги также связывают районные центры с дорогами республиканского значения.
Районного значения	Дороги, соединяющие районные центры с сельскими населенными пунктами и объектами туристической деятельности, расположенными вне населенных пунктов.
Автомобильные дороги общего пользования	Дороги, предназначенные для транспортного сообщения между различными населенными пунктами и регионами.
Хозяйственные автомобильные дороги	Дороги, используемые для внутренних нужд предприятий и хозяйств.
Улицы населенных пунктов	Дороги, расположенные внутри населенных пунктов и предназначенные для движения транспортных средств и пешеходов.

Все автомобильные дороги общего пользования в Республике Казахстан должны иметь наименование и индекс. Наименование включает названия начального и конечного населенных пунктов, а при необходимости — промежуточных пунктов.

Расстояния на автомобильных дорогах общего пользования исчисляются между начальными и конечными населенными пунктами. Отсчет километров для дорог, выходящих из столицы, начинается от здания Парламента Республики Казахстан. Для дорог, выходящих из других населенных пунктов, отсчет ведется от зданий местных исполнительных органов или от границ населенных пунктов.

Протяженность автомобильных дорог общего пользования определяется расстоянием между границами соответствующих населенных пунктов или пересечением осей сопрягающихся дорог. Протяженность улиц населенных пунктов измеряется в пределах границ этих населенных пунктов. Организация работ по разработке технико-экономических обоснований, диагностике и паспортизации автомобильных дорог международного и республиканского значения осуществляется в соответствии с законодательством Республики Казахстан о государственных закупках и концессиях.

Работы по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования международного и республиканского значения проводятся в соответствии с бюджетным законодательством Республики Казахстан.

Организация работ по мониторингу безопасности дорожной инфраструктуры автомобильных дорог международного и республиканского значения включает разработку и утверждение правил формирования и ведения дорожной базы данных, а также ведомственную экспертизу технической документации на средний ремонт автомобильных дорог общего пользования.

Классификация автомобильных дорог Республики Казахстан и связанные с ней процессы наименования, индексации и исчисления расстояний играют важную роль в эффективном управлении дорожной инфраструктурой. Организация работ по ремонту, содержанию и мониторингу безопасности дорог обеспечивает их надежную эксплуатацию и развитие в соответствии с международными стандартами и национальными потребностями. Согласно Статьи 15, настоящего Закона «О качестве работ при осуществлении дорожной деятельности»:

1. Проектирование, строительство, реконструкция, ремонт и содержание автомобильных дорог осуществляются в соответствии с установленными требованиями и нормами, с применением разрешенных к использованию материалов, приборов, оборудования и средств измерений с целью достижения высоких транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог (скорость, ровность, долговечность, повышенные условия безопасности движения автотранспорта). Транспортные службы многих стран нуждаются в высокоточных (2-20 см) цифровых моделях рельефа (ЦМР) вдоль дорог для различных приложений, связанных с транспортом. По сравнению с традиционными наземными съемками и аэрофотограмметрией, мобильное лазерное сканирование (MLS) имеет большой потенциал для быстрого получения высокоплотных и высокоточных трехмерных (3D) облаков точек, покрывающих дороги. Такие облака точек MLS могут быть использованы для создания высокоточных ЦМТ экономически эффективным

способом. Однако большой объем, смешанная плотность и неравномерное распределение точек MLS, а также сложность дорожной обстановки делают создание ЦМР очень сложной задачей. Кроме того, большинство имеющихся программных пакетов были изначально разработаны для обработки облаков точек воздушного лазерного сканирования (ALS), которые нельзя напрямую использовать для обработки облаков точек MLS.

Проектирование трассы автомобильных дорог включает использование карт различных масштабов на разных этапах планирования. Данный процесс требует тщательного выбора и уточнения маршрута для обеспечения оптимального сочетания экономичности строительства и эффективности эксплуатации дороги.

Карты мелкого масштаба (от 1:100 000 и мельче) используются на ранних стадиях проектирования для предварительного трассирования. Они позволяют сравнивать различные варианты маршрутов и принимать решения о дальнейшем уточнении с использованием карт более крупного масштаба. На данном этапе важными источниками информации являются также данные маршрутной аэрофототопографической съемки.

Камеральное трассирование длинных линий осуществляется с применением карт различных масштабов. На начальном этапе для выбора общего направления трассы используются карты масштабов 1:500 000 и 1:100 000. На стадии проектирования для уточнения положения трассы необходимы карты масштабов 1:25 000 и 1:10 000. По картам более крупного масштаба решаются задачи проектирования переходов через естественные и искусственные преграды, а также сооружений, примыкающих к трассе.

Учет рельефа и ситуационных препятствий

Первоначально анализируется рельеф и ситуация по карте, что позволяет наметить несколько возможных вариантов трассы. Оптимальный вариант выбирается с учетом минимальных затрат на строительство и дальнейшую эксплуатацию дороги. Отклонения трассы для обхода ситуационных препятствий могут привести к ее удлинению, поэтому рекомендуется, чтобы углы поворота трассы не превышали 15—25°.

При пересечении трассой рек и оврагов не требуется прокладывать линию нулевых работ до самого уреза воды или тальвега. Достаточно наметить нужную точку на противоположном берегу на одноименной или соседней горизонтали. Желательно, чтобы пересечения рек происходили перпендикулярно направлению русла.

Намеченная линия еще не является окончательной осью будущей дороги, так как состоит из множества коротких отрезков, сопряжение которых кривыми невозможно из-за ограничения минимальных значений радиусов. Поэтому линию нулевых работ приходится заменять участками более длинных прямых, что называется спрямлением. Спрямление ведет к отклонению от первоначальной линии нулевых работ и появлению насыпей и выемок. Однако, если спрямление выполнено с небольшими отклонениями, объем земляных работ будет невелик.

Проектируемая дорога начинается с места ее примыкания к существующей дороге. На всех этапах проектирования необходимо учитывать экономические и эксплуатационные аспекты, чтобы обеспечить эффективное и рациональное использование ресурсов при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог.

Масштабы топографических съемок следует устанавливать в зависимости от характеристики участков съемки и видов проектируемых сооружений.

Масштабы топографических съемок в значительной степени зависят от целей съемки, доступной техники и требуемой точности данных. Вот некоторые типичные характеристики участков съемки и соответствующие масштабы:

Общие карты: Для общего обзора местности или планирования маршрутов могут использоваться масштабы 1:50 000 или 1:25 000.

Инженерные проекты: Для инженерных проектов, таких как строительство дорог, зданий и других инфраструктурных объектов, обычно требуется более высокая точность. Масштабы 1:5 000 или 1:10 000 могут быть стандартными.

Исследовательские и научные работы: Для более детального изучения местности, включая геологические или экологические исследования, может потребоваться еще более высокий масштаб, например, 1:2 000 или 1:1 000.

Градостроительное планирование: Для планирования городских районов, зонирования земли и разработки градостроительных проектов может потребоваться очень высокая точность, и масштабы могут быть еще более детализированными, например, 1:500 или даже 1:200.

Экстремальные условия: В некоторых случаях, таких как планирование эвакуации из зон опасности (например, вулканических или сейсмических), могут потребоваться крайне высокие масштабы, допускающие очень подробное изображение местности, например, 1:100 или даже выше.

Эти масштабы являются лишь общими рекомендациями и могут варьироваться в зависимости от конкретной ситуации и требований заказчика.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) играет важную роль при проектировании и реконструкции автодорог. Полученная ЦМР помогает инженерам и проектировщикам более точно понимать местность, определять оптимальные маршруты дорог, учитывать рельеф и предотвращать проблемы, связанные с географическими особенностями, такими как перепады высот или изгибы поверхности. Это улучшает точность проектирования и помогает создавать более эффективные и безопасные автодороги.

Цифровая модель рельефа (DEM) является важнейшим инструментом при проектировании и строительстве автомагистралей. Он предлагает трехмерное представление местности, что помогает инженерам понять особенности ландшафта. Использование DEM при проектировании автомагистралей включает анализ местности для определения наиболее эффективного маршрута, оценку объема земляных работ, планирование дренажных систем и оценку потенциального воздействия на окружающую среду. DEM помогает определить

наилучшее расположение дороги, учитывая такие факторы, как минимизация выемок и насыпей, избегание экологически чувствительных зон и оптимизация уклона дороги для обеспечения безопасности и эффективности. Он также играет ключевую роль при проектировании таких объектов, как мосты и туннели, где необходимы точные топографические данные. Кроме того, DEM помогает моделировать и анализировать структуру потока воды, что имеет решающее значение для эффективного проектирования дренажной системы. Это гарантирует, что дорога останется безопасной и проходимой в неблагоприятных погодных условиях, сокращая затраты на техническое обслуживание и продлевая срок службы дороги.

Допуски на геодезические и строительные работы при строительстве автодорог играют ключевую роль в обеспечении качества, безопасности и долговечности дорожного покрытия. Точное соблюдение этих допусков позволяет достичь высоких стандартов проектирования и строительства, гарантируя надежность и эффективность эксплуатации автодорог.

Допуски на геодезические и строительные работы при строительстве автодорог включают несколько важных аспектов, каждый из которых имеет ключевое значение для обеспечения качества и безопасности дорожного покрытия. Во-первых, геодезические допуски играют критическую роль. Плановые допуски относятся к точности соответствия проектным координатам осей дорог, развязок и пересечений. Это включает точность установления осей дорог, что обеспечивает правильное расположение всех элементов дорожной инфраструктуры относительно друг друга и окружающей среды. Высотные допуски касаются точности установления отметок проезжей части, бордюров и тротуаров. Правильное соблюдение высотных параметров критично для обеспечения необходимого уклона для дренажа и предотвращения затопления. Допуски на разметку осей дороги включают точное нанесение осевых линий в соответствии с проектом, что необходимо для правильного и безопасного движения транспортных средств.

Допуски на земляные работы включают уровни и уклоны, а также плотность укладки. Допуски на глубину выемки и насыпи обеспечивают правильную форму и уклон дорожного полотна, что важно для создания стабильной и долговечной основы дороги. Допуски на степень уплотнения земляного полотна влияют на долговечность и прочность дорожной конструкции. Недостаточная уплотненность может привести к просадкам и деформациям, что негативно скажется на качестве дороги.

При строительстве дорог предъявляется ряд требований прежде всего к качеству дорожного покрытия, его плотности. Для достижения необходимого уровня точности, то есть соблюдения необходимой плотности, как сообщается в работе [152], после укладки асфальта катки должны произвести уплотнение. Исходя из характеристик катка, определяют количество проходов машины по покрытию. Дефекты, возникающие при неправильном количестве проходов катка и при заездах его на соседнюю полосу, где работает другой каток, могут значительно уменьшить целостность дорожного покрытия и привести к

огромным затратам по ремонту. Согласно Государственным строительным нормам [СНиП] для выполнения определенных видов строительных работ установлены такие допуски (Таблица 2.3):

Таблица 2.3 – Допуски строительных видов работ

Параметры	Машины без автоматической системы задания вертикальных отметок	Машины с автоматической системой задания вертикальных отметок
Земляное полотно		
Вертикальные отметки по продольному профилю, мм	50	10
Расстояние между осью и краем земляного полотна, см	10	10
Поперечные уклоны	0.010	0.005
Крутизна откосов, %	10	10
Поперечные размеры кюветов, нагорных и других канав (по дну), см	5	5
Глубина кюветов при условии обеспечения стока, см	5	5
Поперечные размеры дренажей, см	5	5
Продольные уклоны дренажей, %	10	10
Ширина насыпных берм, см	20	20
Асфальтобетонное покрытие		
Ширина покрытия, см	10	10
Вертикальные отметки по оси, мм	50	10
Поперечные уклоны	0.010	0.005
Цементобетонное покрытие		
Ширина покрытия, см	5	5
Вертикальные отметки по оси, мм	50	10
Поперечные уклоны	0.010	0.005
Разница по высоте в швах покрытия, мм	3	2

Выполнение дорожных строительных работ требует обеспечения определенного уровня точности, который должен находиться в диапазоне от 1 до 20 сантиметров в поперечном и продольном направлениях. К тому же, наличие условия непрерывности работ крайне важно, поскольку на участке одновременно работает большое количество техники, и остановка одной машины из-за отсутствия информации о своем местоположении может привести к остановке всего механизированного комплекса.

Качество дорожного покрытия обычно оценивается по степени его ровности и шероховатости поверхности. Эти показатели напрямую влияют на безопасность и комфортабельность движения по дороге. При правильном выполнении работ распределение неровностей на дороге носит случайный характер и в общем случае может быть представлено разложением в ряд Фурье. Для установления верхней границы размеров неровностей рассматривается идеализированный случай — синусоидальные неровности, которые особенно опасно влияют на водителя и автомобиль. Верхняя граница размеров неровностей устанавливается на основе анализа частоты колебаний автомобиля, возникающих при проезде неровности синусоидальной формы.

$$h = H \sin \frac{2\pi x}{L}$$

В параметрах оценки неровностей дорожного покрытия выделяют следующие важные характеристики:

1. Высотное положение точки на поверхности неровности относительно оси X — этот параметр отражает вертикальное смещение конкретной точки на поверхности дороги относительно номинального уровня дороги, задаваемого осью X . Он показывает, насколько точка возвышается или опускается относительно базовой плоскости.

2. Амплитуда отклонения поверхности неровности — этот параметр измеряет максимальное вертикальное отклонение поверхности неровности от её среднего положения (например, наивысшая и наинизшая точки волновой формы). Амплитуда важна для определения степени воздействия неровности на транспортные средства и комфорт пассажиров.

3. Расстояние от начала координат до точки — это линейное измерение от заданной начальной точки (например, начала участка дороги) до точки на дорожной поверхности, где была замечена неровность. Этот параметр помогает в планировании и анализе распределения неровностей на отдельных участках дороги.

4. Длина волны неровности — параметр, который характеризует расстояние между двумя последовательными пиками (или впадинами) волновой формы неровности. Длина волны важна для оценки реального воздействия неровности на движущиеся автомобили, так как определяет

частоту колебаний, испытываемых транспортным средством при проезде по такой поверхности.

Эти параметры помогают оценить не только текущее состояние дорожного покрытия, но и планировать меры по его ремонту и улучшению. Они также используются для расчета оптимальных параметров дорожного оборудования, такого как катки для уплотнения асфальта, чтобы обеспечить необходимую ровность и устойчивость дорожного покрытия.

Вот пример таблицы, переформатированной для четкого понимания требований к точности МКС (мобильной картографической системы), с указанием СКО (среднеквадратическое отклонение) для различных объектов дорожной инфраструктуры (таблица 2.4):

Таблица 2.4 – Требования к точности МКС

Категория точности	Объекты с СКО 2 см	Объекты с СКО 10-20 см	Объекты с СКО 1 м
Точные объекты	Швы, линии разметки движения, уклоны на прямых и криволинейных участках	Край дороги, бордюры и обочины	Дорожные знаки, столбы, деревья, защитные ограждения, светофоры, газоны, кустарники
Средняя точность	Залезные переезды, проезды под мостами	Перекрестки, тротуары, стены туннелей	Эстакады, мосты над реками, опоры мостов
Низкая точность	Местные неровности дорожного покрытия	Кюветы, крышки люков, ограничители скорости	Здания в пределах 100 м от дороги, канавы, места вызова технической и другой аварийной помощи

Ошибки съемки автодорог с помощью мобильной картографической системы: Ошибки определения координат объектов дорожной инфраструктуры в системе координат МКС и ошибки геодезического обеспечения составляют существенную часть общей погрешности. Принцип равного влияния применяется для определения ошибки съемки, предполагая, что все источники ошибок вносят одинаковый вклад в конечный результат измерений.

$$\left. \begin{aligned} m_3 &= \sqrt{m_{r_p}^2 + m_{\Gamma 3}^2} \\ m_{r_p, \Gamma 3} &= \frac{m_3}{\sqrt{2}} \end{aligned} \right\}$$

Это разделение объектов по классам точности позволяет оптимизировать процесс планирования и выполнения геодезических работ в зависимости от требуемой точности и значимости объектов. Такой подход увеличивает эффективность использования ресурсов и средств измерения, а также повышает качество и надежность результатов картографической съемки.

При съемке автодорог с помощью мобильной картографической системы, ошибки определения координат объектов в системе координат и геодезические ошибки составляют значительную часть общей погрешности. Для определения ошибок съемки используется принцип равного влияния, предполагающий, что все источники ошибок оказывают одинаковое влияние на итоговый результат измерений.

Классификация объектов по уровню точности позволяет более эффективно планировать и выполнять геодезические работы, учитывая требуемую точность и важность объектов. Этот подход способствует более рациональному использованию ресурсов и средств измерения, что, в свою очередь, повышает качество и надежность результатов картографической съемки.

На основе анализа существующих требований к точности съемки автодорог можно предложить следующую классификацию по точности съемки, представленную в таблице 2.5

Таблица 2.5 – Классификация по точности съемки автодорог

Класс точности	Объекты	Погрешность съемки (СКО)
Высокоточная съемка	Швы, линии разметки движения, уклоны на прямых и криволинейных участках	До 2 см
Среднеточная съемка	Край дороги, бордюры, обочины, тротуары, стены туннелей, перекрестки	10-20 см
Низкоточная съемка	Дорожные знаки, столбы, деревья, ограждения, светофоры, газоны, мосты, кюветы, здания	До 1 м

Эта классификация позволяет четко определить необходимую точность съемки для различных объектов дорожной инфраструктуры, что способствует эффективному планированию геодезических работ и повышению качества данных, получаемых в процессе съемки автодорог.

Обеспечение выдвинутых требований возможно только при использовании самых современных технологий. Только в этом случае можно достичь высокой точности, скорости выполнения работ и оперативного реагирования.

Допуски на устройство основания и покрытия включают толщину слоев, ровность поверхности и качество материалов. Допуски на толщину каждого слоя основания и дорожного покрытия обеспечивают равномерность и

прочность дорожной конструкции. Соблюдение этих допусков предотвращает преждевременные разрушения и деформации. Допуски на отклонения поверхности дорожного покрытия от проектного уровня важны для комфорта и безопасности движения. Эти допуски контролируются с использованием специальных измерительных приборов. Материалы, используемые при строительстве дороги, такие как асфальт и щебень, должны соответствовать установленным стандартам и требованиям. Допуски на качество материалов гарантируют долговечность и надежность покрытия.

Допуски на асфальтирование включают температуру укладки и ширину полос укладки. Допуски на температуру асфальтобетонной смеси в момент укладки критичны для достижения оптимальной плотности и прочности покрытия. Несоблюдение этих допусков может привести к низкому качеству покрытия. Допуски на ширину полосы асфальта, укладываемого за один проход, обеспечивают однородность и ровность покрытия, что влияет на качество и долговечность дороги.

Допуски на бетонные работы, если применяется бетонное покрытие, включают соотношение компонентов смеси и время застывания. Допуски на пропорции цемента, воды и заполнителей в бетонной смеси влияют на прочность и долговечность покрытия. Точное соблюдение этих параметров необходимо для достижения проектных характеристик. Допуски на время схватывания бетона обеспечивают необходимую прочность и долговечность. Несоблюдение этих параметров может привести к появлению трещин и разрушений.

Допуски на монтаж инженерных сооружений включают монтажные размеры, которые касаются расположения и установки инженерных сооружений, таких как водоотводы и мосты, относительно дорожного полотна. Эти допуски критичны для обеспечения правильного функционирования и интеграции инженерных сооружений с дорожной инфраструктурой.

Эти нормативы обеспечивают унифицированный подход к геодезическим работам при проектировании дорог, что способствует повышению качества проектирования и строительства дорожной инфраструктуры. Существующие СНиПы, регламентирующие геодезические работы при проектировании автомобильных дорог, включают несколько ключевых нормативных документов. Одним из основных является СНиП 2.05.02-85*, который обновлен и представлен в виде СП 34.13330.2012 и СП 34.13330.2021. Эти своды правил охватывают различные аспекты проектирования автомобильных дорог, в том числе требования к геодезическим работам.

Точность высотного обеспечения при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог регулируется рядом стандартов и нормативов, таких как ГОСТ Р 58442-2019, ГОСТ 32755-2014 и ГОСТ Р 50597-2017. Эти стандарты охватывают все этапы строительного процесса, от входного контроля материалов до приемки объектов в эксплуатацию, и включают технические требования и методы контроля для поддержания эксплуатационного состояния дорог.

В рамках этих документов обсуждаются различные технические аспекты, такие как требования к материалам (например, к песку, щебню, геосинтетическим материалам), методы учета интенсивности движения, классификация и требования к элементам обустройства дорог, а также правила проектирования самих дорог и их геометрических элементов. СНиП 3.06.03-85, например, включает рекомендации по организации дорожно-строительных работ, в том числе требования к укладке и уплотнению материалов дорожной одежды, контролю за качеством выполняемых работ и организации строительства.

Эти нормативы являются важными руководствами для инженеров и геодезистов, участвующих в проектировании и строительстве автомобильных дорог, поскольку они обеспечивают единые стандарты и требования к качеству, безопасности и долговечности дорожной инфраструктуры.

СП 34.13330.2021 "СНиП 2.05.02-85* Автомобильные дороги" включает обновленные нормы и требования к проектированию автомобильных дорог. Хотя этот документ охватывает множество аспектов строительства дорог, включая проектирование, материалы и строительные процессы, детали, касающиеся конкретно геодезических работ, могут быть более ограниченными и общими.

Геодезические работы в контексте проектирования автомобильных дорог обычно включают такие задачи, как:

- Создание топографических планов местности, на которой предполагается строительство дороги.
- Выполнение геодезических измерений для точного планирования маршрута дороги, включая определение уклонов, кривизны и других геометрических параметров.
- Разработка планов размещения дорожных элементов, таких как знаки, разметка, светофоры и другие навигационные и безопасные элементы.

Важно отметить, что конкретные нормы и требования могут меняться в зависимости от типа дороги, местности, климатических условий и других факторов, учитываемых при проектировании. СНиПы обеспечивают общие руководящие принципы и стандарты, которые должны соблюдаться в процессе проектирования и строительства, чтобы гарантировать безопасность, функциональность и долговечность дорожной инфраструктуры.

Точность высотного обеспечения при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог является критически важным аспектом, который охватывает несколько ключевых направлений. Рассмотрим основные из них.

Строительный контроль: В соответствии с ГОСТ Р 58442-2019, строительный контроль включает в себя входной контроль материалов, конструкций и технической документации, операционный контроль в процессе строительно-монтажных работ и приемочный контроль продукции. Эти меры контроля способствуют обеспечению точности высотных параметров в строительстве автомобильных дорог. Согласно ГОСТ 32755-2014, все объекты строительства подлежат приемке в эксплуатацию для определения их

соответствия проектной документации и нормативно-техническим требованиям. Приемка включает оценку готовности объекта строительства и возможности использования построенных участков дорог.

Технические требования и методы контроля: В ГОСТ Р 50597-2017 описываются требования к эксплуатационному состоянию автомобильных дорог и улиц, а также методы контроля, которые помогают обеспечить безопасность дорожного движения. Эти требования включают, например, методы измерения ровности дорожных покрытий.

Проектная и рабочая документация, согласно ГОСТ Р 58442-2019, играют важную роль в обеспечении точности высотного положения оснований и покрытий автомобильных дорог, отражая как инженерно-технические, так и конструктивные решения.

В общем, достоверность высотного обеспечения в процессе строительства и эксплуатации автомобильных дорог определяется строгим соблюдением установленных стандартов и норм, а также качеством проведения строительных и контрольных мероприятий на всех этапах проектирования и функционирования дорожной инфраструктуры.

2.2 Методика и технология создания ЦМР по данным НЛС

Спектральные свойства асфальтированных дорог существенно отличаются от растительного покрова и большинства строительных материалов. Например, коэффициент отражения асфальта с галькой составляет 17% для инфракрасного лазера, что значительно отличается от других основных материалов. Дорожные тротуары, прикрепленные к гладкой поверхности, могут быть аппроксимированы в виде перекрестно соединенных лент с постоянным коэффициентом отражения и невысокой высотой. Таким образом, дороги могут быть описаны в виде перекрестно соединенных лент, имеющих стабильный коэффициент отражения и низкую высоту. Для выявления дорожных лент и создания моделей осевых линий дорог в городских районах автором применяется классификация данных об интенсивности и высоте. [Диссертация на соискание степени доктора философии. Автоматизированное извлечение цифровых моделей рельефа, дорог и зданий с использованием данных аэролазерного сканирования. Йонг Ху, Калгари, Альберта, 2003].

Технологический процесс создания цифровой модели рельефа (ЦМР) (рисунок 2.2) включает несколько основных этапов, каждый из которых направлен на получение точной и актуальной модели земной поверхности. Сначала осуществляется сбор исходных данных с использованием различных методов, таких как аэрофотосъемка, спутниковые снимки, лидарное сканирование или беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Далее проводится обработка данных: выполняется предварительная фильтрация, устранение шумов и коррекция геометрических и радиометрических искажений. После обработки создаются исходные цифровые модели, такие как

цифровая модель высот (ЦМВ) и цифровая модель поверхности (ЦМП), которые затем объединяются и корректируются для построения окончательной ЦМР. На заключительном этапе осуществляется верификация и оценка качества модели, включая проверку точности и сопоставление с контрольными точками, что позволяет создать высокоточную и надежную цифровую модель рельефа для дальнейшего использования в различных геодезических и картографических приложениях.

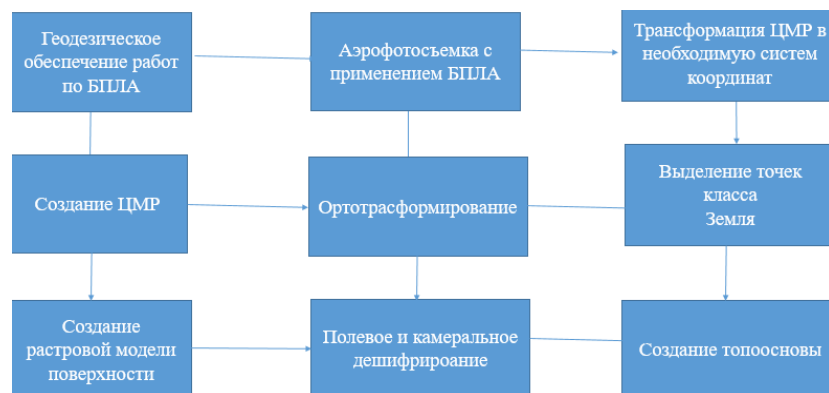


Рисунок 2.2 - Технологическая схема процесса создания ЦМР

Сравнение TLS (наземное лазерное сканирование) и БПЛА (беспилотный летательный аппарат) для дорожного строительства (рисунок 2.3). Перечисление характеристик каждой технологии помогает выделить их уникальные особенности и потенциал применения в сфере дорожного строительства.

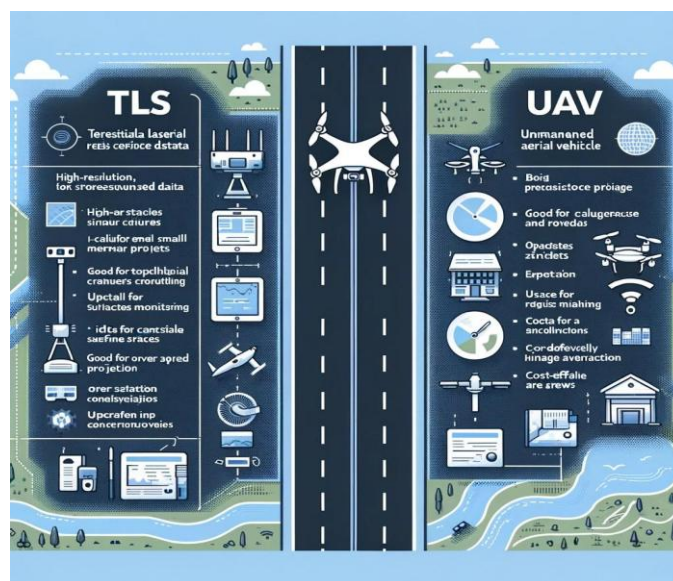


Рисунок 2.3 – Характеристики каждой технологии перечислены, чтобы подчеркнуть их особые возможности и варианты использования в контексте дорожного строительства

Качество исходных данных, получаемых с помощью БПЛА, играет решающую роль в точности конечных моделей. Точность и детализация 3D-моделей, ортофотопланов и других продуктов напрямую зависят от качества исходных изображений. Чем выше качество данных, тем меньше ошибок и искажений возникает на этапах их обработки, что гарантирует высокую точность и надежность конечных результатов. Поэтому правильная настройка параметров полета БПЛА (рисунок 2.4) имеет критическое значение для обеспечения высокого качества создаваемых материалов. Однако не все параметры, влияющие на точность данных, можно контролировать. Например, мы можем настраивать такие параметры, как высота полета и скорость, но характеристики камеры и объектива зависят от самого оборудования. Соответственно, параметры можно разделить на две группы: контролируемые и неконтролируемые.

Контролируемые параметры — это те, которые можно изменять в зависимости от требований задачи, такие как высота и скорость полета, угол наклона камеры и процент перекрытия снимков. Неконтролируемые параметры включают характеристики съемочного оборудования, например, спецификации камеры и объектива.

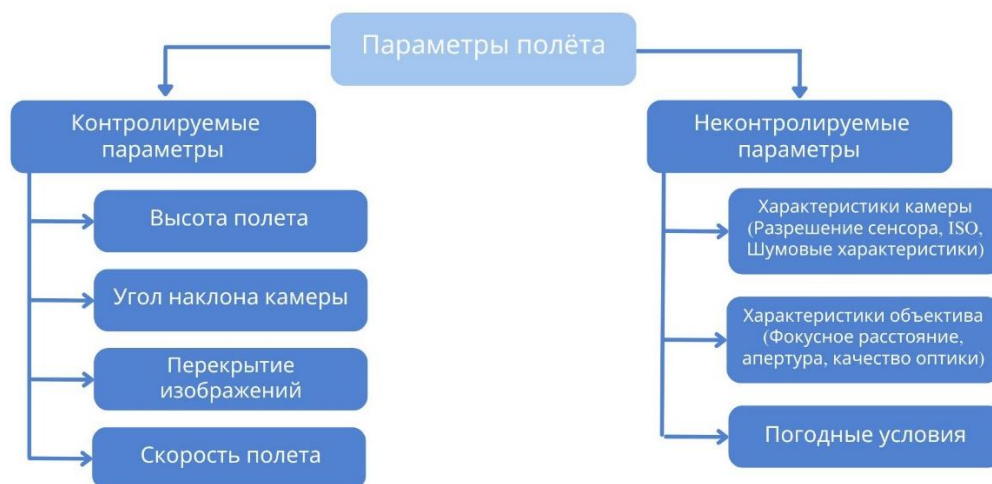


Рисунок 2.4 – Параметры полёта БПЛА

Влияние высоты полета на масштаб аэрофотосъемки. Рабочий диапазон высот полета оказывает значительное влияние на один из ключевых параметров аэрофотосъемки — масштаб. Масштаб аэрофотоснимка определяется по формуле:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H_{\Phi}}$$

Где f — фокусное расстояние объектива аэрофотоаппарата,

H_{Φ} – высота фотографирования над средней плоскостью (средняя абсолютная высота рельефа) объекта съемки.

Масштаб аэрофотоснимка представляет собой отношение фокусного расстояния объектива к высоте полета над местностью. Он показывает, во сколько раз уменьшены реальные размеры объектов на снимке. Чем выше высота полета, тем меньше масштаб снимка, и наоборот, чем ниже высота полета, тем больше масштаб.

При планировании аэрофотосъемки учитывают различные рабочие высоты полета, так как они определяют масштаб будущих снимков, что, в свою очередь, влияет на точность и детализацию полученных данных. Наиболее распространенные диапазоны высот и соответствующие им масштабы выбираются в зависимости от задач съемки и требуемой точности картографирования.

Понимание влияния высоты полета на масштаб аэрофотосъемки критически важно для планирования съемки и последующего картографического анализа. Выбор оптимальной высоты полета обеспечивает баланс между охватом территории и детализацией снимков, что важно для точного картографирования и анализа местности.

Исследование точности геодезического метода. Технологическая схема (предложения по усовершенствованию), предварительный расчет точности. Исследование точности фотограмметрического метода. Проектирование съемки, технологическая схема. Direct Georeferencing – расчет полета $\Delta H > 100\text{ м} < 100\text{ м}$ (рисунок 2.5).

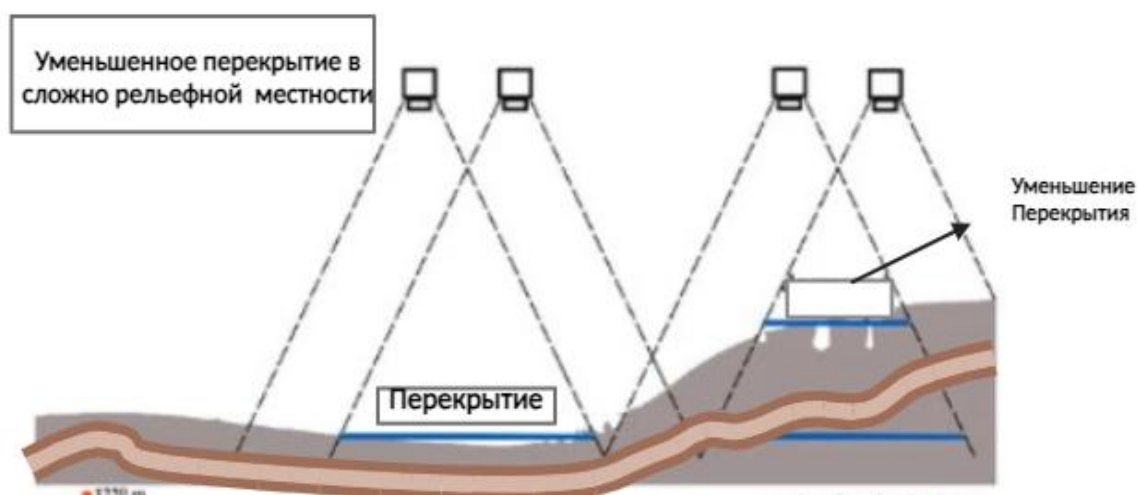


Рисунок 2.5 – Оценка расчета полета Direct Georeferencing

Direct Georeferencing (DG) стала новаторским методом фотограмметрии с БПЛА, фундаментально меняющим способы сбора и обработки геопространственных данных. Непосредственно определяя географические

координаты и ориентацию аэрофотоснимков с использованием данных ГНСС (глобальной навигационной спутниковой системы) и IMU (блока инерциальных измерений), DG сводит к минимуму или устраняет необходимость в наземных контрольных точках (GCP). В этой статье рассматриваются основные компоненты, рабочий процесс, преимущества, проблемы и реальные применения DG в фотограмметрии с БПЛА.

Direct Georeferencing в фотограмметрии с БПЛА предлагает преобразующий подход к сбору геопространственных данных. Его способность предоставлять высокоточные данные с меньшей зависимостью от GCP делает его бесценным инструментом в различных приложениях, от сельского хозяйства до городского планирования. Несмотря на проблемы, связанные с затратами на оборудование и требованиями к опыту, эффективность, скорость и гибкость DG обеспечивают его растущее внедрение в геопространственной отрасли. Реальные приложения демонстрируют его практические преимущества и подчеркивают потенциал будущих инноваций и улучшений в этой области.

Оценка расчета полета с использованием Direct Georeferencing (Прямого Геопрограммирования) включает несколько ключевых этапов и факторов. Direct Georeferencing позволяет напрямую определить географическое положение объектов на основе данных GPS и инерциальных измерений, без необходимости использования наземных контрольных точек (GCPs). Этот метод применяется в аэрофотосъемке, беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и других геодезических задачах. Оценка расчета полета включает следующие аспекты:

1. Точность датчиков. Точность Direct Georeferencing зависит от точности GPS/ГНСС приемников и инерциальных измерительных систем (IMU):

GPS/ГНСС: Двухчастотные приемники (L1/L2) обычно обеспечивают более высокую точность, особенно при использовании технологий RTK (Real-Time Kinematic) или PPK (Post-Processed Kinematic).

IMU: Точность угловых измерений зависит от характеристик гироскопов и акселерометров.

2. Калибровка системы. Перед началом полетов необходимо выполнить калибровку системы, чтобы синхронизировать координаты из GPS и угловые измерения из IMU. Это включает:

Лабораторную калибровку: Проводится в условиях лаборатории для установления базовых характеристик датчиков.

Полевую калибровку: Проверка и настройка системы в реальных условиях эксплуатации.

3. Синхронизация данных. Необходимо обеспечить точную синхронизацию данных от GPS и IMU, чтобы исключить временные расхождения, которые могут привести к ошибкам в геопривязке.

4. Обработка данных. Процесс включает:

Фильтрацию данных: Удаление шумов и помех из данных GPS и IMU.

Интеграцию данных: Совмещение данных GPS и IMU для получения конечных координат и ориентации объекта съемки.

Коррекцию ошибок: Применение алгоритмов для устранения систематических ошибок и дрейфа.

5. Оценка точности. Для оценки точности результатов Direct Georeferencing используют различные методы:

Сравнение с GCPs: Несмотря на отказ от использования наземных точек в основной работе, GCPs могут использоваться для валидации результатов.

Сравнение с эталонными данными: Сравнение результатов с данными, полученными другими методами (например, традиционными фотограмметрическими методами).

Анализ статистических данных: Оценка ошибок на основе статистических методов, таких как среднеквадратичное отклонение (RMSE).

6. Внешние факторы. Точность также может зависеть от:

Погодных условий: Облачность, осадки и атмосферные условия могут влиять на качество сигналов GPS.

Террейна: Наличие высоких зданий, деревьев и других объектов может вызвать отражения сигналов (мультипатчинг).

Преимущества Direct Georeferencing

Снижение затрат и времени: Отсутствие необходимости в установке и измерении GCPs.

Ускорение процесса: Быстрая обработка и получение результатов.

Ограничения:

Зависимость от качества оборудования: Высокая точность требует использования дорогостоящего оборудования.

Наличие опыта и знаний: Требуется квалифицированный персонал для настройки и обработки данных.

2.3 Предварительный расчет точности создания ЦМР по данным аэрофотосъемки с применением БПЛА. Представлена методика предварительного расчета точности полученной модели (Рисунок 2.6).

Предварительный расчет точности цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной по данным аэрофотосъемки с использованием БПЛА, включает оценку ожидаемой погрешности модели на основе характеристик оборудования, параметров съемки и условий проведения работ. Ключевыми факторами являются разрешение камеры, точность системы навигации, высота полета и параметры перекрытия снимков. Эти параметры влияют на детализированность и точность модели, измеряемую среднеквадратичной ошибкой (СКП) по горизонтали и вертикали.

Методика расчета, показанная на Рисунке 2.6, учитывает погрешности геометрических и радиометрических искажений, навигации БПЛА и позиционирования контрольных точек (GCP). Контрольные точки играют важную роль, так как позволяют уточнить геометрическую согласованность модели. Предварительная оценка точности помогает спрогнозировать возможные отклонения, оптимизировать параметры съемки и ресурсы, что особенно важно при съемке больших и сложных территорий.

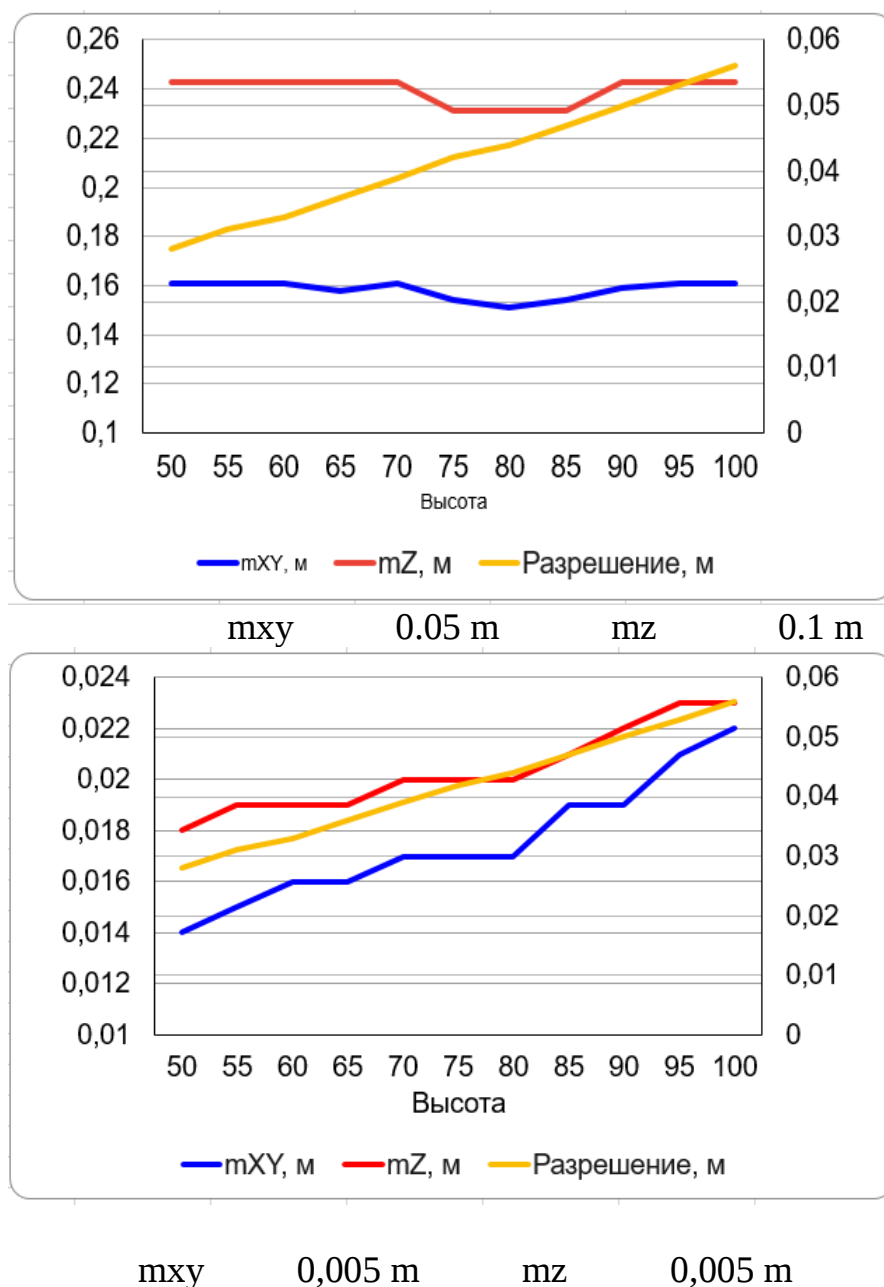


Рисунок 2.6 – Методика предварительного расчета точности полученной модели

Предварительный расчет точности. Исследование точности облаков точек полученных геодезическим и фотограмметрическими методами.

Оценка точности построения геопространственных моделей с использованием контрольных точек привязки (GCPs) представляет собой сложный процесс, который включает в себя несколько ключевых этапов:

Использование Контрольных Точек Привязки (GCPs): Эти точки, расположенные на земле, имеют известные координаты с высокой точностью. Они критически важны для повышения точности геопространственных моделей.

Разрешение Данных: Этот аспект относится к размеру пикселя изображения. Высокое разрешение (меньший размер пикселя) позволяет получать более детализированные изображения, что влияет на точность модели.

Процесс Моделирования: Это создание геопространственных моделей, таких как цифровые модели высот или 3D-модели местности.

Сбор данных: Начинается с сбора данных высокого разрешения через аэрофотосъемку или спутниковые изображения.

Расстановка GCPs: Важно равномерно распределить GCPs по территории исследования в собранных данных.

Построение Модели: Создание геопространственной модели с использованием собранных данных и GCPs.

Оценка Точности: Путем сравнения координат GCPs, использованных при моделировании, с их реальными координатами. Различия между этими координатами показывают точность модели.

Анализ Влияния Разрешения: Исследование того, как изменение разрешения данных влияет на точность модели. Часто высокое разрешение ведет к большей точности, но это также зависит от качества обработки данных и алгоритмов.

Этот подход к оценке точности моделей с использованием GCPs является фундаментальным в геопространственных исследованиях и может варьироваться в зависимости от специфики проекта и доступных данных.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) — это комплексное название различных спутников ГЛОНАСС, Beidou и Galileo. Существуют также региональные системы, такие как, например, ИРНСС. Основными сегментами ГНСС являются космический, управляющий и пользовательский сегменты. Фундаментальные и революционные результаты были получены благодаря исследованиям известных ученых.

Среди них стоит упомянуть Хофманн-Велленхоф, Б., Васле, Х.Л., Паркинсон, Б.В., Спилкер Дж.Дж.мл., Ван, Дж., Сатирапод, К., Ризос, К. За последнее десятилетие сегмент пользователей были усовершенствованы и теперь более доступен. Таким образом, в современную эпоху ГНСС представляет собой многогранный инструмент, охватывающий широкий спектр приложений, таких как горнодобывающая разведка, наземная, воздушная и морская навигация, съемка и картографирование, отдых, сельское хозяйство, военная промышленность и геодинамика. Каждое приложение требует разной степени точности; поэтому для определения решения позиции используются разные стратегии. Эти методы включают позиционирование по одной точке, относительное позиционирование и точное позиционирование точки.

(ППП). Позиционирование с использованием относительного и PPP может быть достигнуто в реальном времени или с постобработкой. Хотя ГНСС стала ценным инструментом для позиционирования, идеальными условиями для «точного» позиционирования является хороший обзор неба (то есть с минимальными препятствиями или без них), что бывает нечасто. Следовательно, крайне важно получить достаточные знания для определения

возможностей и ограничений различных методов позиционирования ГНСС для разных приложений и в разных обстоятельствах [1,2,3].

Среди различных приложений ГНСС играет важную роль в ведении горных работ, особенно в качестве основного источника данных для прогнозирования движений горных пород [4,5,6,7] и геомеханического моделирования [8]. В основном ГНСС-наблюдения в горнодобывающих регионах проводятся в неблагоприятных съемочных условиях. Эти условия могут привести к недопустимому снижению точности при маркшейдерских работах на карьерах.

Влияние повторно отраженного сигнала на точность GPS-позиционирования приемником оценивали по двум показателям: стандартное отклонение высоты и DOP.

DOP (уменьшение точности) - это термин, используемый в спутниковых навигационных системах для описания силы геометрического расположения спутников относительно друг друга в терминах приемника. Когда спутники в поле зрения слишком близки друг к другу, они говорят о «слабой» геометрии местоположения (высокое значение DOP), и наоборот, если расстояние достаточно далеко, геометрия считается «сильной» (низкая DOP значение) [5]. Чем ниже значение DOP, тем выше точность измерения координат. За последние десятилетия исследованию точности ГНСС в различных режимах посвящено множество публикаций.

Подобные исследования можно разделить на следующие группы, и это лишь некоторые из последних: исследования влияния геометрии спутников и местоположения приемника [9,10]; исследование влияния многолучевого распространения [11-13], тогда как современный обзор проблемы многолучевого распространения можно найти в [2] Брааш, М. С., Многолучевое распространение. в Справочнике Springer по глобальным навигационным спутниковым системам, редакторы П. Дж. Тойниссен и О. Монтенбрук. 2017, Чам: Springer International Publishing. п.443–468.]]; определение затухания листвы и его влияния на ухудшение сигнала; исследование многосозвездных решений для статики [14-17], исследование многочастотных решений [18]; и множество исследований, касающихся различных приемников [19]. Многочисленные исследования изучали проблему стратегии обработки. Основное внимание уделено вопросу правильного выбора весовых коэффициентов для обработки базовой линии [20]. Сатирапод К. в своих работах: [Докторская диссертация «Улучшение алгоритма обработки данных GPS для точного статического взаимного позиционирования», Университет Нового Южного Уэльса, 2002 г.; Сатирапод, К.; Ван, Дж. Сравнение показателей качества GPS-наблюдений фазы несущей. Geomatics Research Australia 2000, 73: 75-92.; Сатирапод, К.; Ван, Дж.; Ризос, К. Новая процедура стохастического моделирования для точного статического GPS-позиционирования. Zeitschrift für Vermessungswesen 2001, 126(6): 365-373] изложил несколько моделей стохастического моделирования для точных

наблюдений фазы несущей ГНСС. Этот список публикаций ни в коем случае не является исчерпывающим.

Однако существенные вопросы относительно точности ГНСС в различных режимах и условиях остаются без ответа. На сегодняшний день ни одно исследование не рассматривало данную проблему как комплексный вопрос. Это исследование предоставляет соответствующую информацию о комплексном исследовании точности ГНСС для статических испытаний, которые проводились в условиях навеса, многолучевого распространения и открытой среде, для оценки производительности пользовательского сегмента от разных производителей для разных созвездий и разных стратегий обработки.

Результаты качества позиционирования, полученные с помощью LGO, показывают, что GS10 и R8 имели одинаковое качество по горизонтали, высоте и 3D в условиях многолучевого распространения, что во всех случаях было лучше, чем у Javad (таблица 2.6).

Однако все они были меньше миллиметра, поэтому в основном одинакового качества. В условиях открытого неба GS10 показал лучшее качество 2D, высоты и 3D, за ним следовали Trimble и Javad соответственно. Но опять же, все они были меньше миллиметра, следовательно, различия незначительны. Trimble R8 показал лучшее качество 2D, высоты и 3D в области купола, за ним следовали Leica и Javad соответственно.

Благодаря двухчастотной обработке и R8, и Triumph-1 получили решения с фазовой фиксацией в условиях купола; следовательно, целочисленная неоднозначность для обоих приемников была разрешена с достаточной уверенностью. Однако решение из GS10 было плавающим, поэтому целочисленное значение неоднозначности определить не удалось.

Таким образом, при двухчастотной обработке R8 и Триумф-1 работали лучше, чем Leica на площадке купола с точки зрения разрешения неоднозначности. Для достижения решения три приемника использовали спутники из созвездий GPS и ГЛОНАСС в среде навеса.

Что касается решений для многолучевого распространения, GS10 был единственным приемником, который использовал созвездия ГЛОНАСС и GPS. Однако все получатели получили исправления в этой среде. Что касается открытой площадки, то во всех приемниках также реализованы решения с фиксированной фазой. Для получения решений GS10 и Triumph-1 использовали спутники GPS и ГЛОНАСС, тогда как R8 использовал только спутники из группировки GPS [4].

Таблица 2.6 – Результаты двухчастотной обработки LGO для статического позиционирования

Точка	Спутники	Решение	Частоты	Горизонтальная точность, м	Вертикальная точность, м
O-2-L-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1+L2	0.000	0.000
O-2-T-S	GPS	Фаза: все фиксировано	L1+L2	0.000	0.000
O-2-J-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1+L2	0.000	0.001
V-2-L-S	GPS/GLONASS	Плавающая	L1+L2	0.005	0.005
V-2-T-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1+L2	0.001	0.001
V-2-J-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1+L2	0.012	0.031
M-2-L-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1+L2	0.000	0.000
M-2-T-S	GPS	Фаза: все фиксировано	L1+L2	0.000	0.000
M-2-J-S	GPS	Фаза: все фиксировано	L1+L2	0.000	0.000

Результаты качества позиционирования, полученные от LGO, показывают, что у Javad были лучшие показатели по горизонтали, высоте и 3D на участке растительности, за ним следовали GS10 и Trimble соответственно, которые в целом были одинаковыми. Для открытых и многолучевых площадок показатели 2D, высоты и 3D были менее миллиметра для всех приемников (табл. 2.7).

Созвездие, использованное для получения результатов для одночастотной обработки, было аналогично результатам двухчастотной обработки. Leica была единственным приемником, который использовал оба созвездия в условиях многолучевого распространения; Trimble использовал только спутники GPS на открытой местности, и все приемники использовали оба созвездия для участка растительности. Что касается типа решения для навеса, Trimble был единственным приемником, который достиг решения с фиксированной фазой. Следовательно, можно сделать вывод, что Trimble показал лучшие результаты, чем другие приемники на участке под навесом, с точки зрения типа решения. Что касается многолучевого распространения и открытых площадок, все получатели разрешили неоднозначность, получив решения с фиксированной фазой.

Таблица 2.7 – Результаты одночастотной обработки LGO для статического позиционирования

Точка	Спутники	Решение	Частоты	Горизонтальная точность, м	Вертикальная точность, м
O-2-L-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1	0.0001	0.0001
O-2-T-S	GPS	Фаза: все фиксировано	L1	0.0002	0.0003
O-2-J-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1	0.0002	0.0003
V-2-L-S	GPS/GLONASS	Плавающая	L1	0.0010	0.0019
V-2-T-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1	0.0013	0.0017
V-2-J-S	GPS/GLONASS	Плавающая	L1	0.0005	0.0009
M-2-L-S	GPS/GLONASS	Фаза: все фиксировано	L1	0.0001	0.0002
M-2-T-S	GPS	Фаза: все фиксировано	L1	0.0001	0.0002
M-2-J-S	GPS	Фаза: все фиксировано	L1	0.0002	0.0004

Методы расчета цифровых моделей. Как известно из определения ЦМР, это способ представления трехмерной поверхности математическим путем, поэтому создание цифровых моделей базируется на математическом аппарате. От способа их создания будет зависеть детальность, точность построения и эффективность затрат на построения.

С учетом выше указанных параметров и благоприятной GPS обстановки во время проведения аэросъемки производителем гарантируется точность определения плановых координат не хуже 0,15 м на предельной высоте, а высоты не хуже 0,10 м на предельной высоте.

Согласно Инструкциям [22], местность по ее рельефу подразделяется на следующие категории: равнинную с уклонами до 20°, всхолмленную с уклонами до 40°, пересеченную с уклонами до 60°, а также горную и предгорную местность с уклонами более 60°. Данная классификация используется в данном исследовании для выделения характерных форм рельефа, что критически важно при формировании цифровых моделей рельефа. Это обусловлено необходимостью создания точных цифровых моделей рельефа, соответствующих нормативным требованиям.

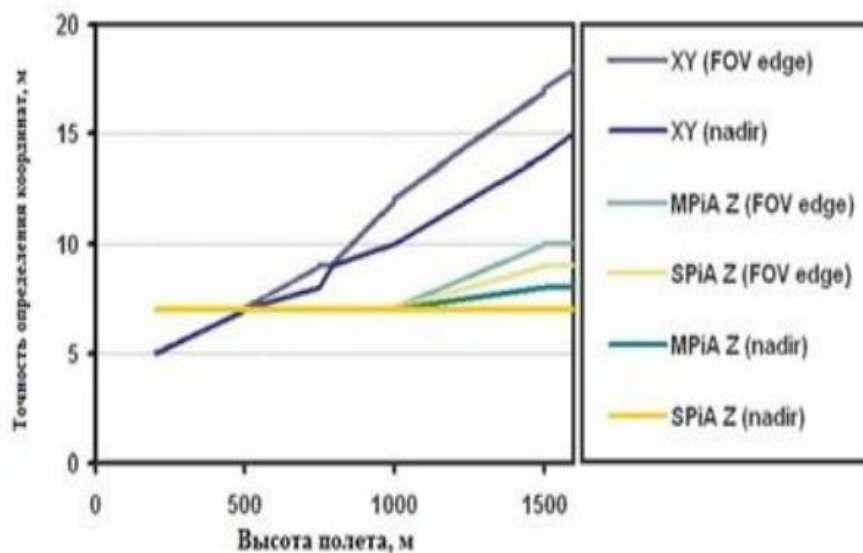


Рисунок 2.7 -Зависимость точности определения координат от высоты полета БПЛА

Исходные данные для создания цифровых моделей рельефа представляют собой объемный массив информации, полученной в результате аэролазерного сканирования, включающий в себя точки отражения лазерного излучения. Учитывая огромный объем данных, как указано в разделе 2.1, невозможно использовать все точки отражения для создания цифровых моделей рельефа. Поэтому производится классификация точек лазерного отражения, где основное внимание уделяется классу "земля". Однако, даже этот класс содержит значительное количество точек отражения, что порождает вопрос о необходимости сокращения плотности точек лазерного отражения.

Методика выделения рельефа на основе крутизны земной поверхности вдоль трассы проекта помогает сократить количество исходных данных. Необходимо определить минимальное количество точек лазерного отражения на 1 квадратный метр для различных форм рельефа.

В результате обработки фотографического материала становится возможным создание трехмерных моделей объектов в форматах цифровых моделей рельефа и ортофотопланов, трехмерных моделей с текстурами из оригинальных фотографий, облаков точек и ортофотопланов с разрешением, определенным пользователем.

Выводы по 2 главе

В результате исследования методов сбора данных, включая геодезический и фотограмметрический методы, выявлены ключевые аспекты их применения в проектировании и реконструкции автомобильных дорог.

Геодезический метод характеризуется высокой точностью измерений, достигающей нескольких сантиметров, что делает его незаменимым при

необходимости детализированных данных. Однако данный метод требует использования высокоточного оборудования, такого как тахеометры и GPS-приемники, и включает трудоемкие полевые работы по установке и измерению большого числа опорных и контрольных точек. Это приводит к значительным затратам времени и ресурсов, особенно на больших территориях или в труднодоступных районах.

Фотограмметрический метод, напротив, позволяет быстро собирать данные с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с высококачественными камерами. Точность данного метода варьируется, но при использовании качественных снимков и методов обработки может достигать нескольких сантиметров. Этот метод является более экономически эффективным и скоростным, особенно на больших и труднодоступных территориях.

Для проектирования и реконструкции автомобильных дорог необходимо соблюдать нормативные требования к цифровым моделям рельефа (ЦМР), включая высокую точность плановых координат (до 0,1 метра) и высотных координат (до 0,14 метра). ЦМР должны обеспечивать полное и детальное покрытие проектируемой территории и быть совместимыми с используемыми программными пакетами для проектирования и моделирования.

Предварительный расчет точности создания ЦМР по данным, полученным с БПЛА, показывает, что при использовании высококачественных аэрофотоснимков и специализированного программного обеспечения для фотограмметрической обработки, можно достичь требуемой точности. Включение наземных контрольных точек для повышения точности является критическим, поскольку они обеспечивают коррекцию геопозиционирования снимков, значительно улучшая общую точность ЦМР.

Прямое геопозиционирование с использованием GPS-приемников на борту БПЛА влияет на исходную точность плановых и высотных координат снимков. Для достижения высокой точности рекомендуется использовать дифференциальные GPS (DGPS) или системы кинематики в реальном времени (RTK). Комбинированное применение методов прямого GPS-позиционирования и наземных контрольных точек обеспечивает наивысшую точность цифровой модели рельефа.

Эти выводы подчеркивают важность выбора адекватных методов сбора данных и применения комбинации технологий для обеспечения высокой точности и эффективности при создании цифровых моделей рельефа для проектирования и реконструкции автомобильных дорог.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СОЗДАНИЯ ЦМР

3.1. Практика внедрения технологии БПЛА для проектирования и реконструкции

Целью настоящего исследования является улучшение точности цифровых моделей линейных объектов, получаемых на основе снимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), путем уточнения процессов использования ориентиров, локальных снимков и земных контрольных точек (GCPs). Методология данного исследования представляет собой комбинацию прямого и косвенного геопозиционирования. Предлагаемый подход позволяет осуществлять привязку снимков в ограниченных областях линейных объектов без необходимости размещения контрольных точек вдоль всей траектории полета через заранее определенное количество базовых пунктов фотографирования. Предлагаемый метод пригоден для использования на местностях с ограниченным доступом и в местах, где сигнал от спутников недоступен. Основной целью этого исследования является повышение точности фотограмметрических продуктов (например, цифровых моделей рельефа, ортофотопланов, трехмерных моделей и т. д.) путем оптимизации процесса геопозиционирования с использованием небольшого количества контрольных точек в небольшой части линейных проектов, осуществляемых с помощью БПЛА.

В качестве объекта исследования были выбраны несколько участков, на которых проводились измерения (рисунок 3.1).

1. Район исследования – Автомобильная дорога Шымбулак.

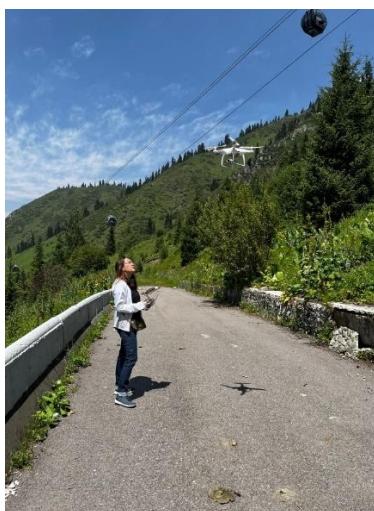


Рисунок 3.1 – Выполнение съемки на территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

Для тестового участка номер 1 был выбран участок дороги на территории Горнолыжного комплекса “Шымбулак”, для выполнения полевых

измерительных работ было получено письменное разрешение от администрации комплекса. Дорога протяженностью меньше 7 километров имеет большие перепады высоты и крутые спуски (рисунок 3.2).

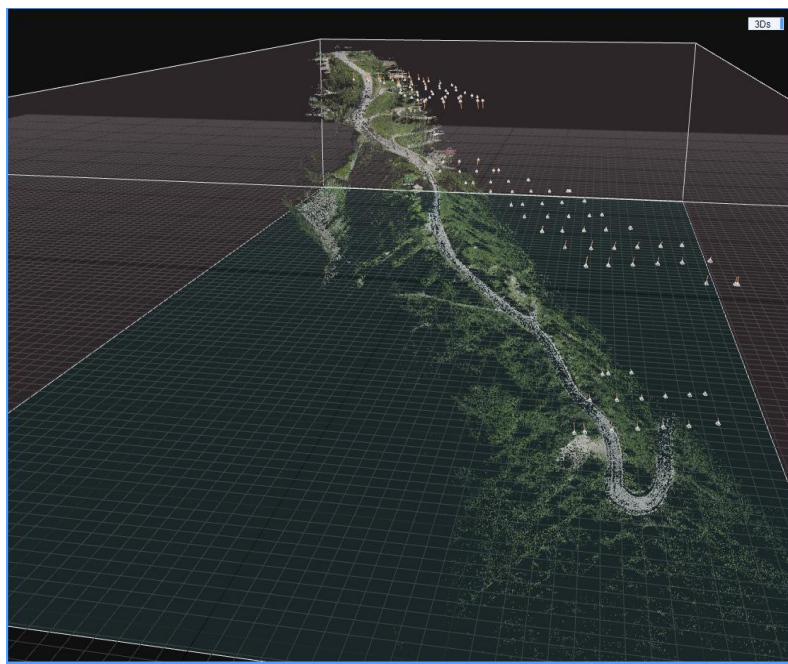


Рисунок 3.2 – Выполнение съемки на территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

В предварительном планировании ключевыми являются анализ местности, определение цели съемки и планирование маршрута полета. Анализ местности включает изучение топографических карт и спутниковых снимков для выявления особенностей рельефа, таких как высокие горы, узкие ущелья и глубокие долины. Определение цели съемки направлено на установление конкретных фотограмметрических продуктов, необходимых для проекта, таких как цифровые модели рельефа, ортофотопланы или облака точек. Планирование маршрута полета заключается в разработке оптимального пути, учитывающего обход препятствий, минимизацию времени полета и обеспечение достаточного перекрытия между снимками для точной обработки.

Настройка оборудования включает выбор подходящего БПЛА и калибровку камеры. Выбор БПЛА основывается на его технических характеристиках, таких как дальность и время полета, а также качество камеры. Калибровка камеры перед съемкой необходима для обеспечения высокого качества снимков и точности геопозиционирования.

Проведение съемки требует планирования точек старта и финиша, управления полетом и выполнения съемки. Точки старта и финиша выбираются с учетом безопасности и доступности. Полет БПЛА контролируется в реальном времени с помощью специального программного обеспечения, которое обеспечивает выполнение заданного маршрута и соблюдение высотного

режима. Съемка выполняется в соответствии с разработанным маршрутом, обеспечивая необходимое перекрытие между снимками (рисунок 3.3).

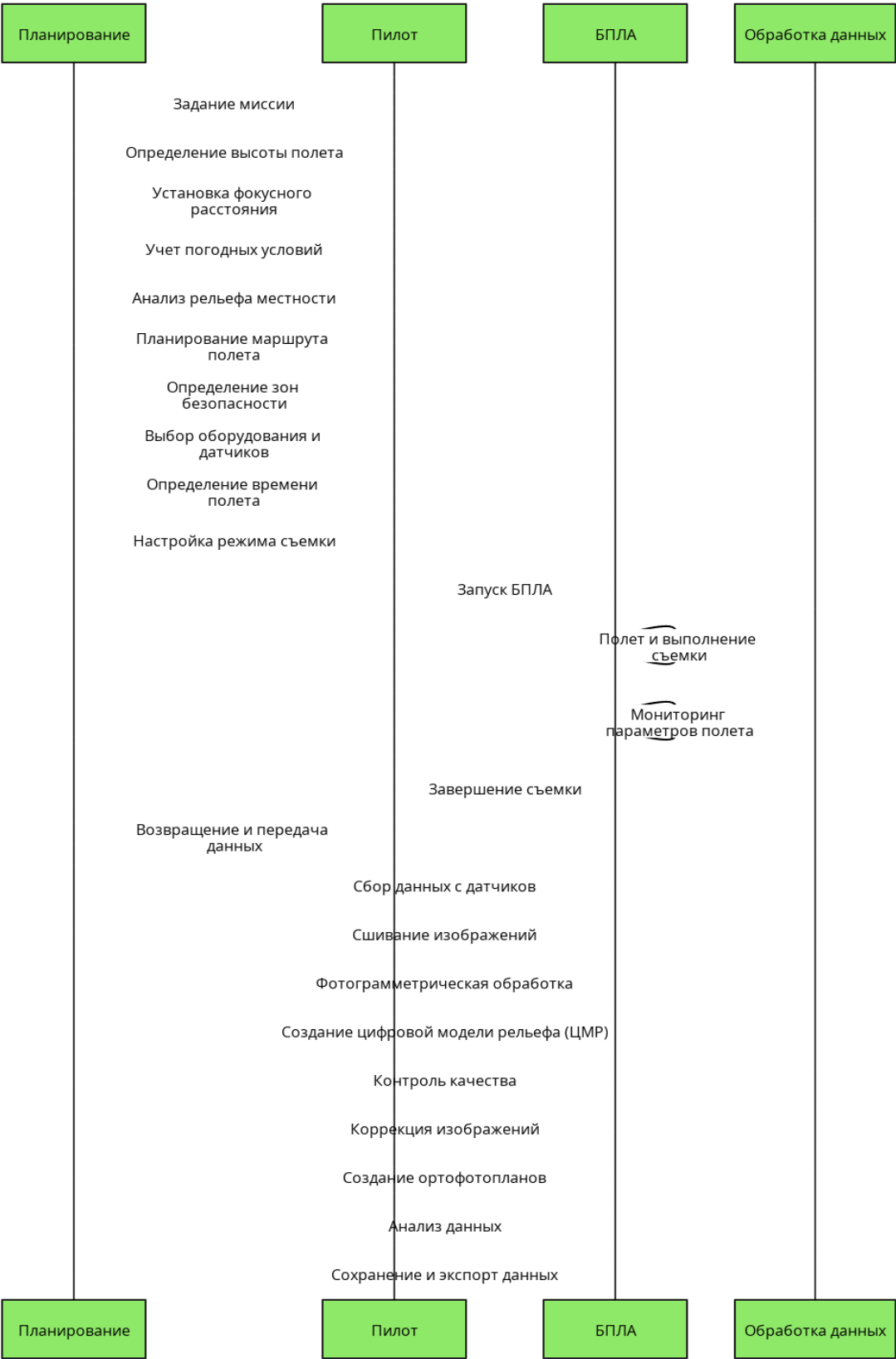


Рисунок 3.3 – Схема планирования и выполнения съемки с использованием БПЛА в сложной рельефной местности

Постобработка данных включает обработку снимков, их геопривязку и создание фотограмметрических продуктов. Обработка снимков проводится с использованием специализированного программного обеспечения для создания мозаики и устранения искажений. Геопривязка снимков осуществляется с использованием наземных контрольных точек или систем GPS, что обеспечивает высокую точность геопозиционирования. На основе обработанных данных создаются фотограмметрические продукты, такие как цифровые модели рельефа, ортофотопланы и облака точек.

Оценка качества и коррекция включают проверку точности и при необходимости коррекцию данных. Проверка точности полученных продуктов осуществляется с помощью наземных измерений или других методов верификации. Коррекция данных проводится для улучшения качества и точности финальных продуктов.

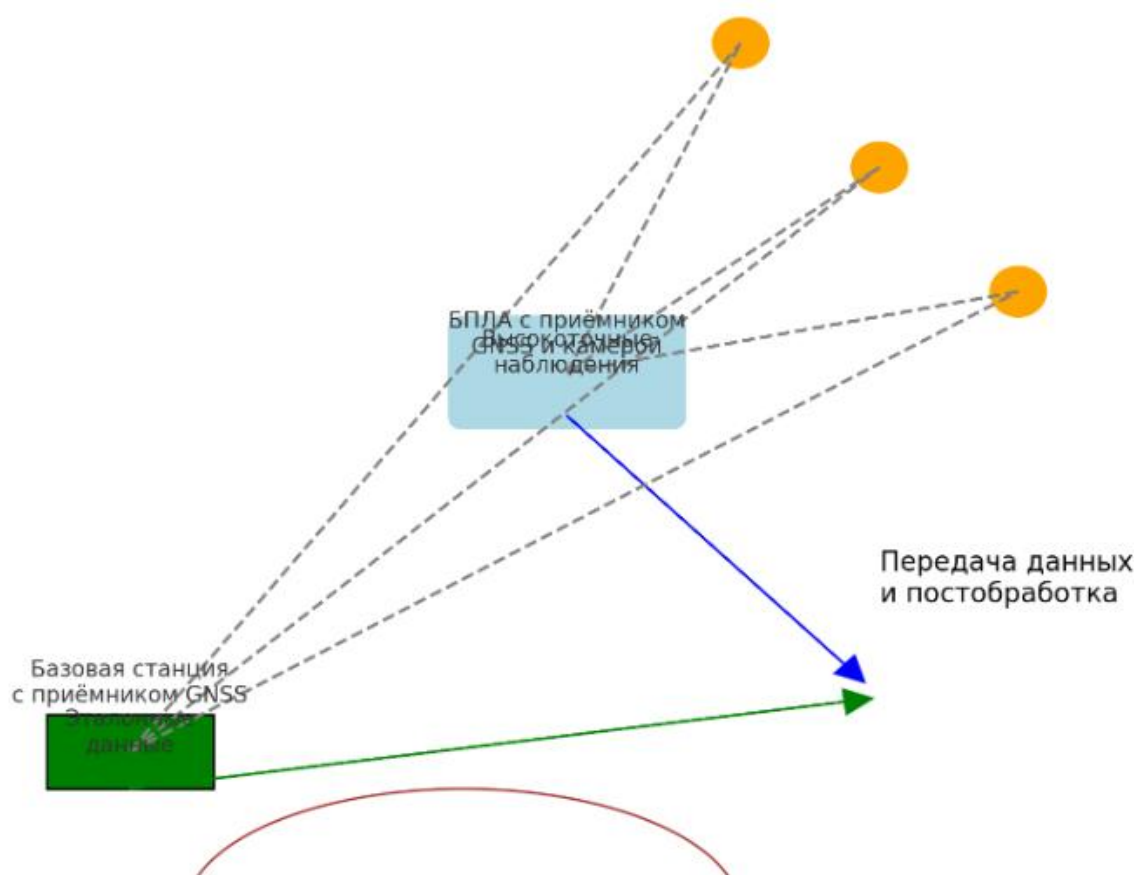


Рисунок 3.4 – Диаграмма использования ГНСС для выполнения геопривязки

На диаграмме показаны основные компоненты и взаимодействия при съемке БПЛА с использованием метода РРК (кинематика с постобработкой):

БПЛА с приемником ГНСС: синий прямоугольник представляет БПЛА, оснащенный высокоточным приемником ГНСС, собирающий спутниковые данные во время полета (рисунок 3.4).

Базовая станция: Зеленый прямоугольник символизирует базовую станцию, расположенную в известном месте и также собирающую спутниковые данные.

Спутник: оранжевый круг обозначает спутник, являющийся частью системы ГНСС, передающий сигналы как БПЛА, так и базовой станции.

Передача данных: пунктирные серые линии показывают передачу данных со спутника как на БПЛА, так и на базовую станцию.

Метки: они предоставляют дополнительную информацию о каждом компоненте и типе собираемых данных.

Эта схема дает концептуальное представление о том, как технология РРК используется при съемке с помощью БПЛА, когда и БПЛА, и базовая станция собирают данные со спутников. Постобработка включает в себя коррекцию данных БПЛА с использованием данных базовой станции, что приводит к получению высокоточной геопространственной информации.

Создание более подробной и конкретной схемы метода РРК (кинематика с постобработкой) при съемке с помощью БПЛА с упором на точность во время наблюдений включает в себя несколько ключевых элементов (рисунок 3.5).

Зависимость точности съемки от площади территории для данных, полученных с БПЛА

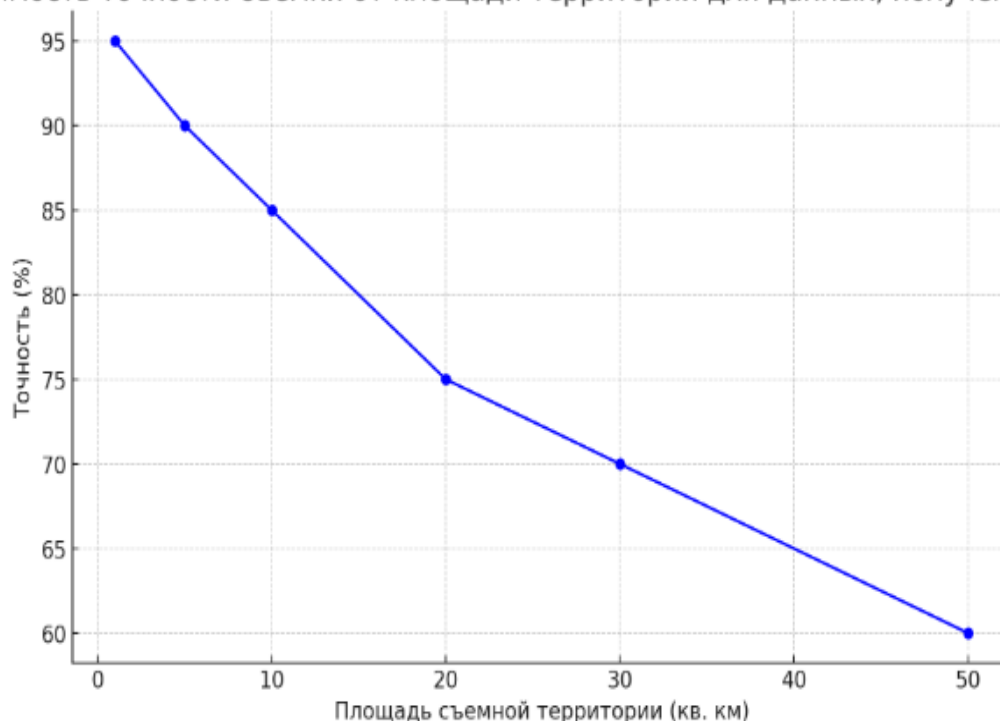


Рисунок 3.5 – График точности измерений и площади территории

Данный график иллюстрирует взаимосвязь между точностью измерений, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА), и площадью снимаемой территории. Гипотетические данные представлены на графике, где по горизонтальной оси отображена площадь территории в квадратных километрах, а по вертикальной оси — точность измерений в

процентах. Видно, что с увеличением площади снимаемой территории точность измерений уменьшается. Это может быть объяснено несколькими факторами, включая увеличение времени, необходимого для съемки, и разнообразие рельефа на более крупных участках, что усложняет обработку данных. Таким образом, график демонстрирует важность учета размера территории при планировании и проведении миссий с использованием БПЛА, а также подчеркивает необходимость эффективных методов обработки данных для обеспечения высокой точности измерений (рисунок 3.6).

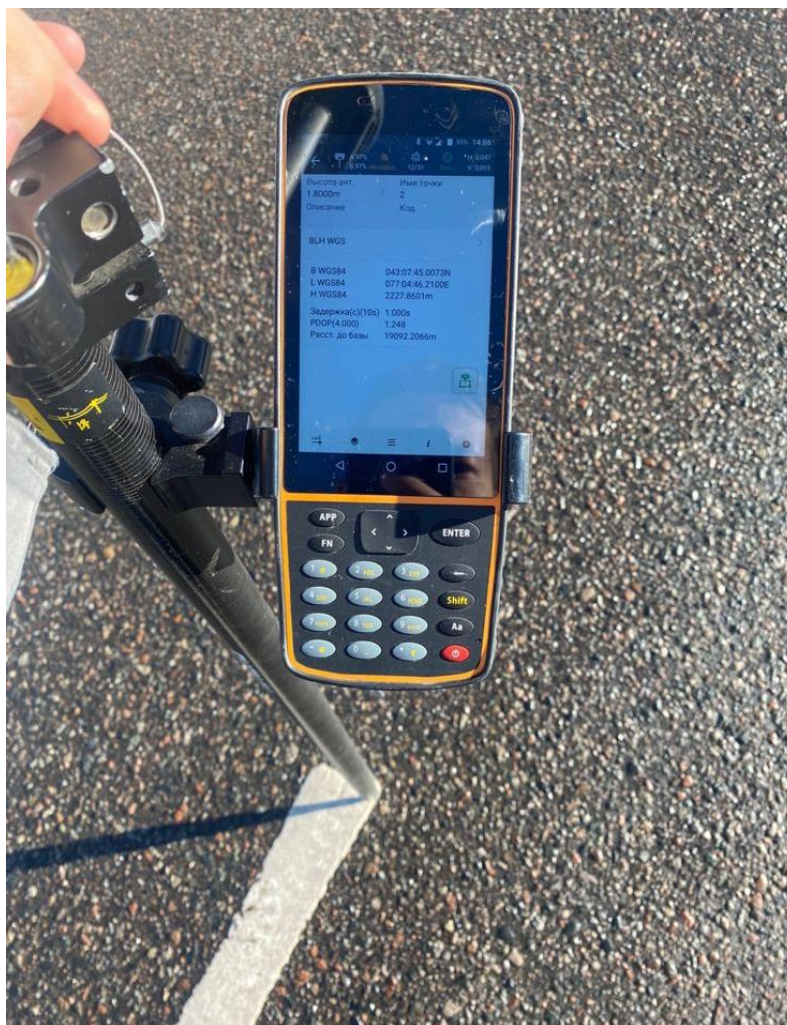


Рисунок 3.6 – Координирование GCP точек на территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

Процесс координирования и геопривязки снимков с использованием наземных контрольных точек или систем GPS играет ключевую роль в обеспечении высокой точности геопозиционирования и создания цифровой модели рельефа. Ниже представлены основные этапы этого процесса:

Размещение наземных контрольных точек: Выбор местоположения - Определение стратегических местоположений для размещения наземных

контрольных точек на местности, учитывая равномерное распределение, видимость с воздуха и доступность для измерений (рисунок 3.7).

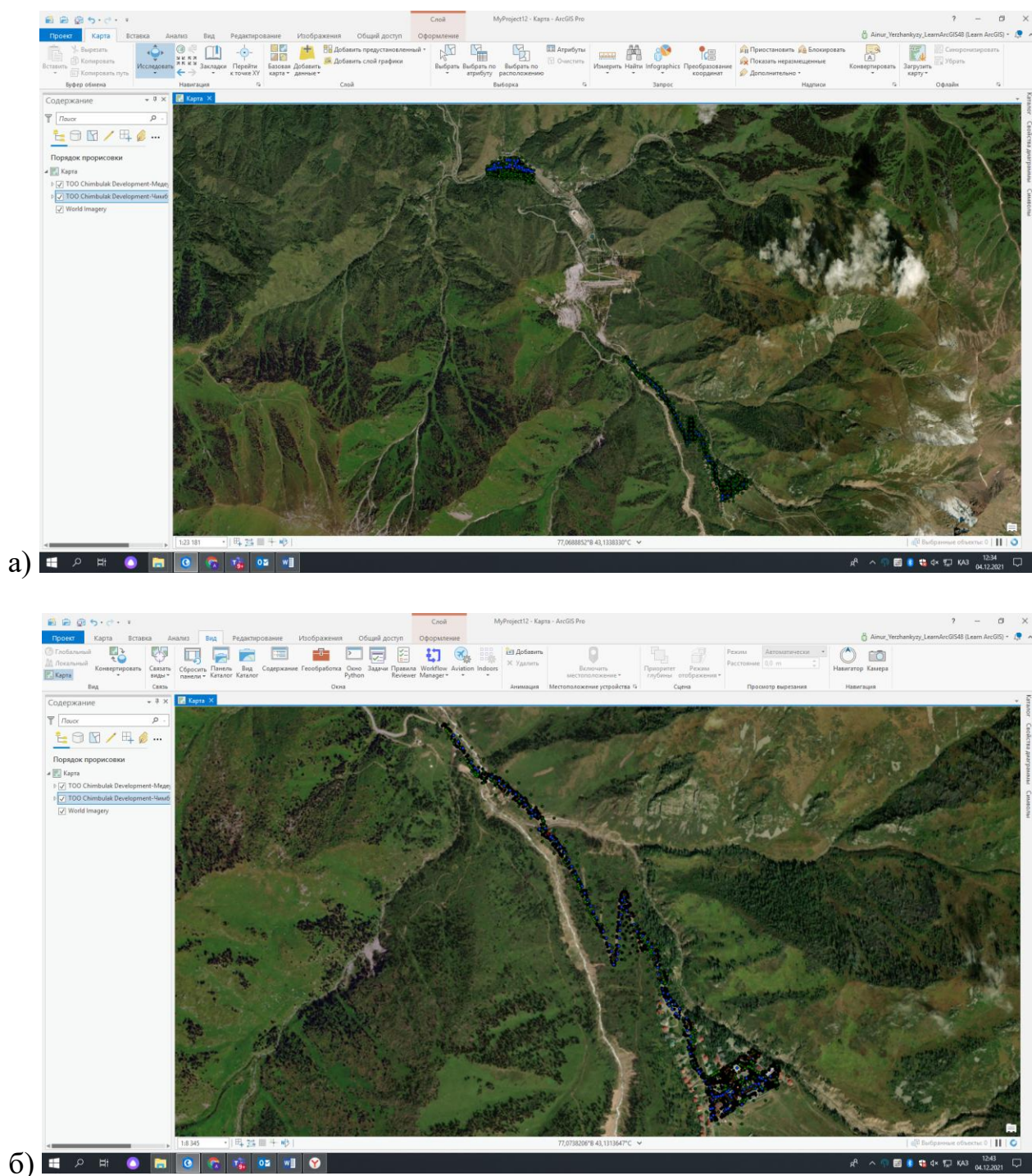


Рисунок 3.7 а,б – Результат тахеометрической съемки на территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

Использование программного обеспечения Reality Capture для анализа и обработки данных, полученных в результате фотограмметрической съемки территории Горнолыжного комплекса "Шымбулак", представляет собой интегрированный процесс, основанный на принципах компьютерного зрения и

обработки изображений. Программа позволяет не только проводить анализ данных, но и создавать высокоточные геоинформационные продукты, необходимые для планирования и управления инфраструктурными проектами на данной территории (рисунок 3.8).

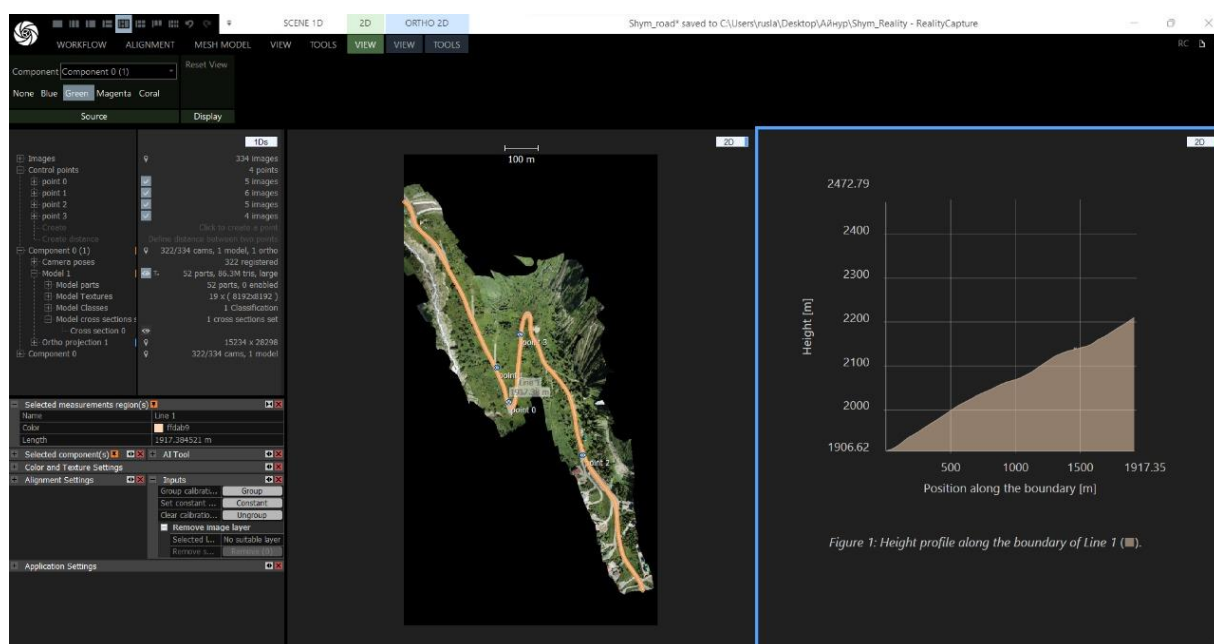


Рисунок 3.8 – Выполнение камеральной обработки, создание ортофотоплана и построение профиля трассы территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

Reality Capture обладает мощными возможностями предварительной обработки, включая автоматическое выравнивание и коррекцию изображений, что позволяет улучшить качество и точность фотограмметрических данных. Кроме того, программа позволяет проводить камеральную обработку данных, включая калибровку камеры и коррекцию искажений, а также создавать ортофотопланы с высокой геометрической привязкой к местности.

С помощью Reality Capture можно также построить профиль трассы территории "Шымбулак", основываясь на извлеченных высотных данных из цифровой модели рельефа. Этот процесс позволяет получить детальное представление о рельефе и характеристиках местности, что является важным для планирования инженерных и строительных работ.

Оценка результатов, полученных с помощью Reality Capture, включает в себя проверку точности созданных геоинформационных продуктов с использованием наземных измерений или других независимых источников данных. Это позволяет убедиться в надежности и достоверности полученной информации перед ее использованием в практических проектах.

Таким образом, применение программного обеспечения Reality Capture представляет собой эффективный инструмент для обработки и анализа данных фотограмметрической съемки территории Горнолыжного комплекса

«Шымбулак», обеспечивая точные и надежные геоинформационные продукты для инженерных и планировочных проектов.

Окончательные геоинформационные продукты, такие как ортофотоплан и профиль трассы, могут быть экспортированы из программы Reality Capture для дальнейшего использования в инженерных и планировочных проектах на территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак» (рисунок 3.9).

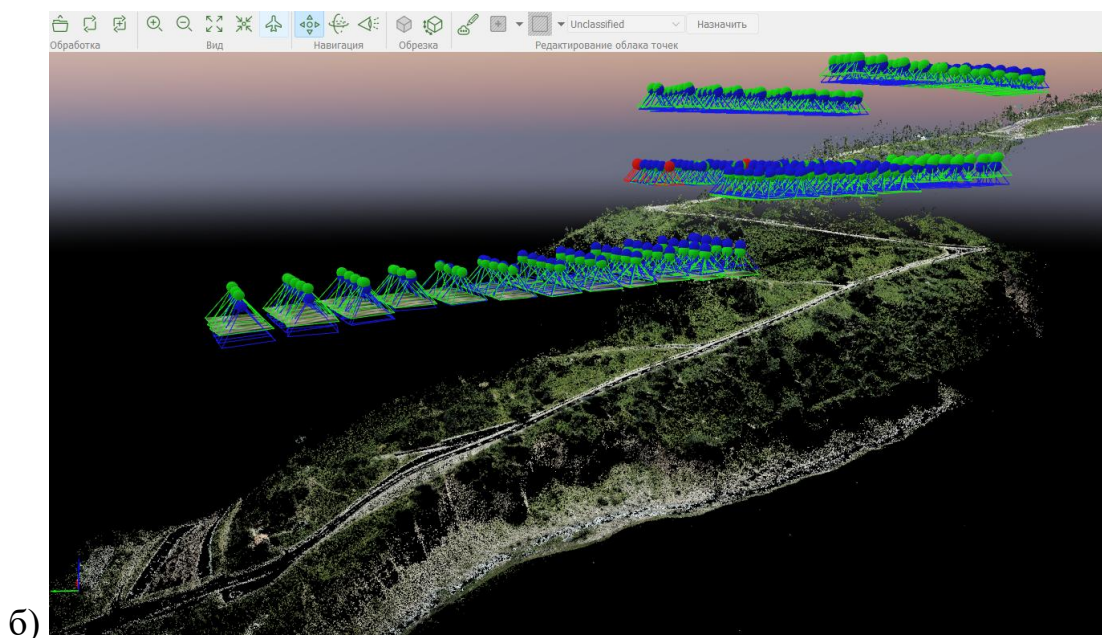


Рисунок 3.9 а,б – Выполнение камеральной обработки, облако точек трассы территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

Для начала необходимо импортировать собранные данные, включающие в себя фотографии, полученные во время фотограмметрической съемки территории Горнолыжного комплекса "Шымбулак", в программу Reality Capture.

Программа Reality Capture автоматически выполнит предварительную обработку данных, включая выравнивание изображений, удаление шумов и артефактов, а также определение ключевых точек на изображениях.

После предварительной обработки следует выполнить камеральную обработку данных, включающую калибровку камеры и коррекцию изображений для учета и удаления искажений, возникающих в процессе съемки.

На основе фотографий создается облако точек, представляющее собой трехмерное пространственное представление объектов на земной поверхности. По данным облака точек генерируется Цифровая Модель Рельефа, отражающая изменения высоты земной поверхности и рельефа.

Проводятся уточнения и коррекции ЦМР при необходимости для повышения точности и соответствия реальным географическим данным. Полученная Цифровая Модель Рельефа может быть визуализирована и проанализирована для выявления особенностей рельефа, определения характеристик местности и планирования инженерных работ (рисунок 3.10-3.11).

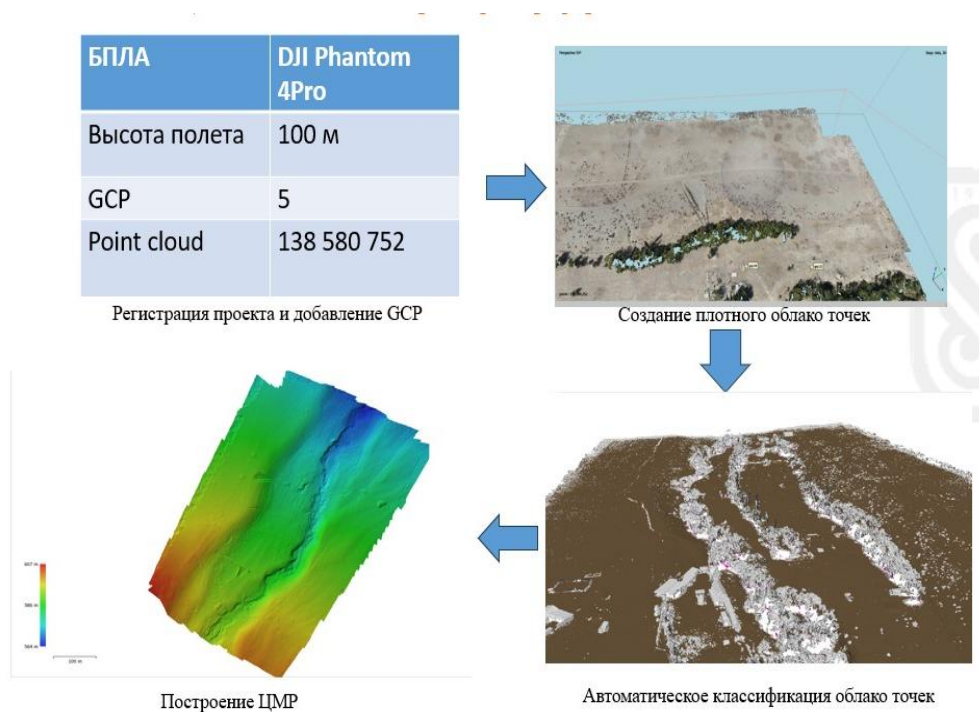


Рисунок 3.10 – Выполнение камеральной обработки, облако точек трассы территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

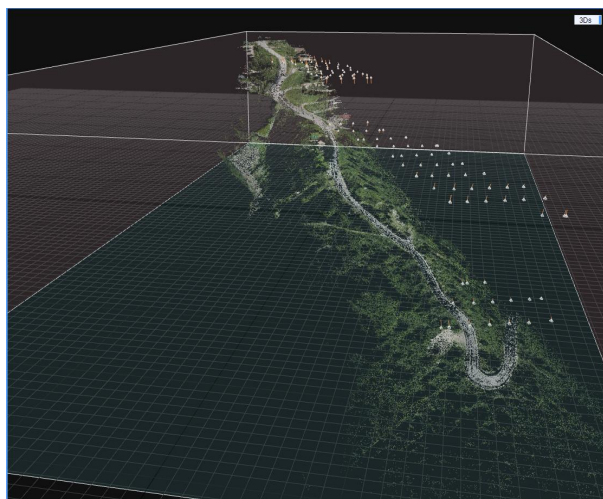


Рисунок 3.11 – Выполнение камеральной обработки в ПО Reality Capture трассы территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

3.2 Создание ЦМР по данным НЛС и БПЛА для задач реконструкции

Цифровые модели рельефа, созданные по данным БПЛА, демонстрируют высокую точность, что является критически важным для задач реконструкции.

Использование данных БПЛА для создания ЦМР обеспечивает высокую точность и детализацию моделей, что делает их важным инструментом в реконструкции и проектировании автомобильных дорог. Эти модели позволяют значительно улучшить процесс проектирования, обеспечивая точные данные о рельефе и водосборных характеристиках территорий. Исследование, проведенное Эмре Актурком и А. Алтунелем (2019), показало, что ЦМР, созданные с использованием низкобюджетных БПЛА, могут быть достаточно точными для инженерных задач, особенно при использовании наземных контрольных точек (GCPs). Точность данных ЦМР достигала ошибки 0.57 м, что было дополнительно улучшено на 6 см при использовании GCPs [100] (рисунки 3.12-3.18).

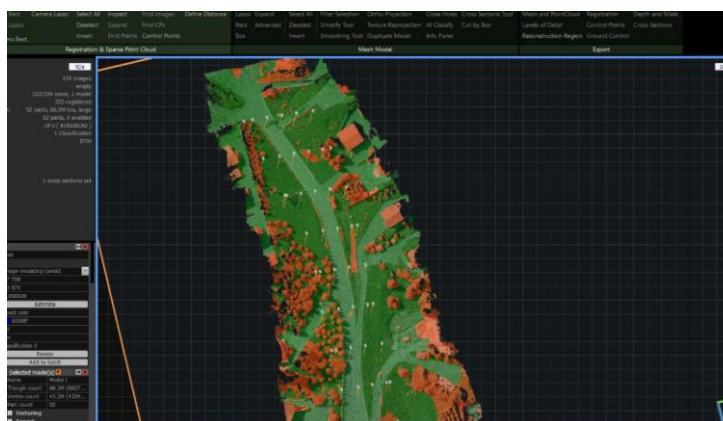


Рисунок 3.12 – Выполнение камеральной обработки в ПО Reality Capture трассы территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

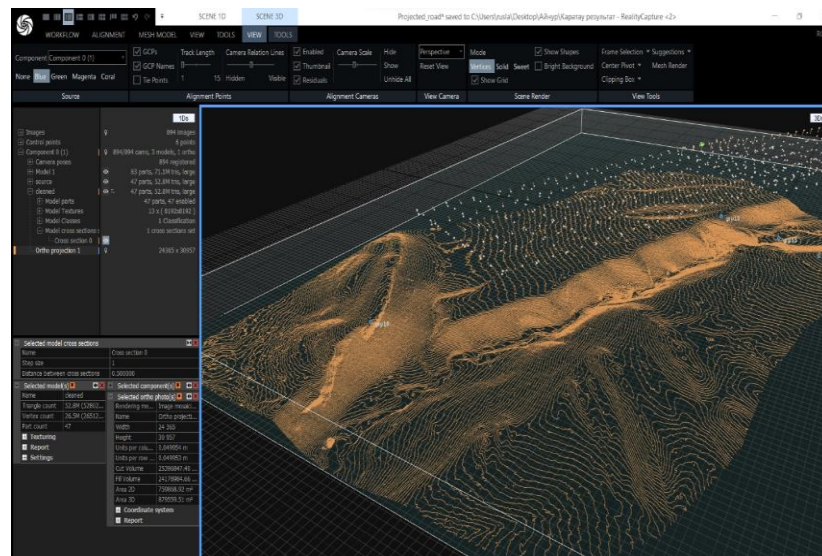


Рисунок 3.13 – Выполнение камеральной обработки в ПО Reality Capture тестового участка 2



Рисунок 3.14 – Выполнение камеральной обработки в ПО Metashape тестового участка 3



Рисунок 3.15 – Выполнение камеральной обработки в ПО Metashape тестового участка 4

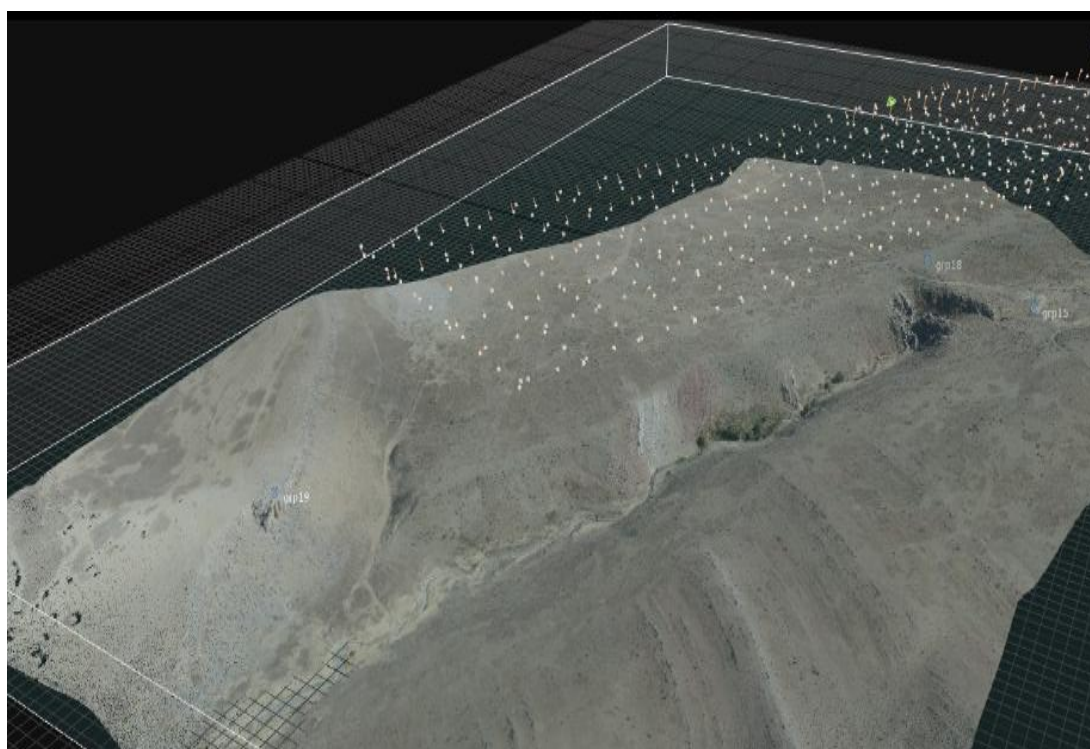


Рисунок 3.16 – Выполнение камеральной обработки в ПО Reality Capture тестового участка 2 для проектирования дороги

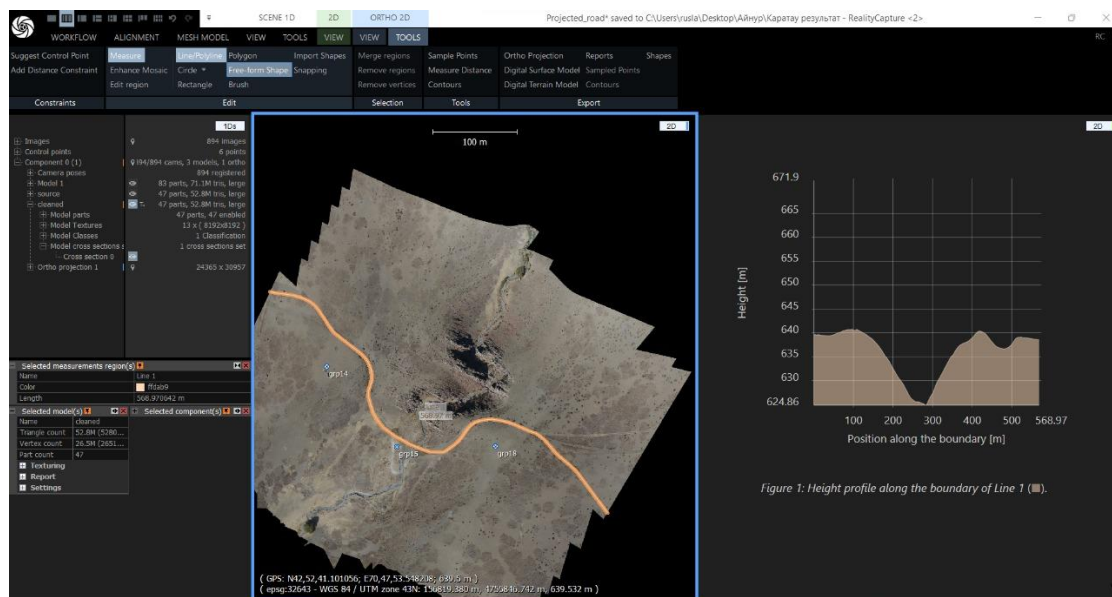


Рисунок 3.17 – Выполнение камеральной обработки в ПО Reality Capture тестового участка 2 для проектирования дороги

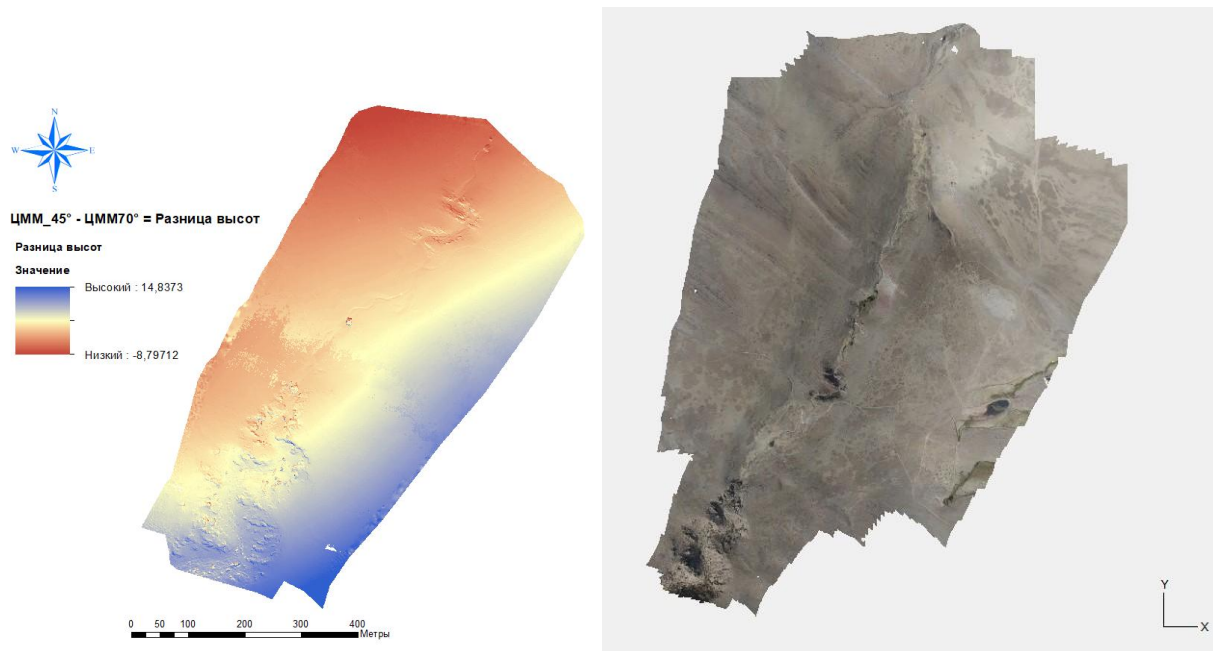


Рисунок 3.18 – Модель перепада высот

3.3 Оценка достоверности и экономическая эффективность разработанной методики

На этом этапе оценивалось сравнение результатов Agisoft и Pix4D. Как оба пакета программного обеспечения считаются программным обеспечением Computer Vision, они следуют аналогичным рабочий процесс, но с использованием разных алгоритмов. Поэтому для дальнейшей работы важно сравнить возможности различных систем и оценить, какая из них более

подходит для целей обследования. Важные для анализа параметры представлены ниже.

Для оценки достоверности разработанной методики были проведены следующие этапы анализа и валидации:

- Проведена сравнительная оценка с существующими методиками, признанными в отрасли.

- Выполнены тесты на различных территориях с разнообразными топографическими условиями.

Статистическая валидация:

- Использованы статистические методы для проверки точности полученных данных.

- Проведены контрольные измерения на местности для верификации результатов аэрофотосъемки.

- Данные, полученные с помощью новой методики, сравнивались с данными, полученными традиционными методами, включая наземную съемку и спутниковые снимки.

- Результаты всех этих этапов показали высокую степень точности и повторяемости данных, что подтверждает достоверность разработанной методики.

Экономическая эффективность. Для оценки экономической эффективности методики были проанализированы следующие аспекты:

1. Снижение затрат на полевые работы:

- Новая методика позволяет значительно сократить объем полевых работ, что снижает затраты на оплату труда и логистику.

- Сокращение времени на сбор данных благодаря более эффективным процессам аэрофотосъемки.

2. Оптимизация использования ресурсов:

- Снижение потребности в дорогостоящем оборудовании для наземных работ.

- Увеличение продолжительности съемочного сезона за счет возможности работы в более сложных погодных условиях и на больших высотах.

3. Повышение производительности:

- Увеличение объема данных, обрабатываемых за единицу времени.

- Улучшение качества данных позволяет уменьшить количество повторных съемок и исправлений.

4. Анализ затрат и выгод:

- Проведен детальный анализ затрат на внедрение и эксплуатацию новой методики в сравнении с традиционными методами.

- Оценка долгосрочных выгод, включая улучшение качества данных, повышение точности картографирования и снижение риска ошибок.

На основании проведенных анализов и сравнительных исследований можно сделать следующие выводы:

– Достоверность: Разработанная методика демонстрирует высокую точность и надежность, что подтверждено многократными тестированиями и статистическими валидациями.

– Экономическая эффективность: Внедрение методики позволяет существенно сократить затраты на полевые работы и оборудование, повысить производительность и качество данных, что в итоге приводит к значительным экономическим выгодам.

Таким образом, новая методика представляет собой эффективное и надежное решение для проведения аэрофотосъемки и топографических исследований, обеспечивая высокое качество данных при оптимальных затратах (рисунок 3.19-3.20).

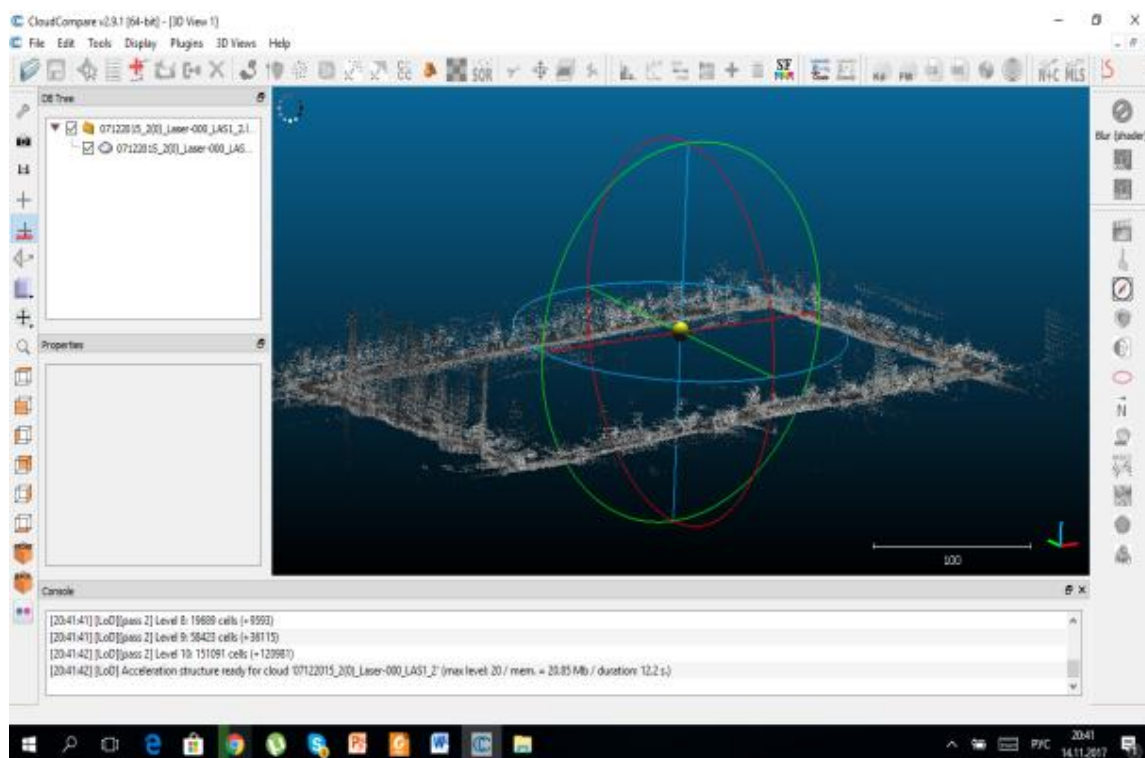


Рисунок 3.19 – Выполнение камеральной обработки в ПО Reality Capture трассы территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

Ошибка перепроецирования отражает точность процесса сопоставления изображений. Каждая связующая точка отмечена как минимум на двух изображениях, что позволяет вычислить ее трехмерное положение с использованием внутренних и внешних параметров камеры. Позднее 3D-точка повторно проецируется на все изображения, на которых она появляется. Расстояние между отмеченной и перепроецированной точкой является ошибкой перепроецирования. Для наземных контрольных точек и точек, отмеченных как на земле, так и на изображении, среднеквадратические ошибки представлены соответственно. Формула для данной характеристики определяется как:

$$CKO = \sqrt{\frac{\sum o_i^2}{N}}$$

Где o_i — Ошибка для i точки, а N — показывает количество точек.

где ND— это общее количество точек, исключенных в процессе интерполяции. Сравнение этого значения рекомендуется проводить с результатами, полученными при использовании δ_D уже существующих и широко распространенных программных пакетов для построения Цифровых Моделей Рельефа.

$$m_P = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_Z^2}$$

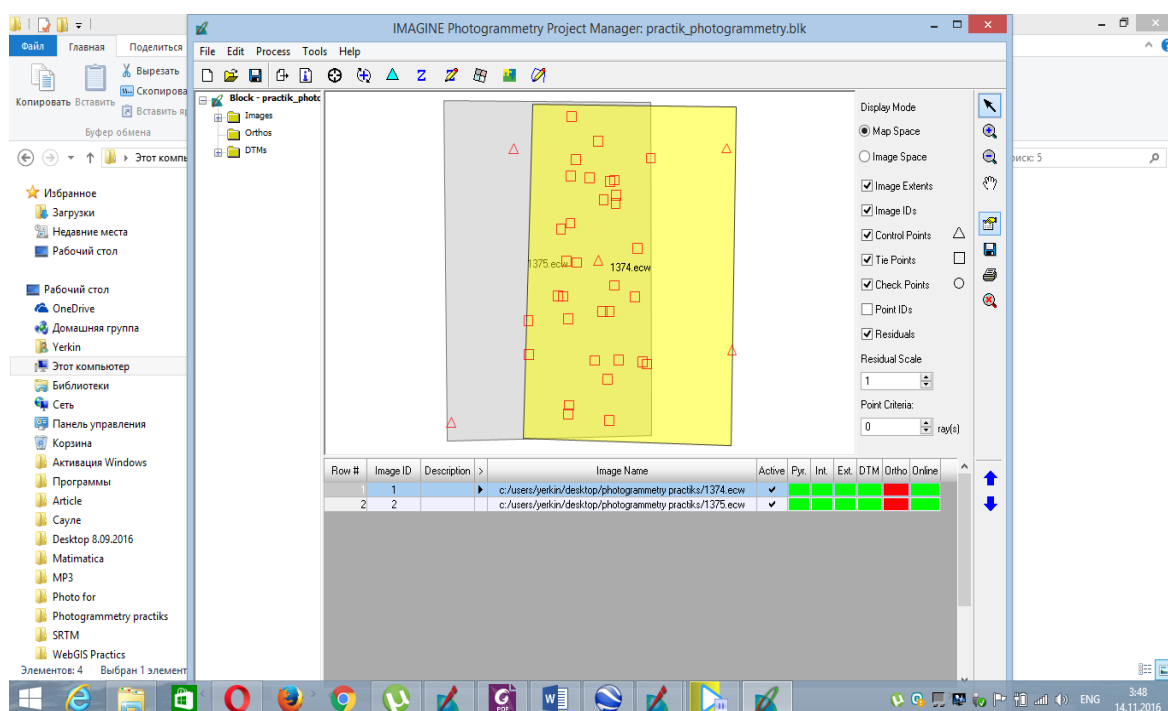


Рисунок 3.20 – Выполнение камеральной обработки в ПО Reality Capture трассы территории Горнолыжного комплекса «Шымбулак»

3.3 Оценка достоверности и экономическая эффективность разработанной методики

Оценка достоверности и экономической эффективности методики являются важными шагами для подтверждения ее практической ценности и обоснования использования. Достоверные данные и положительные экономические показатели являются ключевыми факторами для принятия решений о внедрении методики в производственный процесс или другие сферы деятельности. Оценка экономической эффективности методики включает в себя анализ затрат и выгод, связанных с ее разработкой и внедрением. Это необходимо для понимания рентабельности и целесообразности использования

методики. Оценка достоверности данных является важным шагом для проверки точности и надежности методики (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Сравнительный анализ ПО для обработки фотограмметрических данных

ПО обработки для сравнения	Ошибка предпроецирования [пиксель]	СКО контрольных точек [см]	СКО контрольных точек [пиксель]	Точки центров снимка [см]	ЦМР разрешающая способность [см]
Pix4D Mapper	0.173	3.70	0.840	3.36	16.85
Reality Capture	0.769	3.57	0.393	3.44	6.88
Metashape	0.250	3.60	0.500	3.40	12.00

На этом этапе оценивалось сравнение результатов Agisoft и Pix4D. Как оба пакета программного обеспечения считаются программным обеспечением Computer Vision, они следуют аналогичным рабочий процесс, но с использованием разных алгоритмов. Поэтому для дальнейшей работы важно сравнить возможности различных систем и оценить, какая из них более подходит для целей обследования. Важные для анализа параметры представлены ниже (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Расположение и ошибки GCP, без использования РРК

Метка	Ошибка по X (см)	Ошибка по Y (см)	Ошибка по Z (см)	Общая ошибка (см)	Изображение (пикс)
grp22	0.418259	1.91945	0.0283097	1.9647	1.495 (5)
grp24	-0.390325	-0.452386	-0.44681	0.746087	1.059 (5)
grp26	2.07423	-3.83083	1.04837	4.48071	2.642 (5)
grp27	-2.108	2.33108	-0.708749	3.22179	2.154 (5)
grp28	-1.96551	-3.93531	2.94395	5.29308	4.746 (4)
Итого	1.60852	2.81015	1.44698	3.54655	2.622

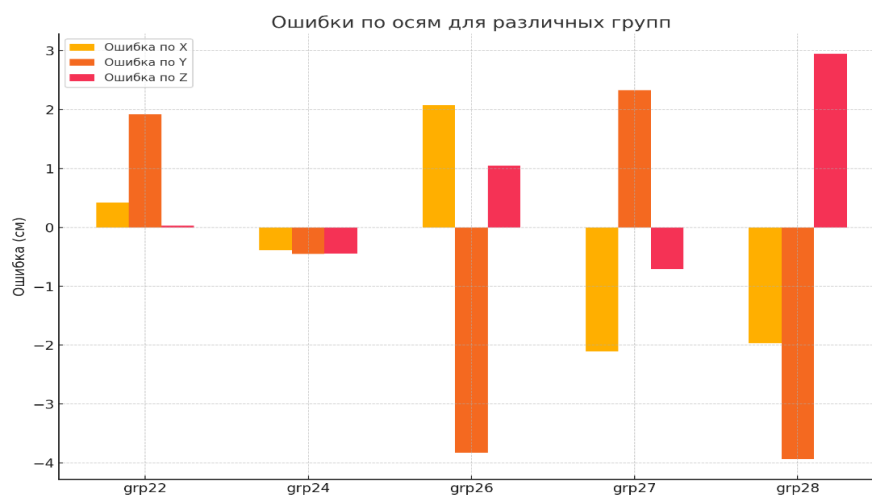


Рисунок 3.21 - График распределения ошибок

График наглядно дает представление о распределении ошибок по осям, общей ошибки и значений изображений для каждой группы (рисунок 3.21).

Таблица 3.3 - Расположение и ошибки GCP, с использованием PPK

Группа	Значение 1	Значение 2	Значение 3	Значение 4	Значение 5
grp22	1.2999	-0.401925	0.153492	1.36925	1.512 (6)
grp24	1.68313	0.46433	0.106542	1.74925	1.503 (7)
grp26	1.73084	-1.26439	0.259256	2.1591	2.296 (6)
grp27	1.52729	-4.69301	1.90232	5.28921	5.892 (7)
grp28	0.37068	-1.65237	0.378594	1.73523	2.328 (6)
Итого	0.895565	1.42909	0.575221	1.78191	1.877

Каждая строка представляет данные по определенной группе, а столбцы содержат различные значения, связанные с этой группой (таблица 3.3).

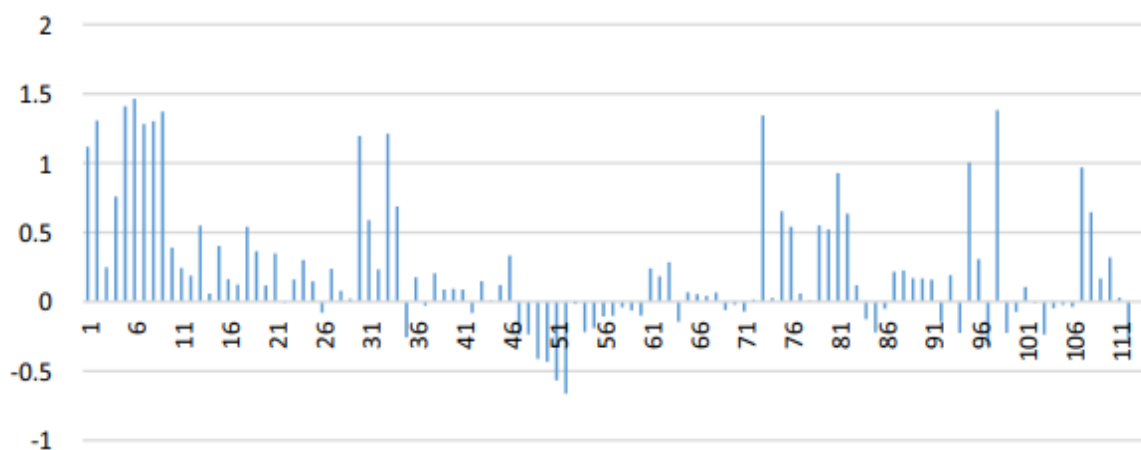


Рисунок 3.21 - Измеренная погрешность ЦМР с опорными точками. (Ось X: контрольные точки, ось Y: допустимая погрешность (метры))

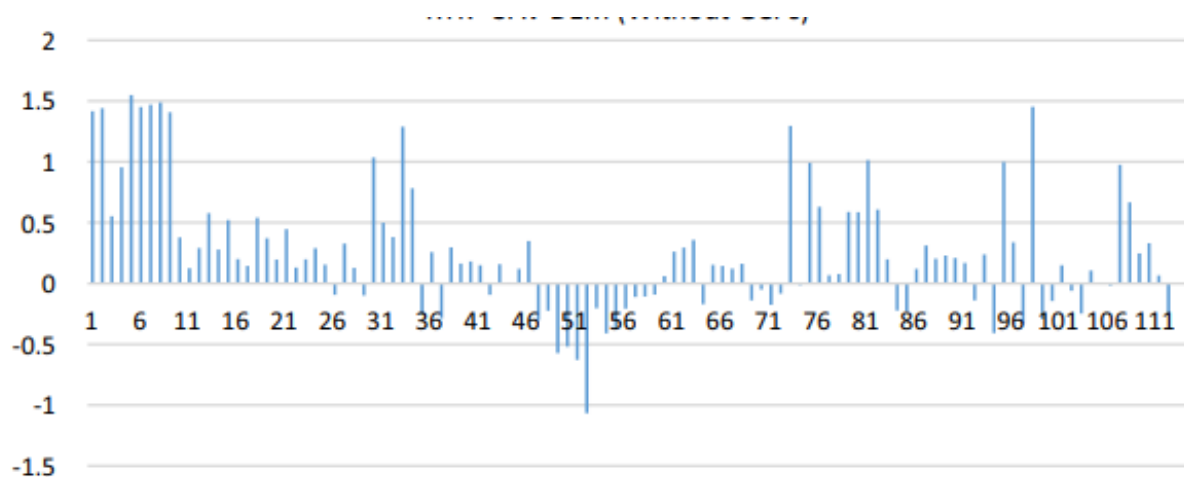


Рисунок 3.22 - Измеренная погрешность ЦМР без опорных точек. (Ось X: контрольные точки, ось Y: допустимая погрешность (метры))

Точность данных цифровой модели рельефа (ЦМР) важна для многих задач. В связи с этим в данном исследовании были протестированы два различных набора данных ЦМР (ЦМР с контрольными точками (GCP) и ЦМР без GCP), которые были сопоставлены с данными, полученными методом RTK на основе GCP, а также с данными ЦМР, созданными в рамках Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) с разрешением 30 м. Для этой цели было выбрано 112 контрольных точек в поле для перекрестной проверки (рисунки 3.21-3.22).

Необходимо рассчитать среднеквадратическое отклонение (СКО) для оценки неопределенностей, связанных с созданными данными ЦМР. СКО выражается следующим образом:

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ti})^2}$$

где:

- n — количество наблюдений,
- y_i — фактическое значение,
- y_{ti} — прогнозируемое (теоретическое) значение.

Сравнительный анализ показывает, что затраты на использование БПЛА (с GCP и без них) по сравнению с традиционными методами могут снизить общие затраты на топографическую съемку на 20-40%. В то же время затраты на установку GCP увеличивают стоимость на 5-10%, однако это компенсируется точностью данных и снижением затрат на исправление ошибок на следующих этапах (рисунки 3.23-3.24).

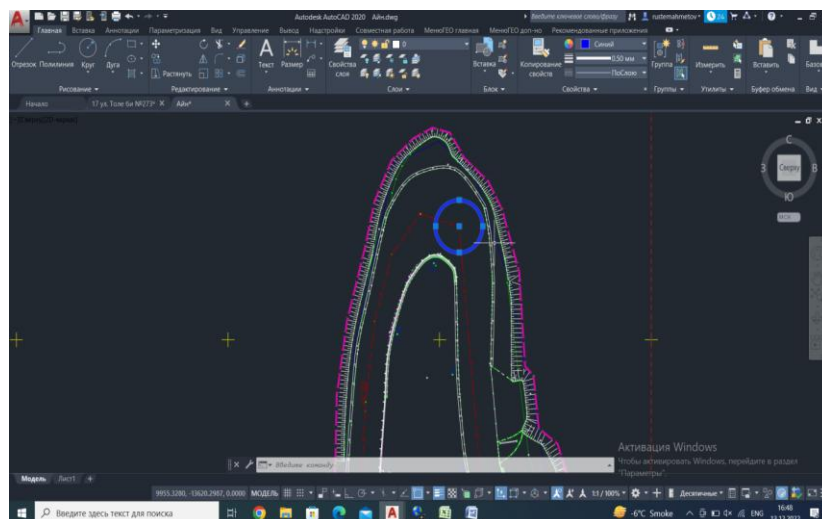


Рисунок 3.23 – Выбор характерных точек в результатах тахеометрической съемки

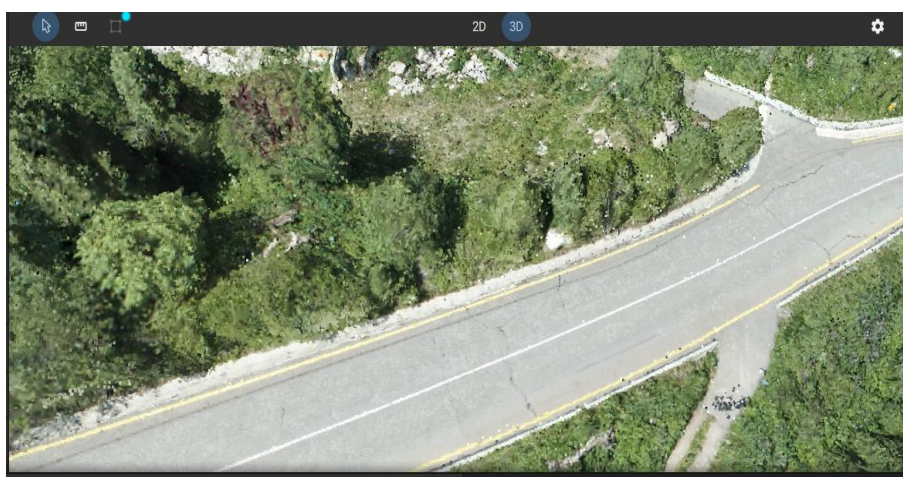


Рисунок 3.24 – Ручные замеры контрольных точек в Reality Capture и в Pix4D

Таблица 3.4 - Сводная информация о точности ЦМР, полученная на пяти высотах полета

Flight high	RMSE Ground control points (cm)					RMSE Checked points (cm)				
	X error	Y error	XY error	Z error	XYZ error	X error	Y error	XY error	Z error	XYZ error
50	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	2.1	1.6	2.6	1.8	3.2
100	0.9	1.2	1.5	2.0	2.0	3.5	2.2	4.1	3.8	4.0
150	2.0	2.8	3.4	4.4	5.2	5.0	3.9	6.3	6.2	7.1
200	3.5	4.0	5.3	5.8	6.7	6.5	6.0	8.8	8.1	10.9
250	5.2	6.0	7.9	8.5	10.6	8.2	9.0	12.2	12.5	16.6

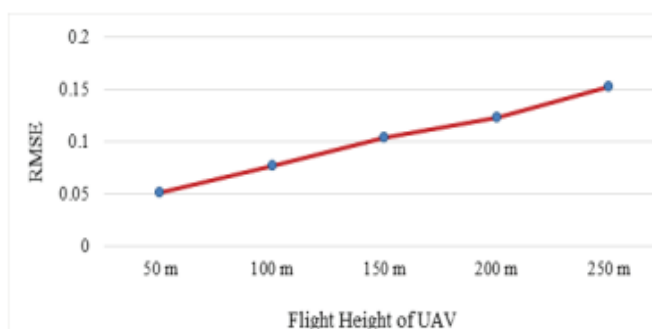


Рисунок 3.25- Зависимость ошибки от высоты полета

Эти данные обеспечивают ориентировочное представление о точности цифровых моделей рельефа на различных высотах полета и могут использоваться для выбора оптимальной стратегии съемки в зависимости от конкретных требований проекта (таблица 3.4, рисунок 3.25).

Таблица 3.5 - Извлечение точек по высоте по всем методам интерполяции

	Elevation	IDW	Kriging	Spline	Natural_neighbor	Trend
1	2267,303	2266,617	2266,807	2266,965	2266,779	2262,548
2	2266,283	2266,208	2266,5	2266,58	2266,456	2262,33
3	2266,673	2266,566	2266,54	2266,555	2266,5	2262,991
4	2262,973	2262,968	2262,873	2262,884	2262,887	2255,961
5	2262,313	2262,221	2261,987	2262,073	2261,954	2252,667
6	2258,193	2256,878	2257,197	2257,076	2257,238	2253,336
7	2257,323	2256,873	2256,923	2256,713	2256,871	2252,456
8	2255,633	2255,472	2255,372	2255,357	2255,392	2252,02
9	2255,203	2255,472	2255,372	2255,357	2255,392	2252,02
10	2255,133	2254,884	2254,737	2254,724	2254,606	2249,824
11	2255,003	2254,884	2254,737	2254,724	2254,606	2249,824
12	2254,293	2253,799	2253,827	2253,833	2253,827	2248,727
13	2254,403	2253,799	2253,827	2253,833	2253,827	2248,727
14	2253,793	2253,799	2253,827	2253,833	2253,827	2248,727

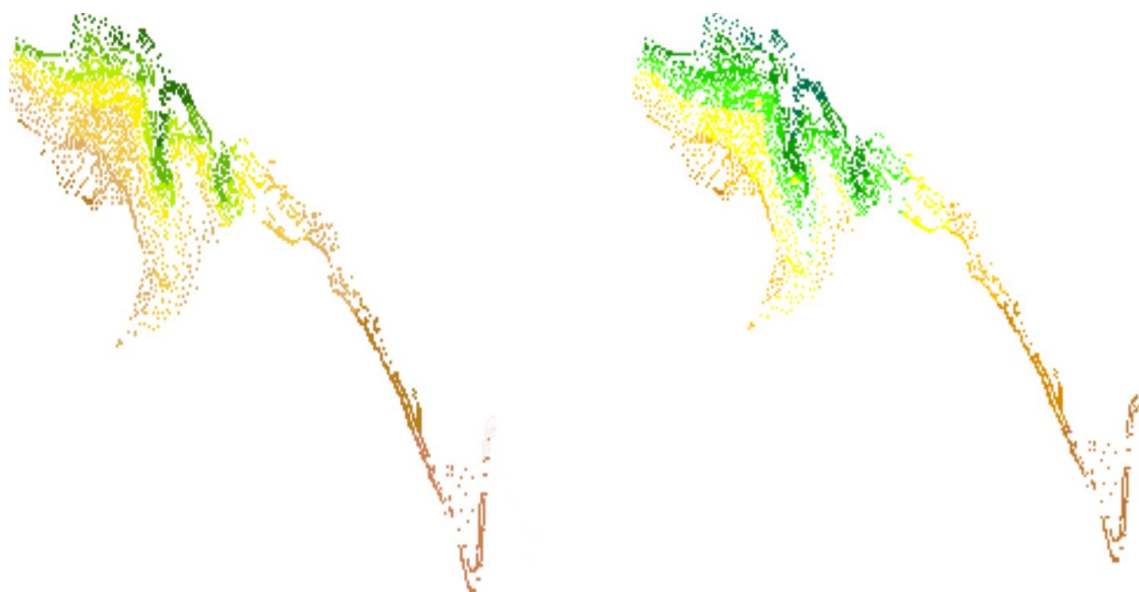


Рисунок 3.26 – Построение поверхности методами интерполяции

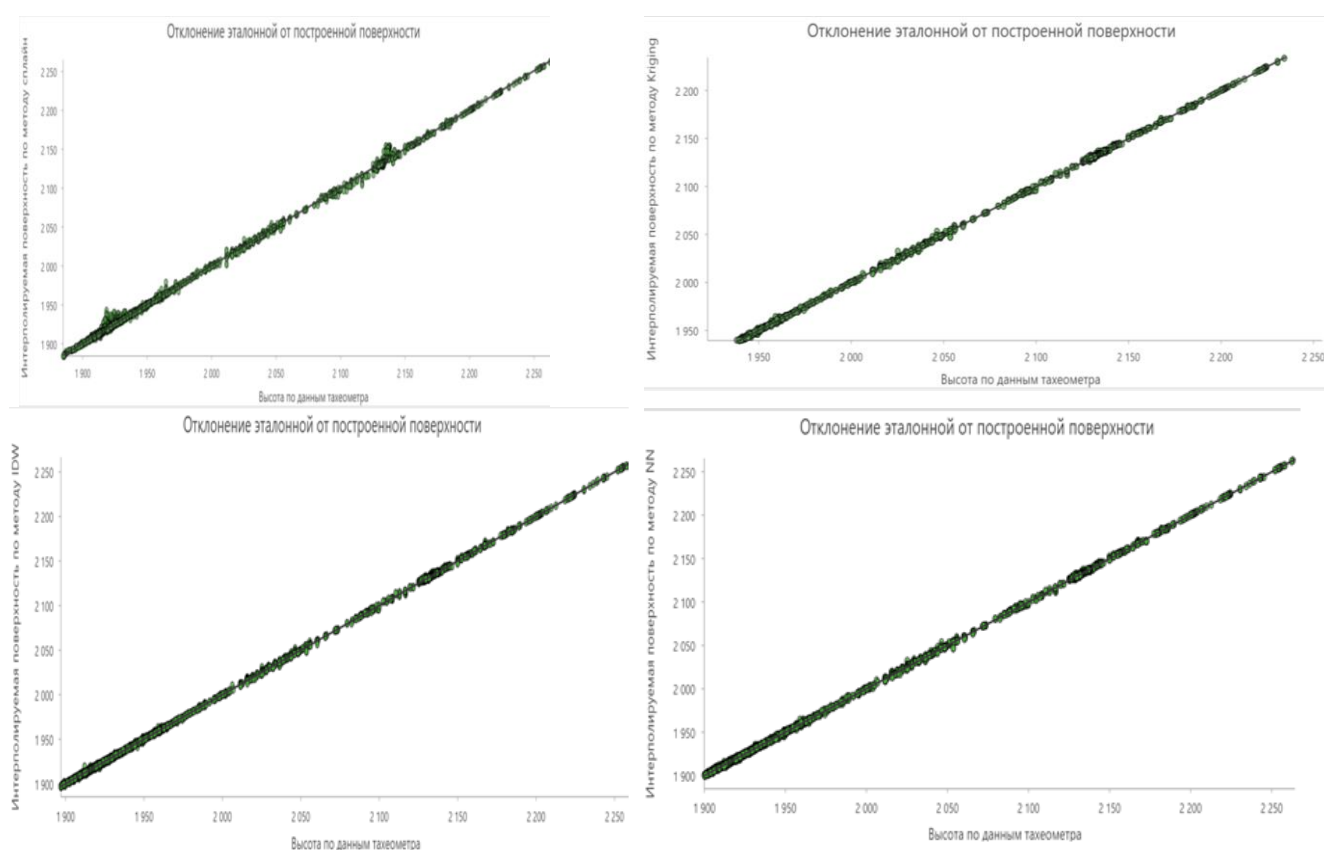


Рисунок 3.27 – Оценка построения поверхности методами интерполяции от измеренных данных

При оценке поверхности дорожного покрытия с использованием методов интерполяции, важно учесть специфику данных ЦМР (Цифровая Модель Рельефа). Методы интерполяции помогут создать непрерывную поверхность на основе дискретных измерений, что полезно для анализа и планирования дорожной инфраструктуры (таблица 3.5).

Методы интерполяции, такие как Кригинг, позволяют строить точные поверхности и проводить анализ пространственных данных. Они могут быть использованы для различных целей, включая создание карт, моделирование природных ресурсов и анализ данных дистанционного зондирования (рисунок 3.26-3.27).

Для более детальной оценки и анализа данных ЦМР автомобильных дорог рассмотрены и другие методы интерполяции. Каждый метод имеет свои преимущества и применим в различных условиях.

Сплайн-интерполяция используется для создания гладких поверхностей. Этот метод особенно полезен для данных с плавными изменениями.

Среднеквадратичная ошибка является популярным методом оценки точности интерполяции. Она определяется как среднее значение квадратов разностей между интерполированными значениями и истинными значениями.

Методы интерполяции являются важным инструментом для анализа и интерпретации данных. Выбор метода зависит от природы данных и требуемой точности. Оценка точности интерполяции позволяет выбрать наиболее подходящий метод и обеспечить надёжные результаты.

Оценка точности цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной методом математического моделирования, является важным этапом верификации модели и включает различные статистические методы и подходы. Был выполнен сбор контрольных данных, анализ ошибок и применение статистических мер. Выполнено определение модели интерполяции (метод Кригинга, обратное расстояние, метод наименьших квадратов, сравнительная таблица представлена выше). В таблице приведены среднеквадратичные ошибки (СКО) для различных методов интерполяции на четырех участках.

Метод Сплайн демонстрирует наименьшие среднеквадратичные ошибки (СКО) и, следовательно, является наиболее точным из представленных методов для всех участков. Метод Крикинг показывает средние значения ошибок и может быть использован в случаях, когда необходим компромисс между точностью и стабильностью. Метод IDW показывает наибольшие значения ошибок и наименее точен для всех участков, что ограничивает его применение в задачах, требующих высокой точности.

На основе этих данных можно рекомендовать использование метода Сплайн для построения цифровых моделей рельефа в областях, где требуется высокая точность

Выбор параметров модели на основе характеристик данных и целей исследования и для вычисления ошибок. Разница между высотами, полученными из ЦМР, и контрольными точками. Анализ значений ME, RMSE и MAE для определения общей точности модели.

Сравнение с нормативными требованиями и стандартами точности для конкретных приложений.

Таблица 3.6 – Оценка достоверности и экономическая эффективность разработанной методики

1. Величина	2.	3. Номер участка			
		4. Участок 1	5. Участок 2	6. Участок 3	7. Участок 4
8. СКО ArcGIS Сплайн, м	9. 0.1 10.	11. 0,072	12. 0,074	13. 0,075	14. 0,085
15. ,м		16. 0,071	17. 0,074	18. 0,078	19. 0,082
20. СКО ArcGIS Крикинг, м	21. 0.2	22. 0,142	23. 0,178	24. 0,181	25. 0,182
26. 27. , м		28. 0,141	29. 0,170	30. 0,175	31. 0,181
32. СКО ArcGIS IDW, м	33. 0.3	34. 0,144	35. 0,210	36. 0,223	37. 0,241
38. , м		39. 0,142	40. 0,212	41. 0,220	42. 0,243
43. СКО ArcGIS IDW, м	44. 45. 0.3	46. 0,145	47. 0,212	48. 0,225	49. 0,243
50. ,м		51. 0,143	52. 0,213	53. 0,223	54. 0,245

Выводы по 3 главе

На основе приведенного исследования в третьей главе можно сделать выводы относительно использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), для создания цифровых моделей рельефа (ЦМР), в рамках проектирования и реконструкции автодорог.

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при съемке на сложных участках местности имеет определенные преимущества по сравнению с традиционными методами. Одним из ключевых моментов является использование контрольных точек (GCP), которые значительно повышают точность результатов моделирования данных. Вместе с тем, решение о выборе между GCP и кинематической постобработкой (РРК) следует принимать, учитывая особенности местности, требования к точности и ограничения ресурсов проекта.

Для проектов с высокими требованиями к точности, при необходимости моделирования с точностью менее 5 сантиметров, рекомендуется использовать GCP. Это поможет повысить точность данных и уменьшить вероятность ошибок на дальнейших этапах строительства. Хотя применение GCP требует дополнительных временных и финансовых затрат.

В ситуациях, когда возможны отклонения порядка 10–30 сантиметров (например, на начальных этапах проектирования), целесообразно использовать РРК для сокращения временных и финансовых затрат. РРК обеспечивает равномерную точность на всем протяжении объекта без необходимости

размещения контрольных точек; это особенно удобно на линейных объектах с ограниченным доступом или сложным рельефом.

В труднодоступных местах или при ограниченных ресурсах рекомендуется сократить использование GCP и прибегнуть к методам РРК для автоматизации обработки данных и получения хороших результатов с меньшими затратами на работу на местности. Современные алгоритмы фотограмметрии обеспечивают высокую точность даже при минимальном числе GCP — это особенно важно для отдаленных участков, где размещение контрольных точек нецелесообразно с экономической точки зрения.

Поэтому использование беспилотных летательных аппаратов и совершенствованных методов геопривязки в процессе дорожного проектирования способствует повышению точности данных, уменьшению временных затрат и экономии на топографические изыскания. Это делает применение беспилотных летательных аппаратов экономически обоснованным для большинства инфраструктурных проектов, особенно учитывая растущие требования к качеству и оперативности выполнения строительно-инженерных задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы является проведение прикладных научных исследований по разработке цифровых моделей земной поверхности с использованием фотограмметрических методов обработки снимков, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Основной новизной исследования является разработка оптимальной методики создания цифровых моделей земной поверхности для линейных протяженных объектов на основе снимков с БПЛА, которая обеспечивает требуемую точность при одновременном сокращении экономических и трудовых затрат.

Для достижения поставленных целей были выполнены следующие теоретические и экспериментальные исследования:

Проведен анализ мирового опыта в области геопозиционирования снимков, полученных с БПЛА, и их использования в технологиях создания цифровых моделей местности для линейных протяженных объектов.

Теоретически обосновано оптимальное количество и размещение сети маркированных опорных и контрольных точек, необходимых для планово-высотной подготовки косвенного геопозиционирования снимков.

Проанализировано влияние точности геопозиционирования снимков на погрешности фотограмметрической обработки и, соответственно, на точность создаваемых цифровых моделей земной поверхности.

Результаты исследования показали, что с использованием снимков, полученных с беспилотных летательных аппаратов, возможно создание цифровых моделей земной поверхности высокого разрешения с точностью выше 10 см.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Mikhail, E. M., Bethel, J. S., McGlone, J. C. Introduction to Modern Photogrammetry. Wiley, 2001.
2. Li, Z.; Zhu, Q.; Gold, C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. CRC Press, 2005
3. Luhmann, T.; Robson, S.; Kyle, S.; Harley, I. Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications. Whittles, Scotland, UK, 2006.
4. Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. "Elements of Photogrammetry with Applications in GIS." 4th ed. McGraw-Hill, 2014.
5. Hofmann-Wellenhof, B.; Wasle, H. L. ГНСС - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and More. New York: Springer Wien, 2008.
6. Manuel, P.; Maidment, D. Influence of DEM interpolation methods in drainage analysis. GIS in Water Resources, Texas, USA, 2004, 27 p.
7. Mohd, W.; Mohd, N. W.; Mohd, A. A.; Hashim, S. Accuracy comparison of digital elevation models generated from different sources. FIG Congress 2014, Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance, Malaysia, 2014, 17 p.
8. Fellendorf, M. Digital Terrain Models for Road Design and Traffic Simulation. Photogrammetric Week '13, Wichmann/VDE Verlag, Berlin & Offenbach, Graz, Austria, 2013.
9. Schofield, W., & Breach, M. "Engineering Surveying." 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2007.
10. Wolf, P. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. NY, 2016.
11. Kraus, K. "Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans." Walter de Gruyter, 2007
12. Control Points: Significance for Infrastructure Monitoring. Data, 2019, 4, 42.
13. Wack, R.; Wimmer, A. Digital terrain models from airborne laser scanner data—A grid based approach. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2002, 34, 293–296.
14. Reshetyuk, Y.; Martensson, S. G. Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles. The Photogrammetric Record, 2016, 31(154), 143-165.
15. Chen, Z.; Gao, B.; Devereux, B. State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data. Sensors, 2017, 17,150.
16. Yoo, Y. H.; Choi, J. W.; Choi, S. K.; Jung, S. H. Quality Evaluation of Orthoimage and DSM Based on Fixed-Wing UAV Corresponding to Overlap and GCPs. Journal of Korean Society for Geospatial Information System, 2016, 24, 3–9.
17. Ackermann, F. Techniques and strategies for DEM generation. In Grève, C. (ed) Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry.

American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, VA, 1996, pp. 135–141.

18. Klapka, P.; Frantál, B.; Halas, M.; Kunc, J. Spatial organisation: development, structure and approximation of geographical systems. *Moravian Geographical Reports*, 2010, 18, 53-65.

19. Levin, E.; Nadolinets, L.; Akhmedov, D. *Surveying Instruments and Technology*. Taylor & Francis Group, 2017.

20. Schofield, W.; Breach, M. *Engineering Surveying*. 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN: 978-0-7506-6945-2.

21. Кузнецов, П.Н. *Геодезия. Ч1: Учебник для вузов*. М.: Карт-геоцентр – Геодезиздат, 2002, 341 с.

22. Kavanagh, B. F. *Surveying: Principles and Applications*. 8th ed. Prentice Hall, 2009. ISBN: 978-0-13-236512-3.

23. Дементьев, В.Е. *Современная геодезическая техника и ее применение: Учебное пособие для вузов*. Изд. 2-е. М.: Академический проспект, 2008. 591 с. (Фундаментальный учебник).

24. Wolf, P. R.; Ghilani, C. D. *Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics*. 13th ed. Prentice Hall, 2012. ISBN: 978-0-13-255434-2.

25. Книжников, Ю.Ф. *Аэрокосмические методы географических исследований*. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 336 с.

26. Книжников, Ю.Ф. и др. *Аэрокосмические методы географических исследований: Учебник*. 2-е изд., переработанное и дополненное. М.: Академия, 2011. 416 с.

27. Jiménez-Jiménez S.I., Ojeda-Bustamante W., de Jesús Marcial-Pablo M., Enciso J. Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, no. 5. P. 285. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>.

28. Aktürk E., Altunel A. Accuracy Assessment of a Low-Cost UAV Derived Digital Elevation Model (DEM) in a Highly Broken and Vegetated Terrain // *Measurement*. 2019. Vol. 136. P. 382–386. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.101.

29. Long N., Goyal R., Bui L., Canh L., Cao C., Chung P., Bui Q., Bui X.-N. Influence of Flight Height on the Accuracy of UAV Derived Digital Elevation Model of Complex Terrain // *Inzynieria Mineralna*. 2020. Vol. 45. P. 179–187. DOI: 10.29227/IM-2020-01-27.

30. Tercan, E. Karayolu Projelerinde İnsansız Hava Aracı ile Üretilen Sayısal Arazi Modelinin Değerlendirilmesi: Bucak-Kocaaliler Yolu Örneği. *Journal of Surveying*, 2017, 8(2), 172-183.

31. Li, R.; Liu, J.; Zhang, L.; Hang, Y. LIDAR/MEMS IMU integrated navigation (SLAM) method for a small UAV in indoor environments. *Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS)*, DGON, Karlsruhe, Germany, 16–17 September 2014, pp. 1–15.

32. Калабаев, Н.Б. *Географические информационные системы и цифровое картографирование: Учебник*. Алматы, 2002, 226 с.

33. Лаврова, Н.П. Космическая фотосъемка. М.: Недра, 1983.
34. Кусов, В.С. Основы геодезии, картографии и космоаэро съемки: Учебное пособие для студ. вузов. М.: Издательский центр "Академия", 2009.
35. Строительные нормы Республики Казахстан СН РК 1.03-03-2018 Геодезические работы в строительстве.
36. Закон Республики Казахстан от 17 июля 2001 года N 245. "Об автомобильных дорогах."
37. СП 34.13330.2021 "СНиП 2.05.02-85 Автомобильные дороги."
38. СП 34.13330.2012 "Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85."
39. СНиП 2.05.02-85 "Автомобильные дороги (с Изменениями N 2-5)."*
40. СНиП 3.06.03-85 "Автомобильные дороги."
41. СП РК 3.03-101-2013, СН РК 3.03-01-2013 «Автомобильные дороги».
42. СТ РК 1053 Автомобильные дороги. Термины и Определения.
43. Закон Республики Казахстан «Об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности в Республике Казахстан» от 16 июля 2001 года № 242-ІІ.
44. Закон Республики Казахстан «Об автомобильных дорогах» от 17 июля 2001 года № 245-ІІ.
45. СТ РК 1399-2005 «Дороги автомобильные. Инженерные изыскания для строительства, реконструкции и капитального ремонта. Требования к составу работ».
46. Руководящий документ в строительстве Республики Казахстан 1.03-01-2018 «Геодезическая служба и организация геодезических работ в строительстве» (приложение 1 к приказу председателя Комитета по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 20 апреля 2018 года № 88-НК).
47. Приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 31 декабря 2020 года № 706 "Об утверждении правил эксплуатации беспилотных летательных аппаратов в воздушном пространстве Республики Казахстан".
48. Приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 12 мая 2023 года № 340 (Поправки в Приказ №706).
49. ISO 21384-3:2023 Беспилотные авиационные системы (UAS). Часть 3. Правила эксплуатации.
50. ISO 7077:1981 Методы измерения для строительства — Общие принципы и процедуры проверки соответствия измерений.
51. Документация FIG № 49: Экономически эффективные методы позиционирования с помощью ГНСС.
52. Gindraux, S.; Boesch, R.; Farinotti, D. Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on glaciers. Remote Sens., 2017, 9, 186.

53. Hsu, L. T. GHCC multipath detection using a machine learning approach. IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Yokohama, 2017.
54. Langley, R. B. Dilution of Precision. GPS World, 1999, May, pp. 52–59.
55. Qtaishat, K. S.; Smith, M. J.; Park, D. W. G. Assessing the performance of different direct georeferencing strategies. ASPRS Annual Conference, Nevada, 2006.
56. Lofton, A.; Ravani, B.; Lasky, T. A.; Yen, K. S. Mobile Terrestrial Laser Scanning for Highway Applications. Advanced Highway Maintenance and Construction Technology, Davis, 2016.
57. Sechin, A.; Drakin, M.; Kiseleva, A. Unmanned aerial vehicle: application for aerial photography for mapping (part 2). Rakurs, Moscow, 2011.
58. Малинников, В.А.; Стеценко, А.Ф.; Алтынов, А.Е.; Попов, С.М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. Учеб.пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. - 140 с.
59. Савиных, В.П.; Кучко, А.С.; Стеценко, А.Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1997.
60. Гарбук, С.В.; Гершензон, В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Издательство А и В, 1997.
61. Кравцова, В.И. Космические методы картографирования. М.: МГУ, 1995.
62. Хан, В.А. Учебно-методический комплекс дисциплины "Аэрокосмические методы съемки". Алматы, 2006. – 67 с.
63. Кузнецова, И.А. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине "Аэрокосмические методы съемок" для бакалавров специальности 5В071100 - Геодезия и картография. Алматы: КазГАСА, 2016. – 27 стр.
64. Baigulov, A.; Romaneskul, M.; Shumilov, B.; Gubskaya, M. The method of road repair designing based on mobile lidar mapping. CAD& GIS for roads, №3, 2013.
65. Frueh, C.; Zakhor, A. Constructing 3D City Models by Merging Ground Based and Airborne Views. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03), 2003.
66. Sarychev, D. Mobile lidar mapping. CAD& GIS for roads, №3.
67. Eisenbeiss, H. UAV photogrammetry in plant sciences and geology. 6th ARIDA Workshop on Innovations in 3D Measurement, Modeling and Visualization, Povo (Trento), Italy, 2008.
68. Kerle, N.; Heuel, S.; Pfeifer, N. Real-time data collection and information generation using airborne sensors. CRC Press, 2008.
69. Gonzalez-Aguilera, D.; Rodriguez-Gonzalvez, P. Drones—An Open Access Journal. Drones, 2017, 1(1).
70. Polyakova, E.; Gofarov, M. The use of aerial photography from an unmanned aerial vehicle in the compilation of a digital terrain model (using the

example of the subarctic thermal boundary of Pymwashor). Proceedings of the Komi Science Center Uro RAS, Issue 3(11), Syktyvkar.

71. Instruction on photogrammetric work when creating digital topographic maps and plans (SCNP-02-036-02). Moscow, TsNIIGAiK, 2002.

72. Colomina, I.; Blázquez, M.; Molina, P.; Parés, M. E.; Wis, M. Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China, 2008, XXXVII. Part B1, 1201–1206.

73. Zhurkin, I.; Khlebnikov, T. Digital modeling of measuring three-dimensional video scenes. Monograph, Novosibirsk: SSGA, 2012. - 246 c.

74. Eisenbeiss, H.; Zhang, L. Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. ISPRS Commission V Symposium “Image Engineering and Vision Metrology”, ETH Zurich, September 2012.

75. Korzeniowska, K.; Lacka, M. Generating DEM from lidar data – comparison of available software tools. Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, 2011, Vol. 22, pp. 271-284.

76. Law of the Republic of Kazakhstan “On Roads” 17 July 2001, N 245.

77. Fellendorf, M. Digital Terrain Models for Road Design and Traffic Simulation. 54th Photogrammetric Week, Austria, 2013.

78. Babić, S.; Ljutić, K. Digital Terrain Model Application in Road Planning and Design. CETRA - International Conference on Road and Rail Infrastructure, Opatija, Croatia, 2015, Volume 1.

79. SNiP of the Republic of Kazakhstan 03.03-09-2006 Highways.

80. State Program "Digital Kazakhstan-2020" 2017-2020.

81. Safar, V.; Smejkal, Z. The accuracy of digital models for road design. Geoinformatics for Intelligent Transportation, GIS Ostrava, Czech Republic, 2014.

82. Seredovich, V.; Vostrov, I. A review of modern software products for the creation and use of three-dimensional models for the design of highways. Interexpo Geo-Siberia, 2012, No. 3.

83. Batugin, A. A proposed classification of the Earth's crustal areas by the level of geodynamic threat. Geodesy and Geodynamics, 2021, Volume 12, Issue 1, p. 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.10.002>.

84. Panzhin, A.; Panzhina, N. Satellite geodesy-aided geodynamic monitoring in mineral mining in the Urals. Journal of Mining Science, 2013, Volume 48(6), pp. 982-989. <https://doi.org/10.1134/S1062739148060056>.

85. Kaftan, V.; Ustinov, A. Improving the accuracy of local geodynamic monitoring using global navigation satellite systems. Mining Journal, 2015, Volume 10, pp. 32-37. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.06>.

86. Kaftan, V. I.; Tatarinov, V. N.; Manevich, A. I.; Prusakov, A. N.; Kaftan, A. V. Estimation of the accuracy of ГНСС observations on a reference basis as a means of checking the measuring equipment of local geodynamic monitoring.

Geodesy and Cartography, 2020, Volume 81, No. 7, pp. 37–46. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-37-46>.

87. Iodis, V. JAVAD ГНСС deformation monitoring system. GEOPROFI, 2015, Volume 3, pp. 4-8.

88. Dorogova, I. E.; Dukhovnikov, K. S. Software, services and open source software for solving geodynamic problems. Interexpo Geo-Siberia, 2022, pp. 138-145. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-1-138-145>.

89. Lee, J.; Kwon, J. H.; Lee, H.; Park, J. S. Accuracy Analysis of ГНСС-derived Orthometric Height in Mountainous Areas. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 2018, Volume 36(5), pp. 403-412. <https://doi.org/10.7848/KSGPC.2018.36.5.403>.

90. Karaim, M.; et al. ГНСС error sources. In Multifunctional Operation and Application of GPS, 2018, Chapter 4, pp. 69-85. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75493>.

91. Valaitite, A. A. Analysis of the accuracy of estimates of the zenith tropospheric delays obtained using the method of high-precision absolute positioning. Proceedings of MAI, 2020, Volume 110, p. 15. <https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-15>.

92. Wang, G. Q. Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico. Journal of Geodetic Science, 2013, Volume 3(1), pp. 22-31. <https://doi.org/10.2478/jogs-2013-0001>.

93. Shashenko, O. M.; Sdvyzhkova, O. O.; Kovrov, O. S. Modeling of the rock slope stability at the controlled failure. European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010, Lausanne, Switzerland, 2010, pp. 581-584. <https://doi.org/10.1201/b10550-138>.

94. Kamza, A.; Levin, E.; Kuznecova, I.; Yerzhankyzy, A.; Orynassarova, E. Investigation of changes in DEM, constructed from time to time data from the seabed. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, Volume 18(2.3), pp. 449-454. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/2.3/S11.057>.

95. Jansson, P.; Persson, C. G. The effect of correlation on uncertainty estimates – with GPS examples. Journal of Geodetic Science, 2013, Volume 3(2), pp. 111-120. <https://doi.org/10.2478/jogs-2013-0016>.

96. Habib, A., & Morgan, M. "Adjustment Models in 3D Geospatial Modeling and Data Acquisition." Taylor & Francis, 2011.

97. Moore, M.; Watson, C.; King, M.; McClusky, S.; Tregoning, P. Empirical modelling of site-specific errors in continuous GPS data. Journal of Geodesy, 2014, Volume 88(9), pp. 887-900. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0729-5>.

98. Лурье, И.К. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М., 2016.

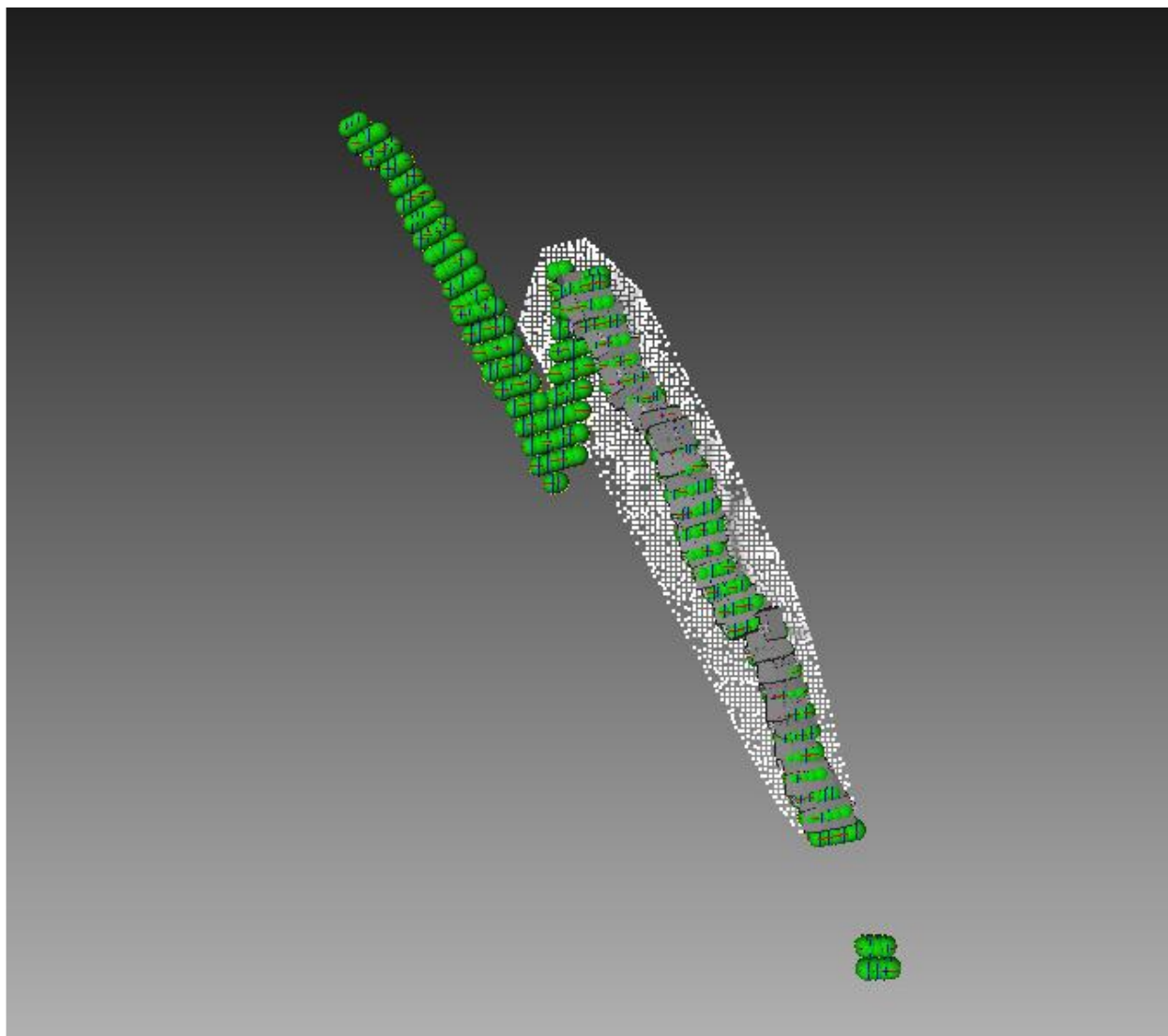
99. Раклов, В.П. Географические информационные системы в тематической картографии. М., 2014.

100. Чандра, А.М.; Гош, С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы: Учебное пособие. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
101. Kennedy, M. D.; Goodchild, M. F.; Dangermond, J. *Introducing Geographic Information Systems with ArcGIS: A Workbook Approach to Learning GIS*. Wiley, 2013.
102. Mayr, W. Unmanned aerial systems in use for mapping at BLOM. 53rd Photogrammetric Week, Institute für Photogramm., University of Stuttgart, 2011, pp. 125–134.
103. Stodle, D.; et al. High-performance visualisation of UAV sensor and image data with raster maps and topography in 3D. *International Journal of Image Data Fusion*, Taylor & Francis, 2014, Volume 5(3), pp. 244–262.
104. Koeva, M.; et al. Using UAVs for map creation and updating: A case study in Rwanda. *Survey Review*, Taylor & Francis, 2018, Volume 50(361), pp. 312–325.
105. Elkaim, G. H.; Lie, F. A. P.; Gebre-Egziabher, D. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs. In *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Citeseer, 2015, pp. 347–380.
106. Gini, R.; et al. Aerial images from an UAV system: 3D modeling and tree species classification in a park area. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, Volume 39(B1), pp. 361–366.
107. Lowe, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, Springer, 2004, Volume 60(2), pp. 91–110.
108. Bay, H.; et al. Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, Elsevier, 2008, Volume 110(3), pp. 346–359.
109. Morel, J.-M.; Yu, G. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, SIAM, 2009, Volume 2(2), pp. 438–469.
110. Patel, A.; Katiyar, S. K.; Prasad, V. Performance evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2016, Volume 19, pp. 7–16.
111. Cavalli, R.; Grigolato, S.; Pellegrini, M. GPS mobile devices and open source GIS: a comparison between different solutions. *Formec'09*, Kostelec n. Č.l. / Prague, Czech Republic, 2009, 6 p.
112. Yeritsian, H. H. Comparison of the DEMs generated from 1:50000, 1:100000 and 1:200000 topo-maps with the SRTM DEM data. *Proceedings of NAS RA*, 2013, Volume 66(1), pp. 39-47.
113. Kamza, A. T.; Kuznecova, I. A. Building a digital model of the seabed relief. *Vestnik KAZGASA*, Almaty, 2013, Volume 1(63), pp. 109-115.
114. Szypula, B. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods. *Landform Analysis*, 2016, Volume 32, pp. 45–58.

115. Kakimzhanov, Y.; Yerzhankyzy, A.; Kozhaev, Zh. Modern methods of processing and creating a digital terrain model. *Journal of Geography and Environmental Management*, 2017, Volume 47(4), pp. 33-42.
116. Boucher, Ch.; Noyer, J.-Ch. A General Framework for 3-D Parameters Estimation of Roads Using GPS, OSM and DEM Data. *Sensors*, 2018, Volume 18(41), 16 p.
117. Kakimzhanov, Y.; Prnazarova, A. Research methods for agro-landscapes of the mountain river basins based on satellite images (example of the Kegen river basin). 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM, Bulgaria, 2014, pp. 283-289.
118. Nikolakopoulos, K.; Kamaratakis, E.; Chrysoulakis, N. SRTM vs ASTER Elevation Products - Comparison for Two Regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, Volume 27, pp. 4819-4838.
119. Forkuor, G.; Maathuis, B. Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models over Two Regions in Ghana – Implications for Hydrological and Environmental Modeling. *Intech*, 2012.

Приложение А

Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler



Приложение Б

Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler

Summary			
Last Processing			
Software Version: PhotoModeler Premium 2020.1.1.2562 (64-bit)			
Date: Mon Dec 12 20:29:53 2022			
Photo Summary			
	Total	Oriented	Not Oriented
Photos	334	167	167
Point Summary			
	Count	Maximum Residual	Overall RMS Residual
Manually marked	0	n/a	0
Sub-pixel	0	n/a	0
SmartPoints	47931	2.1	0.817
Mesh Summary			
0 points in 0 point clouds			
5864 triangles in 1 triangulated meshes			
Coordinate system Summary			
Units: Geographical - Lat/Lon (WGS84 - World Geodetic System 1984) Elevation: meters			
Number of assigned and active control points: 334			
Number of assigned control points: 334			
Number of active control points: 334			
Number of control points: 334			
External check Summary			
0 check distances (average delta: 0 m, 0%)			
167 check points (average delta: 16.6 m)			
Description / Notes			
None			

Приложение В

Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler

Quality

Photographs				
Total Number: 334			Number Oriented: 167	
Cameras				
Calibrated	Auto-calibrated	Field Calibrated	Inverse	Other
0	1	0	0	0
Photo coverage (percent)				
Minimum: 24.6		Maximum: 82.8	Average: 80.9	
Point Marking Residuals (pixels)				
Minimum: 8.86e-05		Maximum: 2.1	Point ID of Max: 2080	
Point Marking RMS Residuals (pixels)				
Minimum: 8.21e-05 (pt:41792)		Maximum: 2.1 (pt:34272)	Overall: 0.986	
Point Angle (degrees)				
Minimum: 3 (pt:14780)		Maximum: 75.7 (pt:31884)	Average: 23.1	
Point Precisions (m)				
Minimum: 0.52 (pt:1)		Maximum: 0.52 (pt:60757)	Overall RMS: 0.52	
Check distances (m)				
n/a				
Check points (m)				
Minimum: 1.13		Maximum: 33.4	Average: 16.6	

Приложение Г

Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler

Check points				
Summary of Geo-Control points (EXIF), 167 active valid check points.				
	Best fit	Worst fit	Mean	RMS
Distance (m)	1.13	33.4	16.6	19
Delta Lat. (deg.)	4.67e-08	0.000281	0.000134	0.000156
Delta Long. (deg.)	2.13e-07	0.000181	7.94e-05	9.29e-05
Delta Elev. (m)	0.00311	4.52	1.29	1.62
List of 167 active and valid check points				
(Total: 334 check points: 334 active and 167 are valid)				
Name	Distance (m)	Delta Lat. (deg.)	Delta Long. (deg.)	Delta Elev. (m)
dji_0281.jpg	11.4	8.14e-05	-6.35e-05	4.51
dji_0282.jpg	11	8.07e-05	-5.49e-05	4.52
dji_0283.jpg	13.1	9.83e-05	-7.54e-05	3.65
dji_0284.jpg	12.8	9.93e-05	-6.31e-05	3.91
dji_0285.jpg	12.7	0.000101	-5.04e-05	4.19
dji_0286.jpg	12.6	0.000102	-3.92e-05	4.39
dji_0287.jpg	12.6	0.000102	-3.89e-05	4.43
dji_0288.jpg	14.4	0.000121	-5.57e-05	2.69
dji_0289.jpg	14.4	0.000119	-6.63e-05	2.16
dji_0290.jpg	14.5	0.000117	-7.62e-05	1.57
dji_0291.jpg	14.5	0.000115	-8.45e-05	1.16
dji_0292.jpg	14.5	0.000115	-8.51e-05	1.1
dji_0293.jpg	17.1	0.000136	-9.65e-05	0.757
dji_0294.jpg	16.7	0.000138	-8.08e-05	1.07
dji_0295.jpg	16.5	0.000139	-6.98e-05	1.3
dji_0296.jpg	16.4	0.00014	-5.88e-05	1.62
dji_0297.jpg	16.4	0.00014	-6.1e-05	1.72
dji_0298.jpg	18.9	0.000162	-6.78e-05	1.57
dji_0299.jpg	19	0.00016	-8.15e-05	0.827
dji_0300.jpg	19.1	0.000158	-9.24e-05	0.216
dji_0301.jpg	19.2	0.000156	-0.000103	-0.246
dji_0302.jpg	19.2	0.000155	-0.000103	-0.483
dji_0303.jpg	21.6	0.000176	-0.000112	-0.553
dji_0304.jpg	21.3	0.000178	-9.88e-05	-0.137
dji_0305.jpg	21.2	0.000179	-8.76e-05	0.257
dji_0306.jpg	21	0.000181	-7.67e-05	0.621
dji_0307.jpg	21	0.000181	-7.59e-05	0.536
dji_0308.jpg	23.5	0.000202	-8.31e-05	0.485
dji_0309.jpg	23.6	0.0002	-9.55e-05	-0.0544
dji_0310.jpg	23.7	0.000198	-0.000108	-0.575
dji_0311.jpg	23.9	0.000196	-0.000119	-1.19
dji_0312.jpg	23.8	0.000195	-0.000118	-1.15

Приложение Д

Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Photomodeler

Name	Distance (m)	Delta Lat. (deg.)	Delta Long. (deg.)	Delta Elev. (m)
dji_0313.jpg	26.3	0.000218	-0.000124	-1.27
dji_0314.jpg	25.9	0.00022	-0.000107	-0.703
dji_0315.jpg	25.8	0.00022	-0.000102	-0.29
dji_0316.jpg	25.7	0.000222	-9.02e-05	0.277
dji_0317.jpg	25.7	0.000222	-8.69e-05	0.372
dji_0318.jpg	28.1	0.000243	-9.78e-05	0.43
dji_0319.jpg	28.2	0.00024	-0.00011	0.00448
dji_0320.jpg	28.2	0.000238	-0.000122	-0.424
dji_0321.jpg	28.3	0.000236	-0.000132	-0.712
dji_0322.jpg	28.5	0.000234	-0.000141	-1.21
dji_0323.jpg	28.4	0.000233	-0.000142	-1.32
dji_0324.jpg	31	0.000253	-0.000159	-1.38
dji_0325.jpg	30.6	0.000254	-0.000145	-1.01
dji_0326.jpg	30.4	0.000256	-0.000133	-0.637
dji_0327.jpg	30.3	0.000258	-0.000123	-0.0488
dji_0328.jpg	30.3	0.000259	-0.000116	0.423
dji_0329.jpg	30.3	0.00026	-0.00011	0.697
dji_0330.jpg	32.8	0.000281	-0.000126	0.714
dji_0331.jpg	33	0.000279	-0.000138	0.138
dji_0332.jpg	33.1	0.000277	-0.00015	-0.11
dji_0333.jpg	33.2	0.000275	-0.00016	-0.452
dji_0334.jpg	33.4	0.000273	-0.000172	-0.949
dji_0335.jpg	33.4	0.000271	-0.000176	-0.928
dji_0336.jpg	11.2	-9.69e-05	2.88e-05	1.76
dji_0337.jpg	11.2	-9.39e-05	4.25e-05	1.94
dji_0338.jpg	11.2	-9.15e-05	5.12e-05	2.24
dji_0339.jpg	11.3	-8.95e-05	5.93e-05	2.4
dji_0340.jpg	11.4	-9.01e-05	5.99e-05	2.44
dji_0341.jpg	9.43	-7.35e-05	5.29e-05	1.94
dji_0342.jpg	9.34	-7.65e-05	4.39e-05	1.46
dji_0343.jpg	9.31	-7.89e-05	3.61e-05	1
dji_0344.jpg	9.4	-8.3e-05	2.11e-05	0.472
dji_0345.jpg	9.51	-8.42e-05	2.07e-05	0.221
dji_0346.jpg	7.56	-6.73e-05	1.05e-05	-0.681
dji_0347.jpg	7.38	-6.42e-05	2.21e-05	-0.642
dji_0348.jpg	7.27	-6.15e-05	3.03e-05	0.0599
dji_0349.jpg	7.31	-5.9e-05	3.96e-05	0.281
dji_0350.jpg	7.35	-5.78e-05	4.32e-05	0.597
dji_0351.jpg	5.33	-4.07e-05	3.45e-05	0.14
dji_0352.jpg	5.19	-4.31e-05	2.46e-05	-0.258
dji_0353.jpg	5.32	-4.59e-05	1.59e-05	-0.79
dji_0354.jpg	5.55	-4.82e-05	8.46e-06	-1.28
dji_0355.jpg	5.93	-5.11e-05	5.9e-07	-1.71
dji_0356.jpg	5.96	-5.15e-05	-2.13e-07	-1.66
dji_0357.jpg	4.52	-3.55e-05	-1.13e-05	-2

Приложение Ж

Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Pix4D

Quality Report



Generated with Pix4DDiscovery version 4.8.2 Preview

- Important:** Click on the different icons for:
- Help to analyze the results in the Quality Report
 - Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	Chym
Processed	2022-12-13 19:11:27
Camera Model Name(s)	FC6310_8.8_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.51 cm / 0.99 in
Area Covered	0.344 km ² / 34.3577 ha / 0.13 sq. mi. / 84.9437 acres
Time for Initial Processing (without report)	16m:30s

Quality Check

Images	median of 68085 keypoints per image	✓
Dataset	330 out of 334 images calibrated (98%), all images enabled	✓
Camera Optimization	0.24% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 21277.9 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

Preview

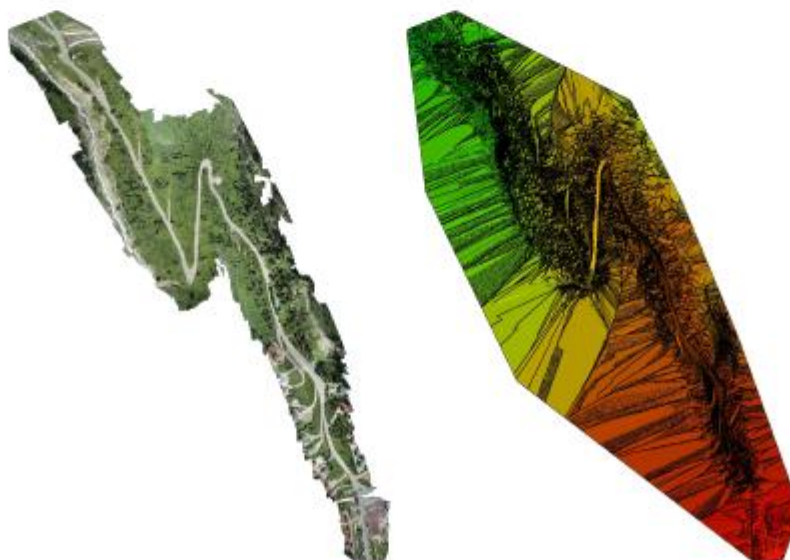


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Приложение И

Полученный отчет по обработке в программном обеспечении Pix4D

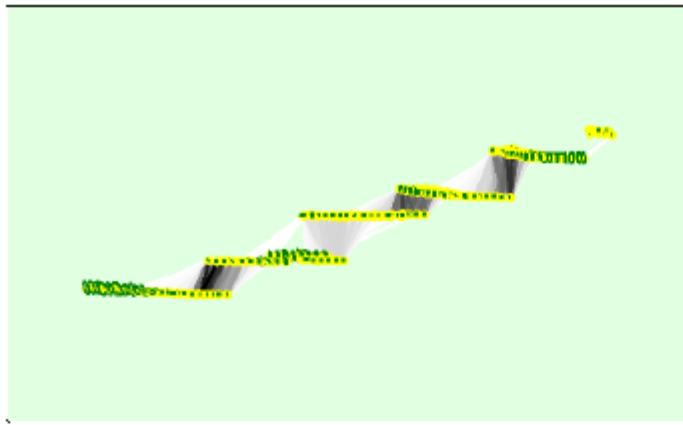


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.019	0.022	0.030	0.011	0.017	0.005
Sigma	0.008	0.009	0.020	0.005	0.004	0.001

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.61
-9.00	-6.00	0.00	0.00	2.73
-6.00	-3.00	0.00	0.00	15.45
-3.00	0.00	51.82	59.39	29.39
0.00	3.00	48.18	40.61	33.03
3.00	6.00	0.00	0.00	18.48
6.00	9.00	0.00	0.00	0.30
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.007935	0.003608	0.002575
Sigma [m]		0.467975	0.610905	3.202942
RMS Error [m]		0.468042	0.610916	3.202943

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.