МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт естественных наук
Кафедра географии, картографии и геоинформатики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

НА ТЕМУ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

Работу выполнила студентка группы ОБ-05.03.03-41
Волкова Светлана Алексеевна /_____/

Научный руководитель: к. г. н., доцент кафедры географии, картографии и геоинформатики
Григорьев Иван Иванович /_____/

Зав. кафедрой географии, картографии и геоинформатики,
к.г.н., Сидоров Валерий Петрович

_____
(решение о допуске)

_____
(подпись)

«___» _____20___г.

Ижевск - 2026 г.

ВКР УдГУ

Оглавление

Введение ... 3

Глава 1. Теоретические основы формирования цифровой модели местности ... 5

1.1. Цифровые модели местности: понятие, классификация и область применения ... 5

1.2. Фотограмметрический метод получения цифровой модели местности 9

1.3. Метод лазерного сканирования получения цифровой модели местности ... 11

Глава 2. Оборудование и программное обеспечение ... 15

2.1. Радиоуправляемый квадрокоптер Autel Evo 2 Pro ... 15

2.2. Лазерный сканер EFT ESL1 ... 17

2.3. Программное обеспечение Agisoft Metashape Professional ... 19

2.4. ТИМ КРЕДО 3D СКАН ... 21

2.5. ТИМ КРЕДО ТОПОГРАФИЯ ... 23

Глава 3. Обработка данных и создание цифровых моделей местности ... 26

3.1. Обработка данных аэрофотосъемки ... 26

3.1.1. Фотограмметрическая обработка и создание ортофотоплана ... 26

3.1.2. Создание цифровой модели рельефа и векторизация ситуации ... 28

3.2. Обработка данных мобильного лазерного сканирования ... 30

3.2.1. Полевой этап и первичная обработках данных МЛС ... 30

3.2.2. Построение цифровой модели рельефа ... 31

3.2.3. Создание цифровой модели местности ... 34

Глава 4. Сравнительный анализ современных методов пространственных данных ... 37

4.1. Оценка сходимости высотных отметок: ГНСС, мобильный лазерный сканер, беспилотный летательный аппарат ... 37

4.2. Оценка качества оцифровки: облако точек и ортофотоплан с БПЛА 39

4.3. Оценка планового положения объектов ... 40

Заключение ... 44

Список литературы ... 46

Приложения ... 49

ВКР УлГУ

Введение

Создание цифровой модели местности является важной задачей во многих областях, начиная от планирования инфраструктурных проектов и заканчивая мониторингом окружающей среды.

Долгое время основу создания цифровых моделей местности составляли традиционные геодезические методы — тахеометрическая съёмка и нивелирование. Эти методы обладают проверенной точностью и хорошо регламентированы нормативными документами. Однако они имеют существенные недостатки: низкая производительность (не более нескольких гектаров или нескольких километров в день), сложность выполнения работ в труднодоступных местах, а также субъективность и дискретность сбора данных (отдельные точки вместо сплошного покрытия). В результате классические методы становятся неэффективными для больших территорий (свыше 50–100 га) или при необходимости высокой детализации (1–2 метра).

Именно эти ограничения привели к активному внедрению современных технологий в геодезическую практику. За последние десятилетия широкое распространение получили:

- **беспилотные летательные аппараты (БПЛА)** с возможностью фотограмметрической обработки, позволяющие строить ЦММ и ортофотопланы с разрешением 2–5 см при минимальных затратах на полевые работы;
- **мобильное лазерное сканирование (МЛС)**, обеспечивающее получение плотных трёхмерных облаков точек с производительностью до сотен гектаров в день и точностью 1–6 см.

Новые технологии не просто ускоряют процесс — они меняют сам подход к сбору данных. Вместо отдельных точек специалист получает полное цифровое описание поверхности, позволяющее создавать ЦММ с высокой детализацией, недостижимой для классических методов. Именно поэтому изучение современных методов создания цифровых моделей местности является актуальной задачей.

ВКР УлГУ

Однако широкое распространение современных технологий порождает проблему выбора: какой метод или их комбинация обеспечивают оптимальное соотношение точности, производительности для конкретных условий съёмки. Особенно остро этот вопрос стоит при работе на различных типах местности — от открытых равнинных участков до территорий со сложным рельефом и густой растительностью.

Целью работы является проведение сравнительного анализа современных методов создания цифровых моделей местности — мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъёмки с беспилотного летательного аппарата — с использованием эталонных ГНСС-измерений по точности высотных отметок, плановому положению объектов и качеству оцифровки.

Достижение указанной цели осуществляется путём решения следующих **основных задач**:

1. Выполнить обзор и классификацию современных методов создания цифровых моделей местности.
2. Провести съёмку участка методами мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъёмкой с квадрокоптера.
3. Выполнить обработку данных мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъёмки.
4. Построить цифровые модели местности для каждого метода.
5. Произвести сравнительный анализ полученных ЦММ с эталонными ГНСС-измерениями по высотным отметкам и плановому положению объектов.

Объект исследования — процесс создания цифровых моделей местности с использованием современных методов (мобильное лазерное сканирование и аэрофотосъёмка с беспилотного летательного аппарата).

Предмет исследования — точность высотных отметок и качество оцифровки объектов при создании цифровых моделей местности различными методами в сравнении с эталонными ГНСС-измерениями.

ВКР УдГУ

Глава 1. Теоретические основы формирования цифровой модели местности

1.1. Цифровые модели местности: понятие, классификация и область применения

Цифровая модель местности (ЦММ) – это совокупность данных, таких как плановые координаты и высоты, о множестве ее точек. ЦММ может быть представлена в двухмерном и трехмерном пространстве. Главная особенность ее заключается в том, что она имеет структуру, которая образована в виде упорядоченного множества точек и чисел цифровой модели местности, совокупности взаимосвязанных точек и элементов. ЦММ бывает гибридная, растровая и векторная [26].

Возникновение идеи отображения явлений и процессов в цифровом виде произошло относительно недавно, около 40 лет назад. Наибольшее развитие этой сферы началось уже 1970-ые годы, в морских навигационных системах и других военных программах. Первооткрывателями в области переноса традиционных топографических материалов в цифровой вид были такие страны как: США, Германия, Канада и Франция.

Таким образом, цели создания цифровых моделей местности расширились на многие направления жизнедеятельности. Обобщенно цель создания ЦММ – графическая передача пространственной, координатной и семантической информации об объектах на местности, а также о её рельефе. Основываясь на ЦММ, можно сделать анализ территории, для проведения на ней дальнейших работ различного характера.

Применение ЦММ позволяет усовершенствовать топографические планы в различных масштабах, а также их обновление и производство; упрощать инженерные расчеты и дальнейшее проектирование по ним.

Точность ЦММ должна соответствовать точности топографического плана соответствующего масштаба. При построении и изменении цифровой модели местности точность исходной информации сохраняется для

ВКР УлГУ

дальнейшего использования ЦММ при создании планов различных масштабов.

ЦММ должна быть построена так, чтобы в ней были выделены следующие независимые модели:

- рельефа местности;
- коммуникаций;
- зданий и сооружений;
- гидрографии;
- почвенно-растительного покрова.

Комплекс алгоритмов построения цифровых моделей местности должен обеспечивать изменение моделей в заданный масштаб и точное совмещение фрагментов ЦММ.

Процесс обработки данных включает в себя несколько общих этапов:

1. первичная обработка (предварительная обработка данных, сбор информации с полевых устройств, скачка данных в соответствующий софт);
2. создание единой модели данных (сшитое облако точек, ортофотоплан);
3. подготовка по полевым данным оформленных материалов;
4. досъемка (полевое дешифрирование) [25].

В методике создания ЦММ применяются разнообразные программные продукты. Среди наиболее известных: Autodesk Civil 3d, КРЕДО, Agisoft PhotoScan.

На данный момент, цифровая модель местности является одним из главных преимуществ в геоинформационных технологиях. ЦММ – это совершенно новый способ хранения геодезических данных. Благодаря цифровой модели местности, с легкостью можно составлять данные для кадастровых, градостроительных и множество других систем; использовать ее расчеты для построения карт и планов; производить работы по проектированию, строительству и мониторингу состояния объектов и местности [4].

ВКР УлГУ

Для формирования ЦММ используют методы и средства, обеспечивающие создание таких пространственных данных, которые обеспечивают соответствие модели требованиям настоящего стандарта.

Предпочтительными методами и средствами являются:

- цифровая фотограмметрическая обработка материалов аэросъемки и космической съемки;
- цифровая обработка материалов наземной автоматизированной топографической съемки;
- цифрование картографических материалов;
- автоматизированная генерализация топографической информации для создания ЦММ мелких масштабов из ЦММ более крупных масштабов [2].

При создании ЦММ методом цифрования следует учитывать, что в общем случае точность модели будет ниже точности исходного материала. Поэтому наиболее перспективное применение метода цифрования сопряжено с созданием ЦММ более мелких масштабов, чем масштаб исходных данных.

В зависимости от целей, совокупность данных может быть представлена в формате:

1. Цифровой модели рельефа (ЦМР). Содержит информацию о рельефе территории. Она представлена набором точек с известными координатами, высотами. Также отображаются связи между ними, способы определения высот новых точек по заданным плановым отметкам (рис.1).

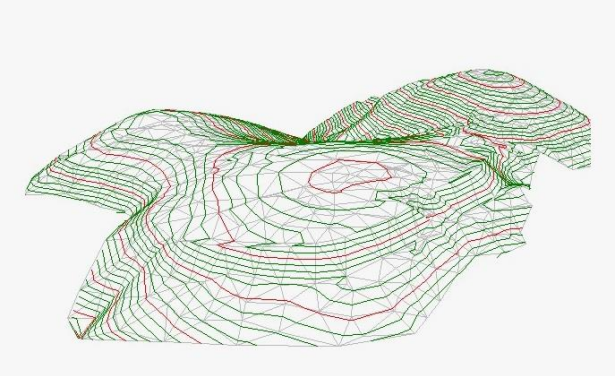


Рис.1. Цифровая модель рельефа

ВКР УлГУ

2. Цифровой модели ситуации (ЦМС). Отображает объекты, расположенные на территории: здания, сооружения, коммуникации (рис. 2).

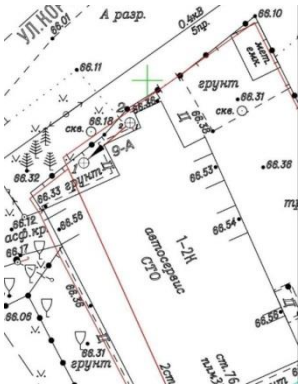


Рис. 2. Цифровая модель ситуации

3. Цифровая модель местности (ЦММ) – цифровая модель местности (ЦММ) включает в себя и цифровую модель рельефа, и цифровую модель ситуации (рис. 3).

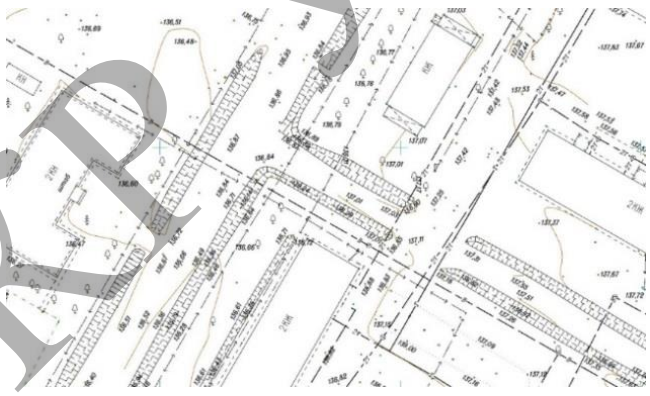


Рис. 3. Цифровая модель местности

Таким образом, цифровая модель местности:

- представляет собой упорядоченную по определенным правилам информацию об объектах местности;
- обладает рядом свойств: точность, адекватность, однозначность;
- характеризуется набором параметров;
- создается путем сбора и преобразования топографической информации по определенным математическим правилам.

ВКР УлГУ

1.2. Фотограмметрический метод получения цифровой модели местности

Научная дисциплина и область техники, предметом которой является получение геометрической и семантической информации об объектах фотограмметрической съемки по их фотограмметрическим снимкам [3]. В контексте получения цифровых моделей местности фотограмметрический метод основан на восстановлении трёхмерных координат точек земной поверхности по перекрывающимся снимкам, образующим стереопару или серию снимков. Физической основой метода является принцип центральной проекции, при котором каждая точка местности отображается на снимке в виде луча, проходящего через оптический центр камеры. Математическая модель базируется на уравнении коллинеарности, связывающем координаты точки на снимке, координаты соответствующей точки объекта и элементы внутреннего и внешнего ориентирования камеры.

Ключевым условием успешной фотограмметрической обработки является наличие продольного перекрытия между соседними снимками на уровне 60–80 % и поперечного перекрытия в 20–30 %. Такое перекрытие обеспечивает наблюдение одной и той же точки местности с разных точек съёмки, что позволяет методом пространственной триангуляции вычислить её трёхмерные координаты. Чем больше количество снимков, на которых видна одна и та же точка, тем выше надёжность и точность её пространственного определения [7].

В зависимости от носителя съемочной системы выделяют следующие виды:

1. **Аэрофотограмметрия (воздушная)** — съемка с борта самолёта, вертолёта или беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Наиболее распространённый метод получения ЦММ на обширные территории (от нескольких км² до тысяч км²). Обеспечивает пространственное разрешение от 3 до 30 см/пиксель в зависимости от высоты полёта (рис. 4).

ВКР УлГУ



Рис. 4. Воздушная фотограмметрия

2. **Наземная (ближняя) фотограмметрия** — съемка ведётся с земной поверхности с использованием штатива или портативной камеры. Применяется для детальной реконструкции фасадов зданий, инженерных сооружений, карьеров, археологических объектов (рис. 5).



Рис. 5. Наземная фотограмметрия

3. **Космическая фотограмметрия** — обработка снимков со спутников (GeoEye, WorldView, Sentinel-2). Используется для регионального картографирования и мониторинга крупных геосистем, но уступает аэрометоду по детальности (рис. 6).

ВКР ЯГТУ

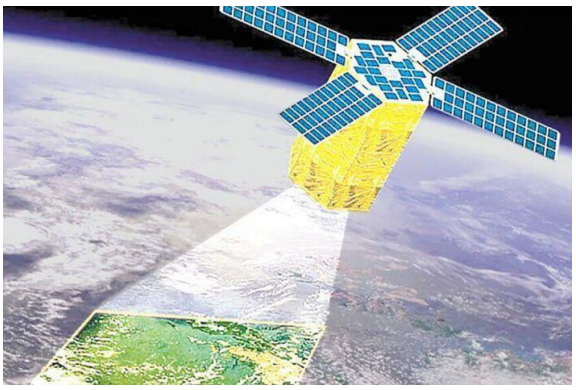


Рис. 6. Космическая фотограмметрия

Для целей, ориентированной на локальные объекты (участок местности, строительная площадка, карьер), наиболее актуален метод с использованием БПЛА, сочетающий высокую детальность, мобильность и оперативность.

Фотограмметрический метод получения цифровых моделей местности нашёл широкое применение в различных геодезических и строительных задачах. В инженерно-геодезических изысканиях он используется для создания топографических планов масштаба 1:500 – 1:2000 на участках площадью до 5–10 квадратных километров. При подсчёте объёмов грунта на карьерах, отвалах и строительных котлованах метод обеспечивает погрешность в пределах 2–5 %. Для мониторинга оползней и эрозионных процессов применяется повторная съёмка, позволяющая выявлять смещения и деформации земной поверхности. При кадастровых работах ортофотопланы используются для определения границ земельных участков.

ВКР УлГУ

1.3. Метод лазерного сканирования получения цифровой модели местности

Лазерное сканирование — это метод измерения, основанный на использовании лазера для создания трёхмерной модели объекта или территории.

Процесс лазерного сканирования в геодезии начинается с установки лазерного сканера на определенном участке местности. Сканер, оснащенный лазерной технологией, отправляет световые лучи, которые отражаются от

объектов и возвращаются обратно. Отраженные сигналы фиксируются сканером, который измеряет время, за которое луч возвращается, что позволяет определить расстояние до объектов с высокой точностью. В результате проводимых высокоскоростных измерений формируется облако точек с фиксацией пространственных координат, на основе которого строится трехмерная модель объекта (так называемое *«облако точек»)* [21].

Полученные данные передаются в компьютер, где специализированное программное обеспечение обрабатывает их и преобразует в цифровые трехмерные модели местности или объектов. Построенные модели показывают детализированную и точную картину замеряемой области, включая все мелкие неровности и особенности поверхности.

Такой процесс сканирования обеспечивает не только точность, но и значительно ускоряет сбор геодезических данных по сравнению с традиционными методами. Он позволяет работать в разных условиях и на разнообразных объектах, от открытых площадей до густо застроенных территорий, что делает его незаменимым инструментом в современной геодезии.

В геодезии лазерное сканирование разделяется на несколько основных типов, каждый из которых применяется в зависимости от специфических требований, задач и особенностей местности. Лазерное сканирование бывает:

- *Наземное.* Используется стационарная или переносная лазерная система, установленная непосредственно на земле. Метод идеален для детального изучения строений, сооружений и небольших территорий (рис.7).



Рис.7. Наземное лазерное сканирование

ВКР УлГУ

- *Воздушное.* Сканирование проводится с воздуха, используя дроны или летательные аппараты, оснащенные сканерами. Этот вид подходит для обширных территорий и труднодоступных мест (рис.8)



Рис.8. Воздушное лазерное сканирование

- *Мобильное.* Сканирование выполняется с помощью установленных на транспортные средства сканеров, позволяя собирать данные на больших территориях в движении. Это эффективно для дорог, мостов и прочих инфраструктурных объектов (рис. 9). Также существуют бюджетные сканеры (лидары) для ручной съемки.



Рис.9. Мобильное лазерное сканирование

В отличие от статического наземного сканирования или аэрофотограмметрии, мобильное сканирование невозможно без детальной подготовки маршрута, размещения опорных маркеров и их геодезической привязки на местности. Пропуск или небрежное выполнение любого из этих

ВКР УлГУ

полевых действий ведёт к неконтролируемому накоплению ошибок на последующих этапах либо делает обработку принципиально невозможной.

Каждый из этих методов выбирается в зависимости от специфики задания. Наземный метод часто используется для точной работы внутри зданий или на строительных площадках, где требуется высокая точность. Воздушный и мобильный виды обеспечивают большую область покрытия и подходят для крупномасштабных проектов, таких как создание топографических карт или планирование новых строительных объектов [18].

Результаты лазерного сканирования предоставляют большой массив данных, который можно использовать в разных областях. Полученные данные включают в себя подробные трехмерные модели объектов и территорий, что делает их незаменимыми для множества профессиональных задач. Основные результаты, которые предоставляет лазерное сканирование:

- трехмерные модели зданий;
- топографические карты;
- сечения и профили;
- обмерные чертежи;
- цифровые модели местности;
- цифровые модели рельефа [6].

Перечисленные результаты могут быть применены для разработки детальных проектных документаций, планирования строительных работ, мониторинга состояния инфраструктурных объектов и многого другого. Детализация данных позволяет специалистам проводить тщательный анализ и оптимизацию проектов, что способствует повышению их эффективности и снижению возможных рисков.

Технология находит применение во многих областях, включая картографию, строительство, археологию и градостроительство и позволяет получать точные данные о форме, размерах сканируемых объектов. Это существенно упрощает планирование и проектирование.

ВКР УлГУ

Глава 2. Оборудование и программное обеспечение

2.1. Радиоуправляемый квадрокоптер Autel Evo 2 Pro

Autel EVO II Pro V3 — это складной квадрокоптер профессионального класса, предназначенный для аэрофотосъемки, мониторинга территорий и решения задач, требующих высокого качества получаемых изображений и автономности (рис.10).



Рис.10. Autel EVO II Pro V3

Ключевой особенностью Autel EVO II Pro является встроенная камера с 1-дюймовым CMOS-сенсором разрешением 20 Мпикс. Объектив имеет фиксированное фокусное расстояние (28 мм в 35-мм эквиваленте) и регулируемую диафрагму в диапазоне f/2.8 – f/11, что позволяет адаптировать глубину резкости и экспозицию в зависимости от условий освещения без использования сменных светофильтров.

Устройство поддерживает видеозапись в форматах:

- 6K (5760×3240) при 30 fps;
- 4K HDR при 60 fps;
- Full HD (1920×1080) при 120 fps [17].

Фотосъёмка возможна в форматах JPEG и DNG (12-бит RAW), что обеспечивает широкие возможности для последующей постобработки.

Управление квадрокоптером осуществляется с помощью радиопультов, работающих на частоте 2,4 ГГц по протоколу SkyLink 2.0. Система обеспечивает:

- низкую задержку видео (менее 200 мс);

ВКР УлГУ

- автоматическое переключение между частотными каналами для помехоустойчивости;
- возможность одновременного использования нескольких пультов (режим «учитель-ученик»).

Навигационная подсистема использует комбинацию данных спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) и инерциальных датчиков, что позволяет аппарату удерживать позицию с погрешностью не более ±0,5 м в вертикальной и ±1,5 м в горизонтальной плоскости.

Для автоматизации рабочих процессов в Autel EVO II Pro реализованы следующие интеллектуальные функции:

- Dynamic Track 2.0 – автоматическое слежение за движущимся объектом (человек, транспортное средство, животное) с облётом препятствий;
- Hyperlapse – создание замедленных или таймлапс-видео в полёте;
- Orbit – круговой облёт заданной точки;
- Waypoint – автономный пролёт по заранее запрограммированным координатам;
- Viewpoint – запоминание положения камеры для повторения однотипных кадров.

Аппарат оснащён сменным литий-полимерным аккумулятором (LiPo 4S) ёмкостью 7100 мА·ч. Номинальное напряжение – 15,2 В, максимальное – 16,8 В. Полная зарядка аккумулятора от штатного зарядного устройства занимает 90 минут. Контроллер батареи автоматически отслеживает температуру, ток и напряжение, предотвращая перегрев и глубокий разряд.

Система обнаружения препятствий с углом обзора 360° включает 12 визуальных сенсоров, ультразвуковые датчики и инерциальные измерительные модули (IMU). Это позволяет дрону автоматически снижать скорость, зависать или облетать препятствия как в автоматическом, так и в полуавтоматическом режимах.

Ограничения эксплуатации:

ВКР УдГУ

- температура окружающей среды: от 0 до +40 °C;
- отсутствие осадков (конструкция не является герметичной);
- уровень радиошума в диапазоне 2,4 ГГц не выше допустимых значений.

2.2. Лазерный сканер EFT ESL1

EFT ESL1 — это мобильный лазерный сканер, работающий по технологии SLAM (одновременная локализация и картографирование) (рис.11).



Рис.11. EFT ESL1

Конструктивно прибор состоит из следующих основных модулей:

- лазерного дальномера с вращающейся головкой (обеспечивает круговой обзор 360°);
- трёх фотограмметрических камер с глобальным затвором;
- инерциального измерительного блока (IMU);
- встроенного ГНСС-приёмника с поддержкой RTK (Real Time Kinematic);
- сенсорного дисплея для контроля процесса съёмки;
- съёмной ручки-аккумулятора [20].

Корпус устройства имеет степень защиты IP65, что допускает его эксплуатацию в запылённой среде и под дождём. Работоспособность сохраняется в диапазоне температур от –30°C до +55°C, что делает сканер пригодным для использования в различных климатических условиях.

ВКР УдГУ

В ходе полевых работ сканер может функционировать в двух основных режимах:

1. SLAM-режим — используется при съёмке замкнутых пространств (помещения, тоннели, подземные переходы), а также территорий с плотной застройкой или лесным покровом, где сигнал ГНСС отсутствует или нестабилен. В этом режиме позиционирование осуществляется только за счёт алгоритмов SLAM и показаний инерциальных датчиков.

2. RTK-режим — применяется на открытых участках местности. Сканер получает поправки от базовой станции или через сети сотовой связи (поддерживается установка SIM-карты и работа в сетях 4G). В этом режиме достигается максимальная абсолютная точность привязки облака точек к системе координат.

При потере сигнала ГНСС во время RTK-съёмки прибор автоматически переходит на SLAM-алгоритмы и сохраняет допустимую точность на дистанции до 100 метров или в течение 5 минут до восстановления спутникового сигнала.

Управление сканером осуществляется через встроенный сенсорный дисплей. В реальном времени оператор видит формируемое облако точек и может контролировать полноту покрытия снимаемой поверхности. При обнаружении пропусков («дыр» в данных) возможна досъёмка непосредственно на объекте, что исключает необходимость повторных выездов.

К достоинствам прибора следует отнести:

- высокую мобильность и малый вес;
- возможность съёмки без ГНСС;
- оперативный контроль качества в полевых условиях;
- защищённость от внешних воздействий;
- простоту освоения и управления.

Ограничением является чувствительность к полностью зеркальным, блестящим или абсолютно чёрным поверхностям, которые снижают

ВКР УлГУ

дальность и точность лазерных измерений. В таких случаях рекомендовано применение матирующих аэрозолей.

EFT ESL1 идеально подходит для различных сфер применение: от сельского хозяйства до геодезии и инженерные изыскание.

После завершения полевых работ выполняется обработка данных в специализированном программном обеспечении EFT LiDAR, поставляемом в комплекте с прибором.

Программа EFT LiDAR позволяет выполнить классификацию облака точек – найти рельефные точки, шумы выше/ниже рельефа, изолированные точки, а также произвести ручную классификацию.

При работе с большим количеством заданий предусмотрена возможность совмещения облаков точек с помощью ICP регистрации или по общим контрольным точкам.

2.3. Программное обеспечение Agisoft Metashape Professional

Agisoft Metashape Professional — это профессиональное программное обеспечение для фотограмметрической обработки изображений. Оно предназначено для преобразования цифровых фотографий (в том числе полученных с БПЛА, наземных камер, спутников) в геопривязанные 3D-модели, ортофотопланы, цифровые модели местности (ЦММ/ЦМР) и облака точек с метрологической точностью [13].

Программа реализует полный цикл фотограмметрической обработки:

- Выравнивание снимков (Align Photos) — определение взаимного положения камер и построение разреженного облака точек.
- Построение облака точек (Build Dense Cloud) — создание плотного, детализированного облака точек на основе стереопар.
- Построение модели (Build Mesh) — генерация полигональной 3D-сетки (полигональной модели) по облаку точек или по данным глубины.

ВКР УдГУ

- Построение текстуры (Build Texture) — наложение исходных изображений на полигональную модель для получения фотореалистичного вида.
- Построение ЦМР (Build DEM/DSM) — создание цифровой модели рельефа (поверхности земли) или цифровой модели местности (включая объекты).
- Построение ортофотоплана (Build Orthomosaic) — создание геометрически исправленного, геопривязанного фотоизображения местности.

Ключевой функционал

1. Работа с геопространственными данными

- Поддержка систем координат (UTM, Gauss-Kruger, местные системы).
- Привязка по наземным контрольным точкам (GCP) с возможностью автоматического обнаружения кодированных маркеров.
- Импорт данных с GNSS/RTK/PPK (журналов полета, файлов навигации).
- Экспорт результатов в стандартные ГИС-форматы: GeoTIFF, KML/KMZ, Shapefile, DXF, LAS/LAZ и др.

2. Обработка данных с различных сенсоров

- Мультиспектральные камеры: обработка изображений в диапазонах RGB, Red Edge, Near-infrared (NIR), тепловизионных. Расчет вегетационных индексов (NDVI, NDRE, SAVI и др.) прямо в интерфейсе или через скрипты.
- LiDAR: импорт, визуализация, фильтрация и классификация облаков точек (земля, растительность, здания, провода). Совмещение лидарных данных с фотограмметрическими облаками.
- Тепловизоры: построение термальных ортофотопланов и 3D-моделей с температурной шкалой.
- Спутниковые снимки: поддержка RPC (Rational Polynomial Coefficients) для обработки спутниковых снимков высокого разрешения.

ВКР УлГУ

3. Аналитические и измерительные инструменты

- Прямые измерения расстояний, площадей, объемов (выемка/насыпь) по модели или ортофотоплану.
- Стереорежим: векторизация объектов (зданий, дорог, ЛЭП) в стереопаре с использованием 3D-мыши.
- Построение профилей и поперечников по ЦМР.
- Автоматическое построение линий электропередач (ЛЭП) с учетом реального провисания проводов.

Сферы применения:

- Геодезия и картография (построение ортофотопланов)
- Строительство (мониторинг хода работ, подсчет объемов грунта, контроль осадки)
- Инфраструктура (инспекция ЛЭП, дорог, мостов, трубопроводов)
- Горное дело (подсчет запасов карьеров и отвалов)
- Промышленный дизайн и реверс-инжиниринг (оцифровка промышленных объектов)
- Мониторинг чрезвычайных ситуаций (быстрое получение карт после наводнений, оползней, пожаров) [16]
-

2.4. ТИМ КРЕДО 3D СКАН

ТИМ КРЕДО 3D СКАН позволяет автоматизировать процесс обработки данных фотограмметрических и лазерных облаков точек для создания цифровой модели местности: модель рельефа и ситуации, предназначенные для решения различных прикладных инженерных задач. Имеющаяся функциональная возможность автоматического распознавания ситуации и рельефа, позволяет существенно сократить временные затраты, в первую очередь на обработку фотограмметрических и лазерных облаков точек [14].

Уникальность ТИМ КРЕДО 3D СКАН в том, что технологии ТИМ КРЕДО позволяют совместно с облаками точек использовать растры и

ВКР УлГУ

ортофотопланы, векторные данные и данные инструментальных съемок, информацию, полученную из ГИС, 3D модели, а также фотоизображения как панорамные, так и простые снимки. Для улучшения визуализации можно использовать WEB-ресурсы. Обеспечена возможность преобразования данных в ТИМ КРЕДО 3D СКАН между системами координат, как локальных (прямоугольных), так и из базы данных EPSG в любом представлении.

Программа ТИМ КРЕДО 3D СКАН решает следующие задачи:

- Импорт и экспорт облаков точек в форматах E57, LAS, LAZ, а также текстовых файлов с настраиваемым форматом.
- Визуализация облаков точек в 3D-виде, на плоскости (2D) и в вертикальных сечениях;
- Импорт и визуализация репозиционированных фотоизображений в форматах Riegl, Leica Pegasus, АГМ-МС, CHC Alpha 3D, GreenValley, Teledyne Optech, KML, E57 вместе с облаком точек;
- Трансформация облаков точек по абсолютным и относительным опорным точкам, автоматический поиск сферических марок;
- Работа с полным облаком, выбранной областью или отдельными его слоями;
- Возможность провести измерения по облакам точек в 2D, в 3D и в поперечных разрезах;
- Фильтрация облака точек по различным значениям;
- Возможность расчета нормалей для точек облака, высоты над рельефом;
- Выделение (классификация) рельефа;
- Возможность создания матрицы высот по облакам точек;
- Настраиваемое прореживание облака точек и возможность построения цифровой модели рельефа (ЦМР);

ВКР УлГУ

- Возможность автоматического распознавания точечных и линейных объектов, с последующим созданием по ним топографических элементов;
- Автоматический поиск линий электропередачи (столбы и провода), поиск дорожных знаков с геопространственной привязкой по облаку точек;
- Возможность создавать светофоры с динамическими атрибутами (секции, стрелки) по облаку точек;
- Возможность автоматического распознавания различных объектов дорожной инфраструктуры: разметки, бровок и подошв земляного полотна, кромок покрытия, бордюров, столбов дорожных знаков, сигнальных столбиков;
- Возможность создавать растровые изображения по облакам точек;
- Импорт и отображение 3D моделей в формате IFC и в популярных форматах. Измерение расстояний между узлами и ребрами 3D моделей и облаками точек в 3D окне;
- Импорт и отображение 3D триангуляционных сеток;
- Возможность расчета объемов по облакам точек;
- Создание, редактирование и экспорт в DXF/DWG чертежей сечений облака точек;
- Экспорт данных цифровой модели местности (ЦММ) или цифровой модели рельефа (ЦМР) в форматах: DXF, DWG, TopoXML (LandXML), MIF/MID и текстовых файлов с настраиваемым форматом.

2.5. ТИМ КРЕДО ТОПОГРАФИЯ

Программная система ТИМ КРЕДО ТОПОГРАФИЯ является подсистемой Программной системы ТИМ КРЕДО (Технологии Информационного Моделирования КРЕДО), которая обеспечивает создания

ВКР УлГУ

цифровой модели местности, подготовки и печати планшетов и топографических планов.

Программа импортирует данные из широкого спектра источников, включая:

- проекты КРЕДО III,
- данные с измерительных приборов,
- текстовые файлы координат (TXT, CSV),
- облака точек (LAS, TXT, CPC),
- DXF/DWG (AutoCAD),
- MIF/MID (MapInfo),
- TXF/SXF (Панорама),
- SHP/DBF (ArcGIS),
- XML (включая кадастровые данные),
- TopoXML, CredoXML, LandXML,
- OpenAI Maps/Bing Maps,
- растры (CRF, BMP, TIFF, JPEG, PNG, TMD),
- данные из программ КРЕДО (GDS, TMD, GNSS, LSC, CVD, CTP, NIV, DFS),
- CREDO_TER, CREDO_PRO, CREDO_MIX, CREDO_GEO,
- растры для текстур (BMP, PNG),
- GPX, KML, KMZ, OSM,
- данные SRTM.

Система ТИМ КРЕДО использует собственный открытый формат TopoXML, учитывающий специфические требования.

Возможности программы:

1. Формирование цифровой модели местности

ЦММ включает рельеф (ЦМР по триангуляционной сети) и ситуацию (ЦМС). Структурные линии выделяют формы рельефа, поверхности с двойным профилем моделируют бордюры, набережные и пр. Система строит

ВКР УлГУ

разрезы с наложением данных (коммуникации, геология и др.). Библиотека 3D-моделей позволяет визуализировать ЦМС в объёме [12].

2. Создание чертежей

Чертежи и планшеты создаются из редактируемой чертёжной модели. Для протяжённых объектов возможна раскладка листов. Чертежи можно распечатать или экспортировать в форматы DXF (CAD) и JPG/PDF (графические).

3. Работа с облаками точек

Программа импортирует облака точек в форматах LAS, CPC и TXT, включая данные наземного и воздушного лазерного сканирования и фотограмметрии. Импортированные облака используются для создания собственных облаков и в различных построениях. Программа способна обрабатывать более миллиарда точек [22].

Программа экспортирует данные в следующих форматах:

- IFC,
- DXF (из плана и чертежной модели),
- TopoXML, CredoXML, KML, KMZ, LandXML,
- BMP, JPEG, TIFF, PNG, CRF, PDF,
- CPPGN, CPVOL, CPDRL, CPDRW, COPLN,
- HTML, RTF, TXT (точки модели).

ВКР УлГУ

Глава 3. Обработка данных и создание цифровых моделей местности

3.1. Обработка данных аэрофотосъемки

3.1.1. Фотограмметрическая обработка и создание ортофотоплана

Работа над проектом начинается с загрузки исходных данных. Импорт снимков выполняется через меню *«Обработка – Добавить снимки»***.** При этом из метаданных автоматически загружаются координаты центров фотографирования в системе WGS-84 и высота съемки в метрах.

Основной этап первичной фотограмметрической обработки — выравнивание**.** Agisoft Metashape автоматически находит на снимках характерные (связующие) точки, сопоставляет их на разных фотографиях, восстанавливает положение и ориентацию камер (элементы внешнего ориентирования), а также уточняет параметры калибровки (элементы внутреннего ориентирования). Для запуска процесса необходимо выбрать в меню *«Обработка – Выравнивание»* и настроить параметры в появившемся окне. В результате формируется разреженное облако точек, а положения камер визуализируются в окне *«Модель» (рис. 12)*.



Рис. 12. Разреженное облако точек

Далее импортируются опорные точки. Важно убедиться в корректности систем координат модели, снимков и маркеров. В нашем случае требуется добавить систему координат Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger zone 9. Ключи

ВКР УлГУ

перехода (параметры трансформации) находятся в открытом доступе. По команде *«Преобразовать привязку»* выполняется пересчет координат в нужную систему.

Следующий этап — расстановка наземных опорных точек. Используя команду *«Отфильтровать по маркерам»***,** программа автоматически отбирает из всех снимков только те, на которых присутствует выбранная марка. Вручную перемещаем метку (флажок) в центр опознака на каждом снимке (рис.13).



Рис. 13. Расстановка наземных опорных точек

После завершения расстановки выполняется команда *«Оптимизировать камеры»*, для того чтобы модель была точнее и геометрически правильнее после расстановки опорных маркеров.

Построение плотного облака точек выполняется по команде *«Построить плотное облако»***.** Agisoft Metashape Professional позволяет отнести все точки облака к определенным стандартным классам, что расширяет возможности экспорта для разных типов объектов в рамках одного проекта.

По команде *«Классифицировать точки рельефа»* происходит автоматическое присвоение всем точкам класса «Земля» и «Низкая точка». Далее, перейдя в режим *«Модель»*, необходимо очистить облако, оставив только класс рельефа. Шумы (точки вне класса «Земля») выделяются произвольным выделением и отправляются в класс «Не назначен». После

ВКР УлГУ

очистки строится *Цифровая модель местности (ЦММ)* на основе класса *«Земля»*.

Заключительный этап в Agisoft Metashape — создание ортофотоплана. Если на ортофотоплане возникают дефекты (швы, несостыковки между кадрами), необходимо выполнить редактирование линий пореза *командой «Нарисовать заплатки»* для улучшения визуализации. Программа также позволяет корректно выделить контуры зданий, используя снимки разных ракурсов через *опцию «Назначить снимки»*. Для этого предварительно создается отдельный слой, в котором будут храниться контура зданий.

Для дальнейшей работы в программе ТОПОГРАФИЯ выполняется экспорт:

- ортофотоплан — в формате JPEG (Приложение 2);
- слой с контурами зданий — в формате DXF;
- точки рельефа (класс «Земля») — в виде текстового файла.

3.1.2. Создание цифровой модели рельефа и векторизация ситуации

Цифровая модель местности (ЦММ) состоит из двух компонентов: цифровой модели ситуации (ЦМС) и цифровой модели рельефа (ЦМР).

Полученный ортофотоплан служит основой для создания ЦМС. Цифровая модель ситуации создается с использованием точечных, площадных и линейных объектов на основе классификатора КРЕДО. Классификатор имеет иерархическую структуру и содержит информацию обо всех тематических объектах (ТО). Встроенный редактор классификатора позволяет создавать и редактировать объекты разных типов с семантическим наполнением и отображением условными знаками в соответствии с масштабом генерализации.

Для оцифровки используются следующие инструменты в окне «Построения»:

- Точка
- Графическая маска

ВКР УлГУ

- Точечный объект – для объектов, размеры которых не выражаются в масштабе (деревья, опоры ЛЭП и т.п.).
- Линейный объект – для объектов линейного характера (дороги, линии связи, ограждения). Длина отображается в масштабе.
- Площадной объект – для объектов, имеющих протяженность и ширину. Создание площадных объектов начинается с импорта контуров зданий из Agisoft Metashape (формат DXF) с последующим присвоением семантической информации. Все объекты дополняются соответствующими условными обозначениями и атрибутивными данными (рис. 14).

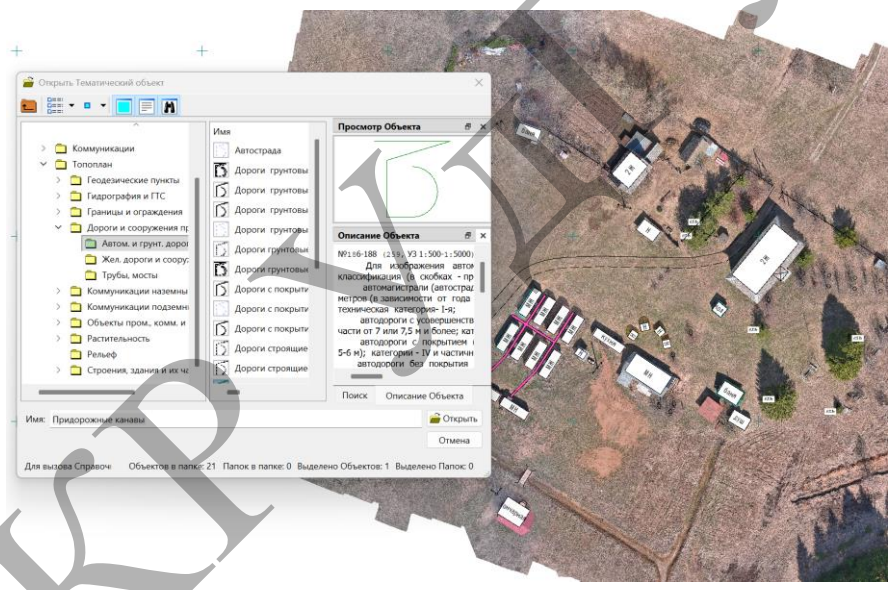


Рис. 14. Оцифровка ситуации

Завершающим этапом создания ЦМС является оформление подписей. Подписи точечных, линейных и площадных объектов, а также их материалов и условных обозначений, могут создаваться и редактироваться непосредственно в процессе построения объектов.

Для построения цифровой модели рельефа в ТОПОГРАФИЮ подгружаются отметки (точки рельефа) из экспортированного ранее текстового файла. По этим точкам выполняется триангуляция (построение нерегулярной треугольной сети TIN). Далее, используя инструменты

ВКР ВГУ

редактирования рельефа, можно выполнять сглаживание, коррекцию горизонталей, удаление ошибочных пикетов и генерацию изолиний с заданным сечением рельефа. В результате формируется полноценная ЦМР, объединяемая с ЦМС в итоговую цифровую модель местности (рис. 15).

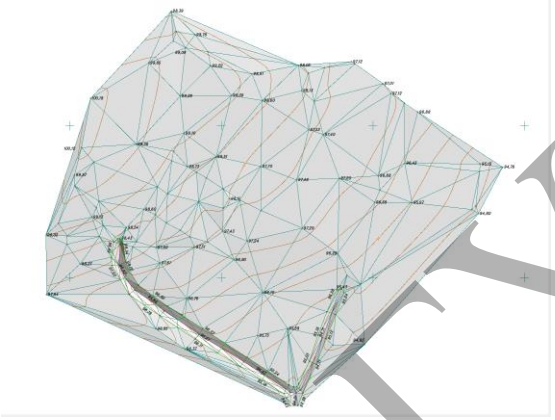


Рис. 15. Цифровая модель рельефа в ТОПОГРАФИИ

Полученная цифровая модель местности в приложении 3.

3.2. Обработка данных мобильного лазерного сканирования

3.2.1. Полевой этап и первичная обработках данных МЛС

Прежде чем перейти непосредственно к камеральной обработке облаков точек, полученных методом мобильного лазерного сканирования (МЛС), были выполнены полевые работы. Именно в поле, на самом объекте, закладывается основа качества будущей цифровой модели местности (ЦММ), и от тщательности этих работ зависит до 70–80% итоговой точности. Съемка проводилась в RTK-режиме, подключившись к базовой станции «Шаркан». Для обеспечения полного покрытия участка и исключения «слепых» зон было проложено два маршрута сканирования (приложение 1). Маршруты были проложены так, чтобы перекрытие между соседними проходами составляло не менее 30–40%, для последующей корректной сшивки.

Первичная обработка полученных полевых данных выполнялась в специализированном программном обеспечении EFT LiDAR:

ВКР УдГУ

- фильтрация шумов;
- сшивка проходов;
- привязку облака точек к заданной системе координат с использованием GNNS-данных;
- раскраску облака точек по данным фотограмметрических камер (рис. 16).

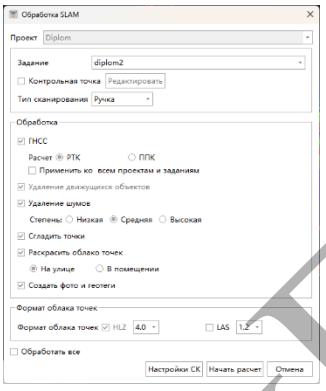


Рис. 16. Параметры обработки «сырых» данных в EFT LiDAR

После завершения первичной обработки в EFT LiDAR и получения «чистого» облака точек выполнялся этап оцифровки и построения ЦММ в программе Кредо 3D СКАН.

3.2.2. Построение цифровой модели рельефа

Создание проекта начинается с импорта облака точек в формате LAS в программу. Данный процесс позволяет гибко и удобно просматривать данные, исправлять ошибки габаритов облака и корректно интерпретировать координаты.

Приступаем к созданию ЦМР для этого используем *команду «Выделить рельеф»*, которая значительно ускоряет процесс. Она предназначена для классификации рельефа в активном облаке точек. Результатом выделения рельефа является разделение облака точек на «рельеф» и «не рельеф». После вызова команды появляется диалоговое окно с параметрами – настраиваем (рис. 17).

ВКР УлГУ

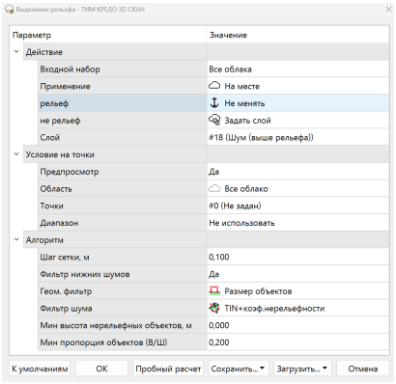


Рис. 17. Параметры для команды «Выделить рельеф»

Наиболее эффективен для плотных облаков точек с растительностью (при наличии точек на земле под растительностью), наземными коммуникациями, шумами. Строит триангуляцию, выбирая в каждой ячейке текущего шага точку с минимальной высотой.

Далее создаем матрицу высот и назначить ее моделью рельефа. Матрица высот может быть получена из рельефного облако *командой «Облако точек в DEM»*. Матрица высот является наиболее предпочтительным вариантом для операций распознавания объектов по облакам, обеспечивая наибольшую скорость получения отметки в произвольном месте.

В случае недостаточной плотности рельефного облака, полученные «дыры» в матрице высот могут быть заполнены при помощи *команды «Интерполировать DEM»* (рис. 18).

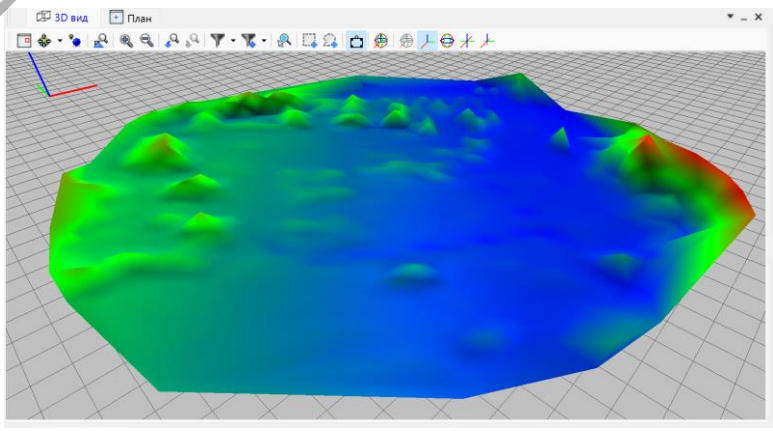


Рис. 18. Рельефное облако

ВКР УлГУ

Следующим этапом являются расчеты высот над рельефом и их появление в структуре точки данных с помощью *команды «Рассчитать высоты относительно рельефа».* В интерактивном формате просматриваем данные точек в *окне «Метаданные».*

Далее создаем облако точек с регулярным расположением точек в соответствии с матрицей высот *командой «DEM в облако точек»*.

Рельефные точки облака прореживаем для дальнейшего извлечения точек и построения триангуляционной поверхности – *команда «Прореживание»* в *окне* «*Фильтрация точек облака»*. Прореженное облако преобразовываем в точки модели, для этого используйте *команду* «*Точки облака - в модель».*

На основе точек модели создаем триангуляционную модель рельефа командой «Поверхность по облаку», для более удобной визуализации можно настроить градиент матрицы высот в *окне «Рельеф»* (рис. 19).

Полученную ЦМР экспортируем в формате TopoXML.

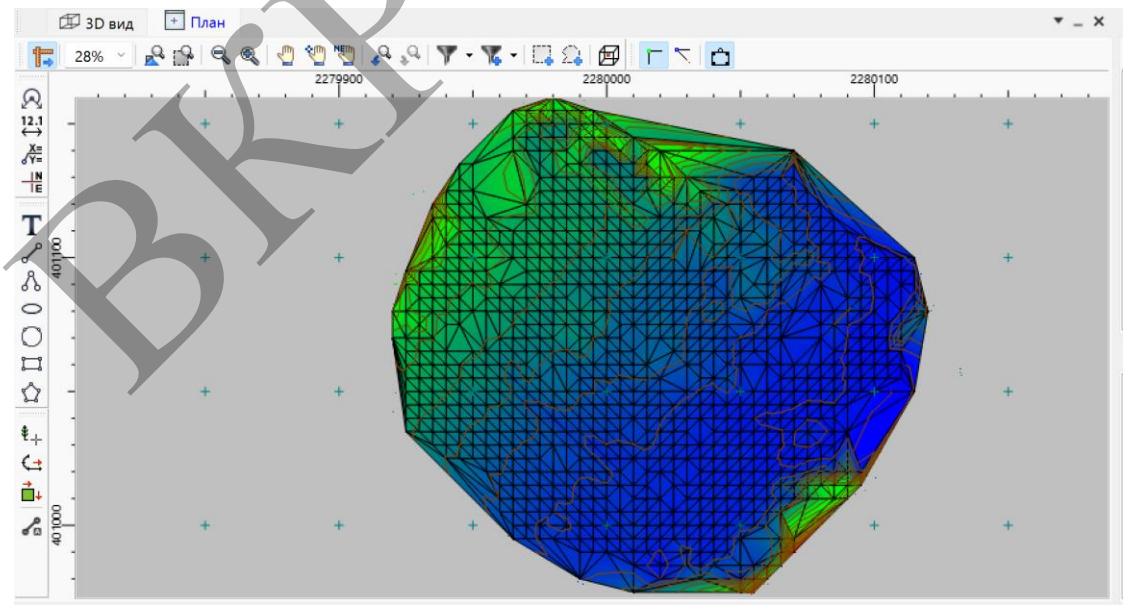


Рис. 19. Цифровая модель рельефа в 3D СКАНЕ

ВКР УлГУ

3.2.3. Создание цифровой модели местности

Для более полного восприятия «облака точек» и удобства оцифровки в условных знаках переключаемся на трехмерный вид (рис.20).

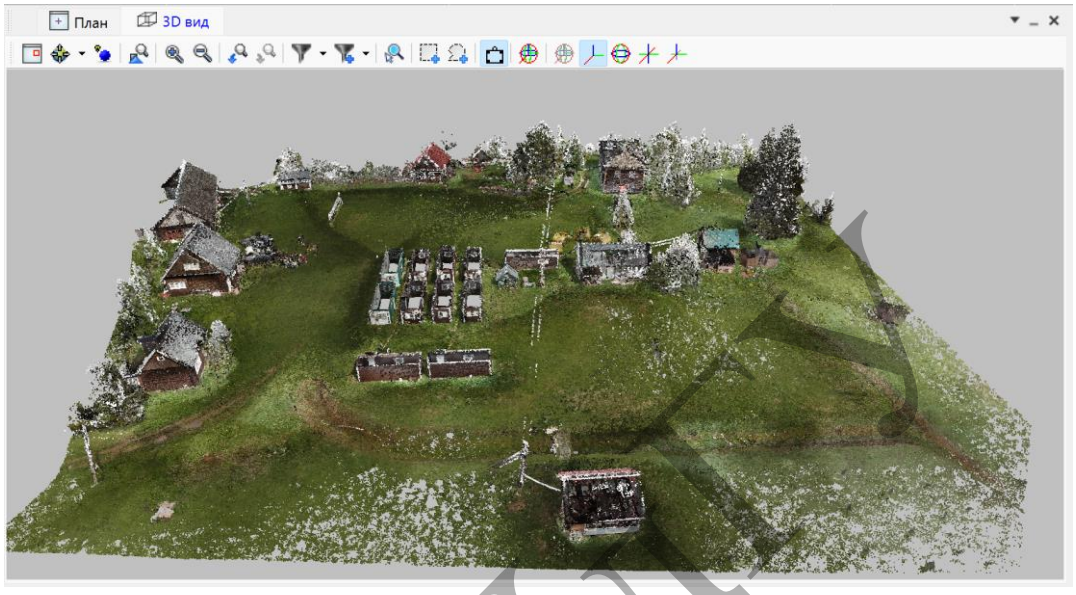


Рис. 20. Отображение облака точек в 3D виде

Создание точечных объектов осуществляется командой «Ситуация – Создать – Создать точечный объект». В появившемся окне из классификатора выбирается условных знак объекта, а в рабочей области указывается его положение.

Далее командой «Ситуация – Создать – Создать линейный объект» создаются линейные объекты. Отрисовка линейных объектов производится либо по облаку точек.

Заключительным этапом отрисовки ситуации является создание площадных объектов при помощи команды «Ситуация – Создать – Создать Площадной объект». Площадные объекты создаются по основаниям зданий (рис. 21).

ВКР УЛ

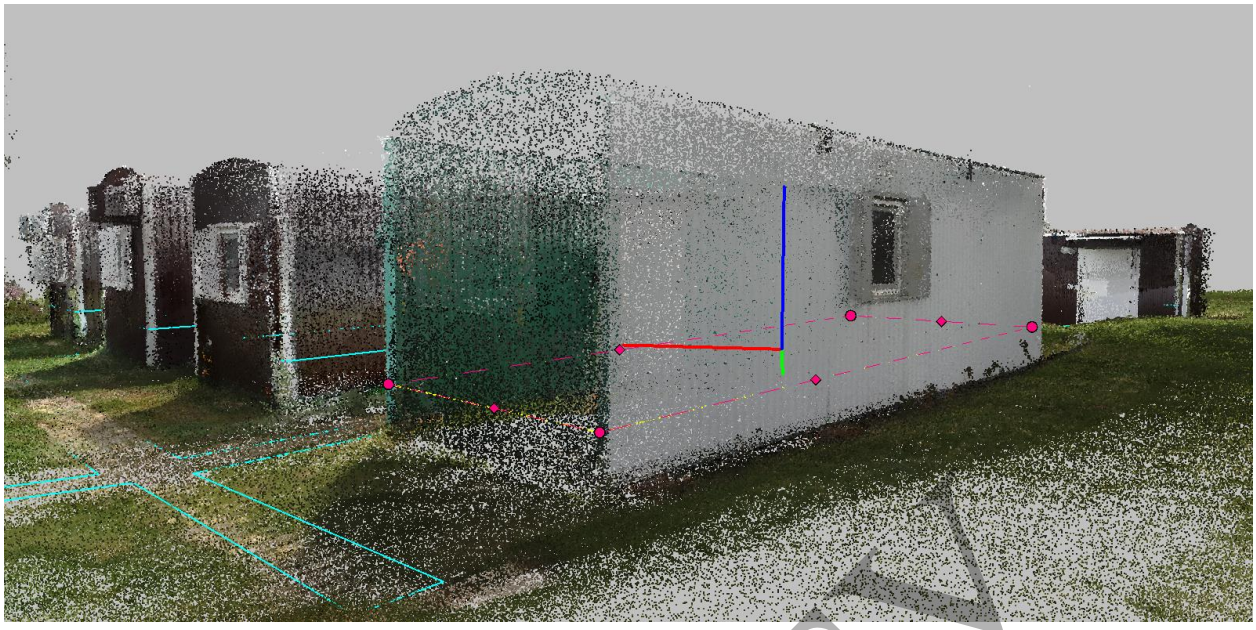


Рис. 21. Оцифровка площадного объекта в 3D виде

Условные знаки в классификаторе программы ТИМ КРЕДО 3D СКАН соответствуют общепринятым. Для детализации ситуации был выбран масштаб 1:500.

Этап оформления и объединения происходит в ТОПОГРАФИИ. Импортируем цифровые модели ситуации и рельефа в форматах ТороXML, созданные в 3D СКАНЕ.

Полученную поверхность в 3D СКАНЕ редактируем, используя команды в *окне «Поверхность»*. Они предназначены для создания и пересоздания поверхности на основе триангуляции Делоне - в заданном слое, в контуре, в области или областях отсутствия поверхности внутри созданной поверхности (в дырках), а также с учетом профиля корректной структурной линии.

Триангуляция оставляем неизменной, изменяем стили отображения поверхности на участках, выделенных с помощью групп треугольников (замена откосов горизонталями и наоборот, введение дополнительных и вспомогательных горизонталей, изменение высоты сечения рельефа). Это позволяет отобразить рельеф с учетом нормативных требований.

ВКР УлГУ

Отметки высот выбирали из слоя с точками, имеющих значения высот, полученных методом интерполяции.

Затем следует проверить и оценить качество построения поверхности и в случае, если горизонталь имеет неправильную резкую форму – исправить с помощью инструмента «Перебросить ребро». Также добавляются подписи горизонталей и бергштрихи.

Созданная цифровая модель местности представлена в приложении 4.

ВКР УДГУ

Глава 4. Сравнительный анализ современных методов пространственных данных

4.1. Оценка сходимости высотных отметок: ГНСС, мобильный лазерный сканер, беспилотный летательный аппарат

Точность сравнения высот напрямую зависит от использования единой системы координат и высот для всех трех методов сбора данных. В качестве единой системы координат использовалась МСК-18 зона 2, а в качестве единой системы высот – нормальные высоты Балтийской системы 1977 года.

Для объективной оценки точности созданных цифровых моделей местности, полученных методами МЛС и аэрофотосъемки с квадрокоптера, были использованы эталонные данные, собранные ГНСС-приемником в режиме RTK.

Для проведения сравнительного анализа были выбраны 5 характерных точек, каждая из которых представляет определенный тип поверхности. Характеристика этих точек приведена в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика эталонных точек

№ точки	Тип поверхности	Координаты	Высота, м	Примечание
Т1	Открытый грунт	X= 401109,908 Y= 2280003,246	99,01	Ровная поверхность, хорошая видимость спутников
Т2	Кирпичная плитка	X= 401063,422 Y= 2279989,590	97,84	Твердое покрытие, открытое место
Т3	Под деревом	X= 401074,624 Y= 2280062,918	95,87	Частичное закрытие неба
Т4	Угол здания	X= 401089,741 Y= 2280042,203	97,11	Контрольная точка взята на открытом месте
Т5	На откосе	X=401037,451 Y=2279979,633	96,41	Перепад высот, растительность

Для каждого типа поверхности были определены координаты точки с помощью ГНСС-приемника, после чего из цифровых моделей извлекались высотные отметки в тех же плановых координатах. Разницу между

ВКР УдГУ

эталонными значениями и полученными определялась как отклонение по формуле:

$$\Delta h = h_{\text{ЦММ}} - h_{\text{ГНСС}}$$

где:

Δh — отклонение (ошибка) в метрах;

$h_{\text{ЦММ}}$ — высота по ЦММ;

$h_{\text{ГНСС}}$— эталонная высота.

Полученные результаты сравнения высотных отметок для всех пяти точек представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты сравнения

№ точки	Тип поверхности	$h_{\text{ГНСС}}$ (эталон), м	$h_{\text{МЛС}}$, м	$\Delta h_{\text{МЛС}}$, м	$h_{\text{КОПТЕР}}$, м	$\Delta h_{\text{КОПТЕР}}$, м
Т1	Открытый грунт	99,01	99,02	0,01	99,09	0,08
Т2	Плитка	97,84	97,80	-0,04	97,93	0,09
Т3	Под деревом	95,87	95,88	0,01	95,97	0,10
Т4	Угол здания	97,11	97,12	0,01	97,20	0,09
Т5	Откос	96,41	96,42	0,01	96,49	0,08

Исходя из данных, представленных в таблице 2, мобильный лазерный сканер показал высокую степень сходимости с эталонными ГНСС-измерениями, диапазон отклонений: от -0,04 м до +0,01 м;

На четырёх из пяти точек отклонение составило +0,01 м, что находится в пределах инструментальной точности как ГНСС, так и МЛС. Единственное заметное отклонение -0,04 м зафиксировано на кирпичной плитке и может быть объяснено микрорельефом поверхности (лазер попал в углубление между плитками, тогда как веха ГНСС стояла на выступе).

Теперь рассмотрим данные, полученные с беспилотного летательного аппарата. Фотограмметрические данные показывают систематическое расхождение с эталоном, диапазон отклонений: от +0,08 м до +0,10 м;

ВКР ЧГТУ

Все отклонения имеют положительный знак — коптер систематически завышает высотные отметки относительно ГНСС.

Причины систематического завышения:

Фотограмметрический эффект — программа по снимкам немного «приподнимает» поверхность из-за мелких неровностей (камни, кочки, блики), которые она ошибочно принимает за перепады высот.

Растительность и микрорельеф — даже на открытом грунте высота растительности (до 5–8 см) фиксируется камерой, тогда как веха ГНСС приминает её.

Таким образом, для МЛС расхождения носят случайный характер (микрорельеф) и находятся в пределах шума измерений, а для ортофотоплана расхождения носят систематический характер (постоянный положительный сдвиг), что связано с физическими принципами фотограмметрии.

4.2. Оценка качества оцифровки: облако точек и ортофотоплан с БПЛА

Помимо сравнения высотных отметок, важной практической задачей является оценка пригодности каждого метода для оцифровки объектов — выделения и измерения линейных, площадных и точечных элементов местности. В сравнении используется цветное облако точек и цветной ортофотоплан, что делает их сравнение корректным и равноправным.

Хотя оба метода обладают цветовым представлением, их фундаментальные физические характеристики и методы обработки информации приводят к существенным расхождениям при решении задач оцифровки. Для наглядности эти различия сведены в таблицу 3.

Таблица 3 — Сравнение характеристик для задач оцифровки

Характеристика	Ортофотоплан (БПЛА)	Облако точек (МЛС)
Тип данных	Растровое изображение	Трехмерное облако точек
Проекция	Ортогональная (вид сверху без искажений)	Перспективная (зависит от точки съемки)
Наличие теней	Сильно влияют, особенно у зданий и под кронами	Влияют только на цвет, геометрия сохраняется

ВКР УлГУ

Работа под кронами	Практически невозможна (земля не видна)	Возможна (лазер проникает сквозь листву)
Работа с водой	Хорошо (видна береговая линия)	Плохо (вода не отражает лазер — дыры)
Тонкие объекты (провода, заборы)	Смазаны или не видны	Четко выделяются в облаке
Высокие объекты (здания)	Перспективные искажения у краев	Без искажений (истинная геометрия)

Исходя из представленных характеристик, можно определить, для каких объектов каждый из методов предпочтительнее. Ортофотоплан предпочтителен для оцифровки открытых, контрастных, цветных объектов (дороги, водоёмы, травяной покров). Облако точек незаменимо там, где важна геометрия и цвет (здания, заборы, столбы, объекты под кронами и в тени).

Также важным практическим критерием является удобство и скорость оцифровки. Ортофотоплан значительно быстрее и удобнее для обзорной оцифровки больших площадей. Цветное облако точек требует больше времени и навыков, привыкание к 3D навигации, но дает более точный результат для сложных объектов.

Оптимальным вариантом является совместное использование обоих методов: ортофотоплан с БПЛА применяется для обзорной оцифровки и идентификации объектов на открытых участках, а цветной МЛС — для точной привязки сложных объектов и детализации. Наличие цвета у обоих методов позволяет выполнять перекрёстную проверку и значительно снижает вероятность ошибок идентификации.

4.3. Оценка планового положения объектов

Оценка плановой точности является неотъемлемой частью контроля качества данных, используемых для создания цифровой модели местности (ЦММ). В рамках данной работы выполнялось сравнение планового

ВКР УлГУ

положения трёх типов объектов — точечного (опора ЛЭП), линейного (забор) и площадного (вагончик) — по данным цветного облака точек (МЛС) и ортофотоплана (БПЛА). В качестве эталонных значений использовались координаты, полученные ГНСС-приемником в режиме RTK. Оценка производилась на основе величины векторных отклонений и их влияния на достоверность создаваемой ЦММ.

Исходные данные по объектам представлены в таблицах 4,5,6.

Таблица 4

Точечный объект — опора ЛЭП (столб)

Источник данных	X, м	Y, м
ГНСС (эталон)	401108,282	2280013,513
Ортофотоплан (БПЛА)	401108,145	2280013,420
Облако точек (МЛС)	401108,284	2280013,510

Таблица 5

Линейный объект — забор

Источник данных	Начало забора		Конец забора	
ГНСС (эталон)	X1	401134,545	X2	401117,039
	Y1	2279986,227	Y2	2280010,066
Ортофотоплан (БПЛА)	X1	401134,510	X2	401116,990
	Y1	2279986,195	Y2	2280010,110
Облако точек (МЛС)	X1	401134,543	X2	401117,041
	Y1	2279986,229	Y2	2280010,064

Таблица 6

Площадной объект — вагончик

Угол	Источник данных	X, м	Y, м
1	ГНСС	401086,363	2279989,123
1	Ортофотоплан	401086,330	2279989,155
1	Облако точек	401086,365	2279989,121
2	ГНСС	401085,061	2279991,193
2	Ортофотоплан	401085,028	2279991,228
2	Облако точек	401085,059	2279991,195
3	ГНСС	401078,333	2279986,960

ВКР УлГУ

3	Ортофотоплан	401078,300	2279986,995
3	Облако точек	401078,335	2279986,958
4	ГНСС	401079,635	2279984,890
4	Ортофотоплан	401079,605	2279984,925
4	Облако точек	401079,633	2279984,892

Для наглядного представления полученных данных все результаты сравнения планового положения объектов по двум методам сведены в единую таблицу. В таблице 7 для каждого типа объекта приведены величины планового смещения, характеризующие суммарное горизонтальное расхождение между положением объекта, определённым по данным ортофотоплана и облака точек МЛС, и его эталонными ГНСС-координатами.

Плановое смещение вычислялось по формуле:

$$\Delta S = \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2)}$$

где:

ΔS— плановое смещение, м;

$\Delta X = X_{\text{МЕТОД}} - X_{\text{ГНСС}}$— отклонение по оси X, м;

$\Delta Y = Y_{\text{МЕТОД}} - Y_{\text{ГНСС}}$ — отклонение по оси Y, м.

Таблица 7

Сравнительная оценка планового положения объектов

Тип объекта	Объект	Метод	Плановое смещение (среднее), м
Точечный	Столб	Ортофотоплан	0,166
Точечный	Столб	МЛС	0,004
Линейный	Забор	Ортофотоплан	0,057
Линейный	Забор	МЛС	0,003
Площадной	Вагончик	Ортофотоплан	0,048
Площадной	Вагончик	МЛС	0,003

Исходя из данных, представленных в таблице 7, точность ортофотоплана сильно зависит от размера объекта: чем он меньше, тем ниже точность. Напротив, точность МЛС остаётся стабильной вне зависимости от

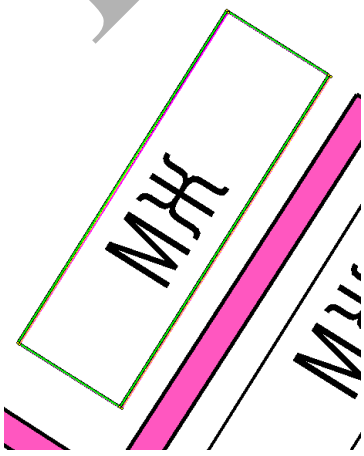
ВКРУИТУ

типа объекта, что объясняется прямым измерением пространственных координат и высокой плотностью облака точек.

Систематические плановые смещения, наблюдаемые на ортофотоплане (обусловленные пиксельной неопределённостью границ, влиянием теней и остаточными искажениями при ортотрансформировании), контрастируют с равномерным распределением ошибок МЛС, значения которых не превышают ±0,003 м. Это подтверждает высокую точность ГНСС-позиционирования, использованного в качестве эталона.

Ошибки ортофотоплана носят систематический характер: наблюдается устойчивое смещение координат, обусловленное некоторыми факторами – пиксельной неопределённостью границ, влиянием теней и остаточными искажениями при ортотрансформировании. Для МЛС ошибки носят случайный характер и не превышают ±0,003 м, что обусловлено непосредственным измерением пространственных координат, высокой плотностью облака точек и независимостью от внешних условий.

Таким образом, ортофотоплан подходит для общей оцифровки крупных объектов на открытых пространствах, где допустима погрешность в несколько сантиметров. Однако для задач, требующих высокой плановой точности, особенно при работе с мелкими точечными и линейными объектами, а также в сложных условиях (тени, перепады высот, застройка), предпочтительнее использовать МЛС, который гарантирует сантиметровую точность и высокую достоверность получаемых данных.



ВКР УлГУ

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведён сравнительный анализ современных методов создания цифровых моделей местности (мобильное лазерное сканирование и аэрофотосъёмка с беспилотного летательного аппарата) с использованием эталонных ГНСС-измерений по точности высотных отметок и качеству оцифровки объектов.

Для анализа были взяты характерные точки исследуемой местности: открытый грунт, твёрдое покрытие, участок под кроной дерева, угол здания и откос. Выполнялась обработка данных мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъёмки. По результатам обработки построены цифровые модели местности для каждого метода. Все данные приведены к единой системе координат МСК-18 зона 2 и нормальным высотам Балтийской системы 1977 года.

Анализ высотных отметок показал высокую точность мобильного лазерного сканера с эталонными ГНСС-измерениями. Данные аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата показали стабильное систематическое завышение высотных отметок относительно эталона.

При оценке качества оцифровки, что ортофотоплан подходит для быстрой обзорной оцифровки открытых территорий с чёткими границами (дороги, водоёмы, травяной покров). Мобильное лазерное сканирование незаменим для задач, требующих высокую точность, при работе со сложными объектами (высокие здания, заборы, столбы), а также в условиях плотной застройки, теней и под кронами деревьев. Наличие цвета у обоих методов позволяет выполнять перекрёстную проверку, снижая вероятность ошибок идентификации.

При оценке планового положения объектов установлено, что ошибки ортофотоплана носят систематический характер и зависят от размера объекта: векторное отклонение для столба составило 0,166 м, для забора — 0,057 м, для вагончика — 0,048 м. Ошибки МЛС, напротив, носят случайный

ВКР УлГУ

характер и не превышают ±0,003 м для всех типов объектов, что в 15–41 раз точнее ортофотоплана.

Практическая ценность работы заключается в предоставлении рекомендаций по выбору оптимального метода создания ЦММ. Для задач с допустимой погрешностью 10-15 см, при работе на открытых территориях или в труднодоступных местах рекомендуется использовать БПЛА.

Если требуется сантиметровая точность (1-5 см) или съемка ведется в сложных условиях (застройка, густая растительность) предпочтительнее мобильное лазерное сканирование. Наиболее эффективным подходом является комбинированное применение обоих методов.

Полученные результаты могут быть использованы при планировании геодезических и картографических работ для выбора оптимальной технологии создания цифровых моделей местности.

ВКР УлГУ

Список литературы

1. ГОСТ 22268 Геодезия. Термины и определения
2. ГОСТ Р 52440-2005 Модели местности цифровые.
3. ГОСТ Р 51833-2001 Фотограмметрия. Термины и определения**.**
4. Берлянт А. М. Картография: Учебник для вузов. – М.: Аспект Пресс, 2002. – 336 с.
5. Козин Е. В., Карманов А. Г., Карманова Н. А. Фотограмметрия. Санкт-Петербург, 2019. – 146 с.
6. Комиссаров, А. В. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование: учебно-методическое пособие / А.В. Комиссаров. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. – 53 с.
7. Краснопевцев, Б. В. Фотограмметрия – Москва, 2008 – 161 с.
8. Кудрявцева Т. Л., Авраменко А.А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учебное пособие. – Уссурийск, 2021 – 100 с.
9. Неволин, А. Г. Методы обработки геодезических данных с применением технологий КРЕДО [Текст]: практикум / А. Г. Неволин, С. Р. Горобцов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – 102 с.
10. Новаковский Б.А., Пермяков Р.В. Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа: учебное пособие. – М.: Изд-во МИИГАиК. 2019. – 175 с.
11. Орехов, М. М. Автоматизированная обработка инженерно-геодезических изысканий в программном комплексе CREDO: учеб. пособие / М. М. Орехов, С. Е. Кожанова; СПбГАСУ. – СПб., 2013 – 42 с.
12. Руководство пользователя (для начинающих) Топография, 2024. – 873 с.
13. Руководство пользователя Agisoft Metashape Proffesional Edition, версия 2.3 – 274 с.
14. Руководство пользователя 3D СКАН, версия 1.4 – Создание цифровой модели местности по облакам точек, 2020. – 124 с.

ВКР УлГУ

15. Хромовых В.В., Хромовых О.В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие. Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 178 с.

Интернет-ресурсы

16. Agisoft Metashape Professional | ГК «Геоскан» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.geoscan.ru/ru/software/agisoft/metashape_pro (дата обращения 05.06.2026)

17. Autel EVO II Pro V3 | Официальный интернет-магазин [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://autelrobotics-ru.ru/autel-evo-ii-pro-v3/?ysclid=mq2urrcf5c390976747 (дата обращения 05.06.2026)

18. Виды лазерного сканирования сканировании [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://geo-moon.ru/blog/vidyi-lazernogo-skanirovaniya (дата обращения 05.06.2026)

19. Истинный ортофотоплан по плотной ЦМП — эффективное решение [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.geoscan.ru/ru/blog/istinnyy-ortofotoplan-po-plotnoy-cmp-effektivnoe-reshenie (дата обращения 05.06.2026)

20. Лазерный сканер EFT ESL 1 [Электронный ресурс] – Режим доступа:https://eftgroup.ru/catalog/sistemy_lazernogo_skanirovaniya/sistemy_mobilnogo_skanirovaniya/lazernyy_skaner_eft_esl1/?ysclid=mq2ukymzcu241369246 (дата обращения 05.06.2026)

21. Облако точек при лазерном сканировании [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://a-expert.ru/services/obsledovaniya-stati/oblako-tochek/ (дата обращения 05.06.2026)

22. Программный комплекс Credo для изыскания и проектирования [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://nestor.minsk.by/sn/1997/45/sn74509.htm (дата обращения 05.06.2026)

ВКР УлГУ

23. Принцип работы GNSS-приемника [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ngeos.ru/blog/kak-rabotaet-gnss-priemnik/ (дата обращения 05.06.2026)

24. Создание и построение цифровых моделей местности и рельефа [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://geo-moon.ru/blog/cifrovaya-model-mestnosti (дата обращения 05.06.2026)

25. Технология лазерного сканирования [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://rusgeometria.ru/blog/tekhnologii/tekhnologiya-lazernogo-skanirovaniya/ (дата обращения 05.06.2026)

26. ЦММ. Создание цифровых моделей местности в компании Иннотер [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://innoter.com/services/fotogrammetriya/tsifrovye-modeli-mestnosti/ (дата обращения 05.06.2026)

ВКР УдГУ

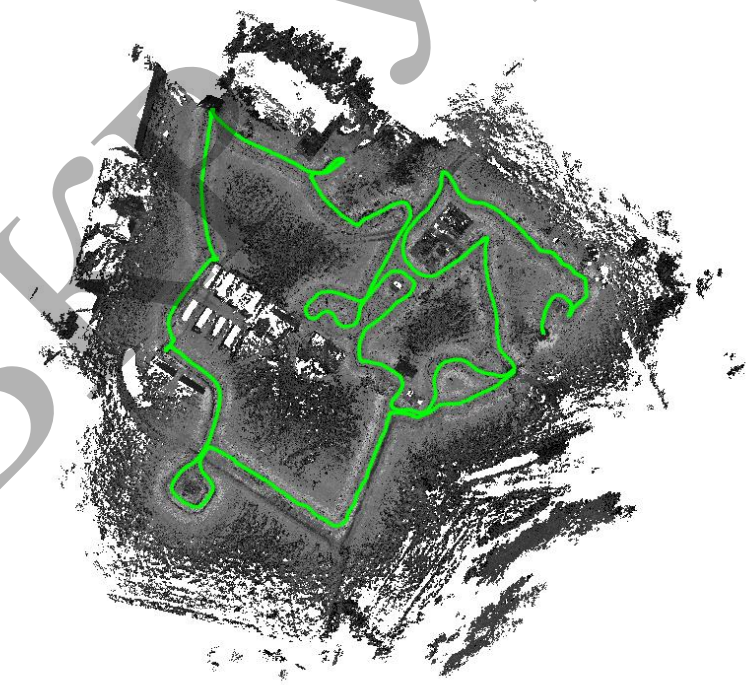
Приложения

ВКР УДГУ

Приложение 1



Первый маршрут сканирования МЛС



Второй маршрут сканирования МЛС

ВКРУДГУ

Приложение 2



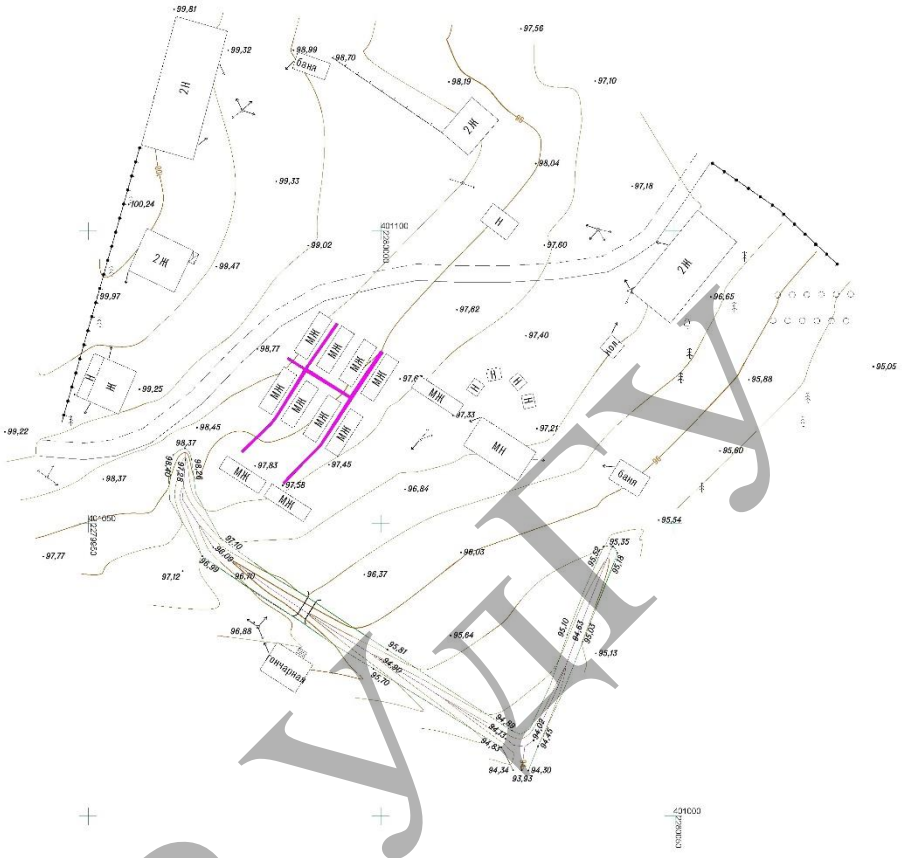
Ортофотоплан местности

ВКР



Построенная ЦММ на основе данных аэрофотосъёмки

ВКР УлГТУ



Построенная ЦММ на основе данных мобильного лазерного сканирования

ВКР УлГУ