

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Алтынцев Максим Александрович



Теоретические основы и методология интеграции данных дистанционного зондирования Земли для развития наземной транспортной инфраструктуры

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени доктора
технических наук

Научный консультант –
доктор технических наук, доцент
Комиссаров Александр Владимирович

Новосибирск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	15
1.1 Особенности развития сферы транспортной инфраструктуры	15
1.2 Применение методов ДЗЗ в сфере транспортной инфраструктуры	19
1.3 Особенности современного этапа развития методов ДЗЗ	30
1.4 Анализ перечня задач при развитии сферы транспортной инфраструктуры и опыт их решения с помощью методов ДЗЗ	33
1.5 Обоснование выбора оптимальных методов ДЗЗ для решения задач сферы транспортной инфраструктуры	40
1.6 Выводы по первому разделу	51
2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОГО ГЕОПРОСТРАНСТВА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ.....	54
2.1 Методологические принципы интеграции данных ДЗЗ	54
2.2 Теоретические основы сбора и обработки данных ДЗЗ для формирования единого геопространства объектов транспортной инфраструктуры.....	56
2.3 Теоретические основы получения данных ДЗЗ в едином координатном пространстве	68
2.3.1 Сущность задачи построения цифровой модели местности по данным ДЗЗ.....	68
2.3.2 Схема определения пространственных координат точек местности различными системами ДЗЗ в единой системе координат.....	72
2.3.3 Определение пространственных координат точек местности по снимкам методом прямой фотограмметрической засечки.....	73

2.3.4	Определение пространственных координат точек местности по данным лазерного сканирования.....	81
2.4	Методология интеграции данных ДЗЗ для решения задач сферы транспортной инфраструктуры	85
2.5	Технология геопространственного моделирования территории транспортной инфраструктуры по данным ДЗЗ	95
2.6	Автоматическая привязка данных ДЗЗ по способу взаимного ориентирования	104
2.6.1	Технологическая схема привязки по способу взаимного ориентирования.....	104
2.6.2	Анализ методов привязки на основе двумерного подхода	106
2.6.3	Анализ методов привязки на основе трехмерного подхода.....	109
2.7	Анализ методов распознавания объектов и дешифрирования данных ДЗЗ	112
2.8	Выводы по второму разделу	119
3	РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СБОРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ....	121
3.1	Факторы, влияющие на результат формирования пространственно-информационной модели	121
3.2	Создание пространственно-информационных моделей по данным МЛС.	123
3.2.1	Технологическая схема создания пространственно-информационных моделей по данным МЛС	123
3.2.2	Исследования технологической схемы создания пространственно-информационных моделей по данным МЛС	136
3.2.2.1	Описание исходных данных МЛС	136
3.2.2.2	Исследование универсального алгоритма фильтрации	138
3.2.2.3	Исследование универсального алгоритма взаимного ориентирования.....	141

3.2.2.4	Исследование точности внешнего ориентирования данных МЛС.....	148
3.3	Создание пространственно-информационных моделей по данным ВЛС...	152
3.3.1	Технологическая схема создания пространственно- информационных моделей по данным ВЛС	152
3.3.2	Исследования технологической схемы создания пространственно- информационных моделей по данным ВЛС	158
3.4	Создание пространственно-информационных моделей по данным НЛС ..	162
3.4.1	Технологическая схема создания пространственно- информационных моделей по данным НЛС	162
3.4.2	Исследования технологической схемы создания пространственно- информационных моделей по данным ВЛС	168
3.5	Создание пространственно-информационных моделей железных дорог по данным наземных измерительных комплексов и АФС с БВС.....	170
3.5.1	Технологическая схема создания пространственно- информационных моделей по данным наземных измерительных комплексов и АФС с БВС	170
3.5.2	Исследование точности создания пространственно- информационных моделей по данным наземных измерительных комплексов и АФС с БВС	173
3.6	Выводы по третьему разделу	180
4	РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ МЕТОДИК ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	181
4.1	Задача разработки методик интеграции данных ДЗЗ.....	181
4.2	Создание геопространственных моделей объектов в результате интеграции данных НФС и МЛС	183
4.2.1	Методика интеграции данных НФС и МЛС	183

4.2.2	Исследования методики интеграции данных НФС и МЛС	185
4.3	Создание геопространственных моделей объектов в результате интеграции данных АФС и МЛС	187
4.3.1	Методика интеграции данных АФС и МЛС	187
4.3.2	Исследования методики интеграции данных АФС и МЛС	193
4.4	Создание геопространственных моделей объектов в результате интеграции данных ВЛС и НЛС	199
4.4.1	Методика интеграции данных ВЛС и НЛС	199
4.4.2	Исследования методики интеграции данных ВЛС и НЛС	202
4.5	Построение ортофотопланов и цифровых моделей рельефа по данным АФС и МЛС	205
4.5.1	Методика построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа по данным АФС и МЛС	205
4.5.2	Исследование точности построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа по данным АФС и МЛС для незастроенных территорий	207
4.6	Выводы по четвертому разделу	211
5	ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДИК СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СФЕРЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ.....	213
5.1	Создание векторных трехмерных геопространственных моделей объектов	213
5.1.1	Влияние выбора геодезического оборудования на точность построения трехмерных векторных геопространственных моделей	213
5.1.2	Совершенствование технологической схемы создания трехмерных векторных геопространственных моделей объектов	218
5.2	Мониторинг технического состояния автомобильных дорог	222

5.2.1 Методика мониторинга технического состояния автомобильных дорог	222
5.2.2 Исследование методики мониторинга технического состояния автомобильных дорог	227
5.2.3 Применение методики мониторинга технического состояния автомобильных дорог для контроля качества их ремонта	232
5.3 Применение данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта.....	236
5.3.1 Технологическая схема применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта.....	236
5.3.2 Применение данных АФС с БВС для исполнительной съемки железных дорог	238
5.3.3 Применение данных АФС с БВС при создании масштабного плана станций в ГИС	241
5.3.4 Применение данных АФС с БВС для создания топографических планов и решения дополнительных прикладных задач.....	243
5.3.5 Применение данных МЛС для создания топографических планов ...	245
5.4 Выводы по пятому разделу	247
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	249
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	251
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	253
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) РЕЗУЛЬТАТ ПОСТРОЕНИЯ ЦМП АСФАЛЬТОВОГО ПОКРЫТИЯ.....	296
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) РЕЗУЛЬТАТ ПОСТРОЕНИЯ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО ПЛАНА И ЦМР	297

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В соответствии с распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р ключевое значение для развития экономики страны приобретает сфера транспортной инфраструктуры. Утвержденная этим распоряжением транспортная стратегия на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г., ставит задачи расширения пространственных связей между регионами страны и их транспортной доступности путем строительства и реконструкции ряда автомобильных и железных дорог, объектов транспортной инфраструктуры, повышения мобильности населения, увеличения скорости и объема транспортировки грузов. Достижение этих целей возможно путем применения современных строительных технологий, методов проектирования, сбора и анализа количественной и качественной информации. Для этого развитие транспортной инфраструктуры должно производиться путем цифровой трансформации всей отрасли целиком.

Цифровая трансформация данной отрасли невозможна без формирования единого геопространства территорий, занятых транспортной инфраструктурой, которая должна включать модели соответствующих инженерных объектов. Решение проблемы создания геопространственных моделей возможно только в реализации системного подхода при планировании строительства новых объектов, эксплуатации и мониторинге существующих, координации проведения отдельных технологических процессов, связанных с обеспечением работоспособности и безопасной эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры.

В связи со значительной площадью территории Российской Федерации, ускоренное решение поставленных проблем невозможно без внедрения инновационных технологий, способных обеспечить оперативное получение пространственных данных и выполнить их анализ и систематизацию средствами информационного моделирования. Основной технологией, позволяющей оперативно получать геопространственные модели территорий с достаточной для дорожной отрасли точностью и на большие площади, является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), а

именно: мобильное, воздушное и наземное лазерное сканирование, аэрофото-съемка с беспилотных воздушных судов, космическая съемка и т. д. Однако использование всех этих методов приводит к накоплению значительного объема данных, время на обработку которого на порядок превышает время, затраченное на его получение. Существующая теория не позволяет выполнить комплексный анализ и обработку всех получаемых данных с требуемым для дорожной отрасли уровнем автоматизации. Вместе с тем, для геопространственного моделирования территории в целях решения актуальных метрических задач в рамках определенного жизненного цикла исследуемого объекта транспортной инфраструктуры требуется учет их специфики. Для этого достаточно выполнять с требуемой точностью извлечение только необходимой информации из всего набора данных ДЗЗ.

В настоящее время отсутствует универсальная технология геопространственного моделирования, адаптированная для решения широкого круга задач сферы транспортной инфраструктуры, что часто приводит к негативным последствиям в виде увеличения трудоемкости сбора излишнего объема данных ДЗЗ в одной ситуации и их недостаточного количества в другой из-за наличия растительности, характера застроенности территории и ее площади. Также методы и методики совместной обработки большого набора данных ДЗЗ в целях геопространственного моделирования территории транспортной инфраструктуры недостаточно развиты. Такие обстоятельства значительно сдерживают развитие дорожной отрасли. Поэтому перед наукой встает значимая и актуальная проблема в повышении скорости и детальности обработки широкого набора данных ДЗЗ при сохранении необходимого уровня точности, достаточного для соблюдения всех требований дорожной отрасли в рамках специфики решаемых задач сферы транспортной инфраструктуры. Решение поставленной научной проблемы возможно посредством совершенствования теории геопространственного моделирования – разработке методологических принципов и методологии интеграции данных ДЗЗ, являющихся основой для разработки технологии геопространственного моделирования территории транспортной инфраструктуры, состоящей из системы технологических решений и

методик сбора и обработки данных ДЗЗ.

Степень разработанности темы. Основой разработки теоретических и методологических основ сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли в рамках поставленной проблемы являются исследования отечественных и зарубежных ученых: Антипова И. Т., Дробышева Ф. В., Журкина И. Г., Лобанова А. Н., Чибуничева А.Г., Hutton J., Riegl J., Vosselman G., Wang Y., Wu B. в области фотограмметрической обработки данных дистанционного зондирования земли; Брыня М. Я., Гука А. П., Долгополова Д. В., Карпика А. П., Комиссарова А. В., Мелкого В. А., Мустафина М. Г., Нехина С. С., Трубиной Л. К., Шоломицкого А. А., Hussnain Z., Miraliakbari A. в области методов дистанционного исследования и мониторинга природно-технических систем; Никитина А. В., Скворцова А. В., Уставича Г. А., Хлебниковой Т. А., Хорошилова В. С., Щербакова В. В., Ямбаева Х. К., Bernucci L., Hahn M., Huang X., Нуурпӓ Н., Kukko A., Mohammed H., Wei J., Williamson R. в области геопространственного моделирования объектов транспортной инфраструктуры с обеспечением нормативной точности.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка теоретических основ и методологии интеграции данных дистанционного зондирования Земли, которые позволят создавать цифровые геопространственные модели объектов транспортной инфраструктуры с требуемой точностью, оперативностью и высоким уровнем автоматизации технологического процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *основные проблемные научно-технические задачи:*

– выполнить информационно-аналитический анализ современных научно-технических разработок, связанных с проблематикой обработки данных дистанционного зондирования Земли и создания геопространственных моделей объектов транспортной инфраструктуры, в результате которого обозначить проблему организации эффективного управления дорожной отраслью, обусловленную отсутствием теоретического обоснования по выбору критериев для оптимальных мето-

дов сбора пространственных данных, отсутствием разработанной структуры единого геопространства территории транспортной инфраструктуры;

– разработать методологические принципы интеграции данных дистанционного зондирования Земли, которые позволят дать теоретическое обоснование для разработки технологии геопространственного моделирования объектов транспортной инфраструктуры;

– предложить структуру единого геопространства территории транспортной инфраструктуры, позволяющую представить этапы сбора и обработки пространственных данных в виде системы технологических решений, необходимых для создания координатного пространства и решения актуальных научно-технических задач дорожной отрасли с требуемой точностью;

– разработать методологию интеграции данных дистанционного зондирования Земли в структуру единого геопространства, что позволит существенно повысить эффективность совместной обработки геопространственной информации объектов дорожной отрасли в координатном пространстве транспортной инфраструктуры;

– разработать технологию геопространственного моделирования территории транспортной инфраструктуры, что расширит транспортную доступность регионов Российской Федерации и обеспечит условия ее национальной безопасности;

– выполнить апробацию разработанной технологии геопространственного моделирования территории наземной транспортной инфраструктуры на примере автомобильных и железных дорог Российской Федерации.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются теория, методы и технология создания трехмерных моделей объектов земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. Предметом исследования являются теоретические основы и методология интеграции данных дистанционного зондирования Земли для развития наземной транспортной инфраструктуры.

Научная новизна диссертационных исследований состоит в следующем:

– разработана методология интеграции данных дистанционного зондирования Земли, позволяющая повысить точность и оперативность создания геопространственных моделей объектов транспортной инфраструктуры за счет теоретического обоснования выбора оптимальных методов распознавания и интеграции данных, полученных различными съемочными и измерительными системами;

– предложена структура единого геопространства, позволяющая сформировать систему технологических решений для создания геопространственной модели наземной транспортной инфраструктуры;

– разработана система технологических решений на основе предложенных методик сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли, позволяющая выполнять интеграцию пространственных данных в предложенную структуру единого геопространства транспортной инфраструктуры Российской Федерации;

– разработана технология геопространственного моделирования, позволяющая в едином координатно-временном пространстве создавать геопространственные модели для решения актуальных научно-технических задач на территории транспортной инфраструктуры Российской Федерации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке методологии интеграции данных дистанционного зондирования Земли для создания геопространственных моделей объектов транспортной инфраструктуры Российской Федерации с требуемой точностью.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что разработанная технология геопространственного моделирования по данным дистанционного зондирования Земли, состоящая из предложенной системы технологических решений и методик, позволяет автоматизировать обработку пространственных данных об объектах транспортной инфраструктуры с требуемой точностью и минимальной трудоемкостью. Разработанная система технологических решений и методик используется соответствующими производственными организа-

циями на железных и автомобильных дорогах Российской Федерации, что позволяет им существенно сократить трудоемкость выполнения технологических операций по камеральной обработке данных ДЗЗ за счет применения автоматизированных инструментов интеграции пространственных данных в единое геопространство транспортной инфраструктуры дорожной отрасли.

Методология и методы исследований. Методологической основой диссертационных исследований являлись методы вычислительной математики, статистического и сравнительного анализа, а также методы обработки данных дистанционного зондирования Земли: фильтрации, пространственной привязки, классификации и сегментации данных, распознавания объектов и выявления изменений.

Положения, выносимые на защиту:

– разработанная методология интеграции данных дистанционного зондирования Земли, полученных различными съемочными и измерительными системами, в единую структурированную геоинформационную модель позволяет существенно повысить эффективность и качество совместной обработки геопространственной информации об объектах наземной транспортной инфраструктуры в результате применения оптимальных методов распознавания и интеграции данных;

– предложенная структура единого геопространства позволяет создать систему технологических решений для сбора и обработки пространственных данных об объектах наземной транспортной инфраструктуры;

– разработанная система технологических решений на основе предложенных методик сбора и алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования Земли позволяет выполнить интеграцию пространственных данных в предложенную структуру единого геопространства транспортной инфраструктуры;

– разработанная технология геопространственного моделирования позволяет с требуемой точностью создавать геопространственные модели объектов для решения актуальных научно-технических задач при эксплуатации и развитии наземной транспортной инфраструктуры Российской Федерации в соответствии с нормативными требованиями ее безопасного функционирования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует областям исследования: 10 – Развитие и применение методов обработки и анализа больших данных, формируемых средствами ДЗЗ, в том числе с применением машинного обучения и искусственного интеллекта, для решения задач геофизики, геодинамики, климатологии, океанологии и др. наук о Земле; 12 – Теория и методы автоматизации фотограмметрических измерений и дешифрирования изображений, в том числе на основе систем искусственного интеллекта, с целью картографирования и формирования ГИС различной тематической направленности; 13 – Теория, методы и технологии создания трехмерных моделей объектов земной поверхности, инженерных и других объектов, на основе различных видов съемки (оптическая, радиолокационная, лазерно-локационная и др.); 14 – Теория, методы и технология решения задач дистанционного зондирования и фототопографических съемок с применением беспилотных летательных аппаратов; 15 – Методы и технологии создания и обновления топографических, экологических, землеустроительных и других тематических карт и планов паспорта научной специальности 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Результаты исследований и положения диссертации одобрены на Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» в 2012–2023 гг.; Междунар. конф. «Инновационные технологии сбора и обработки пространственных данных для управления природными ресурсами» (г. Алматы) в 2012 г.; Всероссийской конференции «Индустриальные информационные системы» (г. Новосибирск) в 2013 г.; Международном конгрессе FIG (г. Куала-Лумпур) в 2014 г.; Международном конгрессе ISPRS (г. Прага) в 2016 г.; Международной научно-практической конференция «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка» (г. Москва) в 2013–2015 гг.; Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН (г. Новосибирск) в 2019 г.

В 2020–2022 гг. исследования выполнялись в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

Апробация основных результатов исследований выполнялась в рамках выполнения хоздоговорных работ, заключенных с ООО «Сургутнефтегаз», ООО «Талдинское ПТУ», на Западно-Сибирской железной дороге. Результаты исследований внедрены в институте перспективных транспортных технологий и переподготовки кадров (ИПТТиПК), кафедре «Инженерная геодезия» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 35 научных публикациях, 17 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, 10 опубликованы в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus, 2 патента на изобретения.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 298 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, включающего 310 наименований, содержит 36 таблиц, 83 рисунка, 2 приложения.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

1.1 Особенности развития сферы транспортной инфраструктуры

Для экономического прогресса нашей страны и стремительного перехода ее экономики на инновационный путь развития необходимо осуществлять цикл мероприятий, направленных на совершенствование сферы транспортной инфраструктуры (ТИ).

Под ТИ понимают совокупность разнообразных видов транспорта и транспортных структур, которые занимаются созданием благоприятных условий для функционирования и развития отраслей экономики страны. ТИ играет важнейшую роль в хозяйственной деятельности и жизни людей. Социально-экономическое развитие любого региона страны невозможно без ТИ. Благодаря развитию этой сферы достигаются положительные эффекты в экономической, культурной, государственной и общественной областях жизни человека. Причинами этого считаются следующие [111]:

- экономическое сближение между районами производства и потребления;
- развитие концентрации производства и географического разделения труда;
- создание новых отраслей промышленности и районов производства;
- преобразование организаций и путей товарообмена;
- сокращение издержек производства;
- преодоление монополизма локальных производителей и развитие конкуренции;
- изменение условий общественной и культурной жизни;
- развитие урбанизации и повышение пространственной мобильности населения.

К объектам ТИ (ОТИ) в соответствии с ФЗ от 03.02.2014 № 15 относятся автомобильный, водный, воздушный, железнодорожный транспорт, а также связанные с транспортом искусственные сооружения [108].

Инфраструктура автомобильного транспорта включает предприятия и службы дорожного и автотранспортного хозяйства, автомобильные дороги, производственные базы, объекты дорожного сервиса и другие дорожные инженерные сооружения, среди которых можно выделить необходимые и сопутствующие. К необходимым инженерным сооружениям относятся тоннели, мосты, виадуки, трубопроводы, путепроводы, эстакады, подпорные стены. К сопутствующим относятся такие, которые необходимы для нормального функционирования дороги – станции технического обслуживания, отели, автобусные павильоны, автомобильные заправокные станции, вокзалы.

Инфраструктура водного транспорта представляет собой совокупность плавучих средств, которые объединены условиями плавания, принадлежностью, назначением или другими признаками.

Инфраструктура воздушного транспорта позволяет выполнять безопасные полеты в воздушном пространстве, а также перенаправлять грузы и пассажиров на наземные виды транспорта. Такая инфраструктура включает аэропорты, аэродромы, воздушные суда и технические средства, обеспечивающие полеты воздушных судов.

Инфраструктура железнодорожного транспорта включает железнодорожные станции, пути, сети связи, информационные комплексы, систему управления движением и обеспечивающие их функционирование здания, сооружения и устройства.

Развитие ТИ является приоритетным направлением политики большинства стран, к целям которой относятся безопасность передвижения транспорта, экологичность, устойчивость, эффективность пользования городской инфраструктурой, повышение роли общественного транспорта, безопасность и качество передвижения пешеходов и велосипедистов [105].

Достижение этих целей должно соответствовать современной концепции превращения транспортных путей в интерактивную систему. Для каждого вида транспорта развиваются соответствующие перспективные направления исследований. Например, для инфраструктуры автомобильного транспорта такими направлениями являются: «умные дороги», солнечные трассы, трассы без фонарей, электродороги.

«Умные дороги» необходимы для внедрения беспилотных транспортных средств. Для строительства «умных дорог» необходимо принятие законов, регулирующих движение таких видов автомобилей. Соблюдение требований безопасности передвижения транспорта и пешеходов является важным условием такого строительства. Этого возможно достичь путем учета следующих аспектов [167]:

- изменение подходов к проектированию, строительству и эксплуатации дорог;
- усовершенствование подготовки специалистов, оказывающих помощь жертвам дорожно-транспортных происшествий;
- изменение подхода к обучению водителей в автошколах;
- включение правил поведения на дороге в образовательные программы;
- совершенствование условий движения транспорта;
- усовершенствование государственной политики в области безопасности дорожного движения;
- усовершенствование надзорной и контрольной политики.

В связи с тем, что территория Российской Федерации является самой крупной в мире, основные проблемы ее транспортной системы заключаются в следующем [111]:

- дефицит пропускной способности дорожной сети, вызванный увеличением количества транспортных средств, особенно при подходе к крупным транспортным узлам, городам;
- недостаточное развитие подходов к аэропортам, морским портам, автомобильным и железнодорожным пунктам пропуска;

– недостаточно сформированная на территории страны транспортная сеть, что приводит к сдерживанию экономического развития отдаленных от столицы регионов страны;

– устаревающая инфраструктура.

Согласно данным Всемирного экономического форума, ТИ России оценивается весьма низко [131]. Сложившаяся в настоящее время ТИ сдерживает возможности производства и обмена энергетическими и материальными ресурсами, готовой продукцией между представителями производственных сфер жизни, а также ограничивает перемещение граждан внутри страны [146].

Развитие ТИ является действующей целью транспортной стратегии Российской Федерации, рассчитанной до 2030 г. Эта стратегия предусматривает повышение пространственных связей между регионами страны и их транспортной доступности, повышение мобильности населения, увеличение скорости и объема транспортировки грузов, а также цифровую трансформацию отрасли посредством ускоренного внедрения новых технологий.

Цифровая трансформация отрасли подразумевает создание геопространственных моделей ОТИ. Используя цифровые модели, можно управлять развитием ОТИ на всех стадиях их жизненного цикла: планирование, проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, капитальный ремонт, консервация, утилизация. Возможны различные варианты жизненного цикла ОТИ. В частности, можно осуществлять системный подход к планированию строительства новых объектов, эксплуатации и мониторингу существующих объектов, координации проведения отдельных мероприятий, связанных с обеспечением работоспособности ОТИ. Каждая из стадий жизненного цикла в зависимости от сложности проекта по созданию модели может состоять из нескольких этапов. Например, стадия проектирования может содержать различные работы, включающие следующие этапы: предпроектные изыскания, проектно-изыскательские работы, содержащие стадии проектирования «П» (подготовка проекта) и «Р» (подготовка рабочих документов) [128].

Создание геопространственных моделей может быть инициировано на любом жизненном цикле ОТИ. Такие модели проходят постепенную эволюцию от предпроектных проработок через проектирование, строительство, эксплуатацию с дальнейшим восстановлением транспортно-экономических показателей или проведением работ по реконструкции участка дороги [137].

Для создания геопространственных моделей применяются данные, получаемые традиционными геодезическими методами, измерениями с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), методами наземных специальных измерительных систем и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Традиционные наземные методы геодезических измерений, основанные на применении электронных тахеометров, теодолитов и нивелиров, а также ГНСС-измерения уже давно получили широкое распространение в сфере ТИ и позволяют получать информацию об ОТИ на всех этапах их жизненного цикла [125].

Также могут применяться и более сложные измерительные системы, передвижные дорожные лаборатории, системы автоматизированного управления дорожной и железнодорожной техникой, ускоряющие многие процессы [192].

Настоящее диссертационное исследование посвящено применению методов ДЗЗ, так как они имеют неоспоримые преимущества перед другими методами – высокая оперативность сбора данных, низкая себестоимость и высокая безопасность съемочных работ. Данные ДЗЗ являются основным источником информации для создания геопространственных моделей ОТИ. Методы ДЗЗ позволяют заменить любые другие в сфере ТИ за исключением тех, которые требуют непосредственного контакта с объектом – например, определение коэффициента сцепления с помощью специальной измерительной передвижной дорожной лаборатории [37].

1.2 Применение методов ДЗЗ в сфере транспортной инфраструктуры

ДЗЗ благодаря возможности оперативного сбора информации к настоящему времени стало играть важнейшую роль в исследованиях окружающего простран-

ства [1]. Сфера ТИ, как и любая другая область, имеет собственную специфику решаемых задач, и для этого необходим индивидуальный набор данных ДЗЗ. Для обоснования выбора оптимальных методов (набора) ДЗЗ применительно к проблематике данной диссертации необходимо рассмотреть их общую классификацию.

При ДЗЗ используется большой круг съемочных систем, которые можно разделить по нескольким критериям (рисунок 1.1).

По физическому принципу получения информации выделяют активные и пассивные системы ДЗЗ [94].

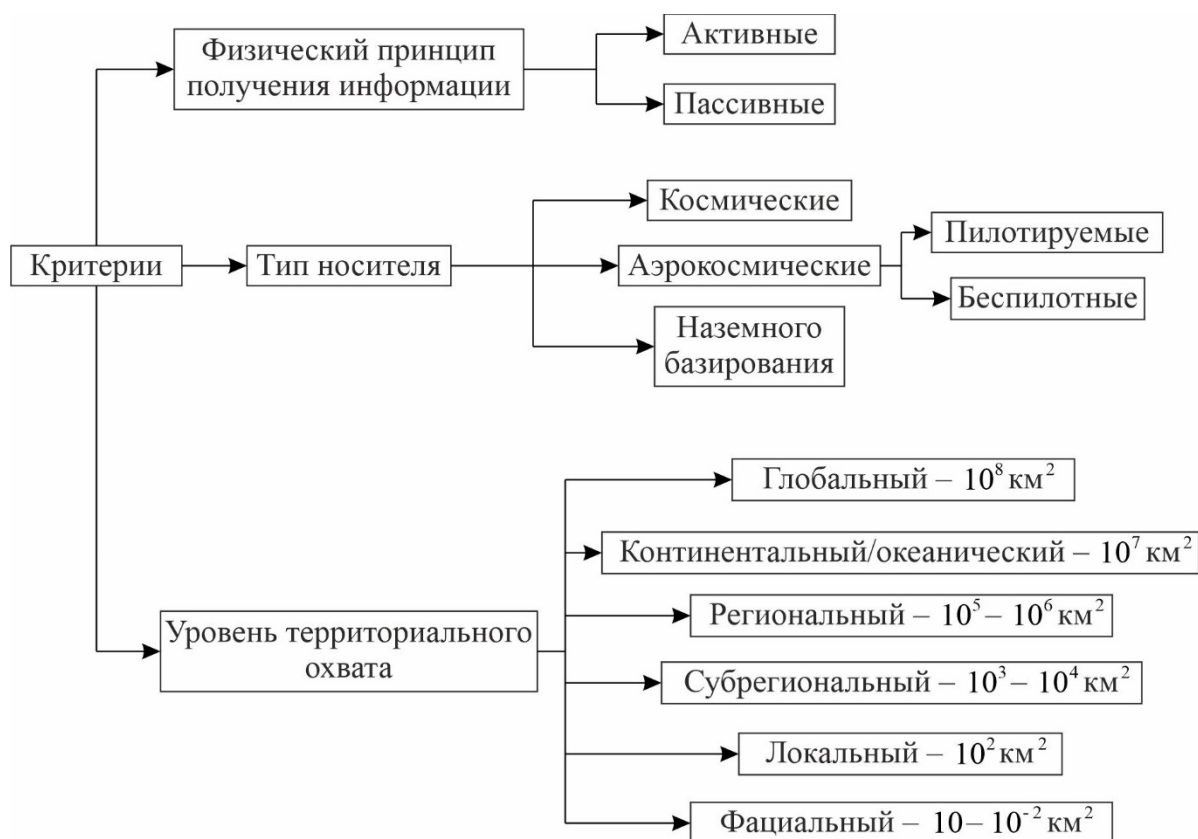


Рисунок 1.1 – Критерии классификации систем ДЗЗ

Также съемочные системы ДЗЗ разделяют на несколько классов в зависимости от типа носителя: аэросъемочные, космические, наземного базирования. Аэросъемочные системы могут устанавливать как на пилотируемые воздушные суда, так и беспилотные (БВС), а системы ДЗЗ наземного базирования – на подвижные плат-

формы, такие как автомобили, поезда, водный транспорт, или на стационарные, располагающиеся над определенными точками поверхности земли [190].

Следующим критерием классификации систем ДЗЗ является территориальный охват, который согласно работе [35] подразделяется на 7 уровней в зависимости от площади охвата.

Съемочными системами регистрируются следующие диапазоны электромагнитного спектра: гамма, рентгеновский, ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный, микроволновый и радиодиапазон [183]. В зависимости от диапазона длин волн, которые может регистрировать система ДЗЗ, физического принципа процесса регистрации, результат съемки может представляться в одной из трех форм [143]:

- изображения подстилающей поверхности;
- количественные, пространственные или локальные характеристики электромагнитного излучения, описывающие подстилающую поверхность, без формирования изображений. Результаты определения таких характеристик могут быть представлены в виде снимков или массивов точек;
- характеристики электромагнитного излучения, описывающие состояние атмосферы – атмосферное зондирование.

В таблице 1.1 показана классификация методов ДЗЗ в зависимости от формы представления результата съемки.

Для съемочных систем выделяют виды разрешающей способности [183]:

- пространственное разрешение. Характеризует минимальный размер объекта на местности, который можно различить на изображениях;
- спектральное разрешение. Характеризует способность системы ДЗЗ выделять определенные интервалы длин волн электромагнитного спектра. Если система способна регистрировать излучение в нескольких зонах спектра, то ее относят к многоспектральной или гиперспектральной [144];
- радиометрическое разрешение. Характеризует чувствительность сенсора системы ДЗЗ к изменениям интенсивности электромагнитного излучения, то есть минимальную различимую сенсором разницу в уровнях энергии;

– временное разрешение. Показывает периодичность сбора данных одних и тех же участков местности.

Таблица 1.1 – Классификация методов ДЗЗ

Форма представления результата ДЗЗ	Пассивные системы ДЗЗ			Активные системы ДЗЗ	
	Отраженный солнечный свет	Тепловое излучение		Видимое и инфракрасное	Микроволновое (радио)
		Инфракрасное	Микроволновое		
Формирование изображений	Аэросъемка. Наземная съемка. Космическая съемка. (фотографические или электронные системы)	Тепловая инфракрасная съемка	Пассивная микроволновая съемка		Радар бокового обзора с реальной апертурой антенны (SLAR). Радар бокового обзора с синтезированной апертурой антенны (SAR)
Без формирования изображений		Тепловая инфракрасная радиометрия	Пассивная микроволновая радиометрия	Лазерная локация	Радарная Альтиметрия. Микроволновая рефлектометрия
Атмосферное зондирование	Ультрафиолетовое зондирование	Тепловое инфракрасное зондирование	Пассивное микроволновое зондирование	Лидар	

Пассивные системы ДЗЗ способны фиксировать солнечную радиацию, состоящую преимущественно из ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения, и тепловое излучение от всех объектов, происходящее в инфракрасном и микроволновом диапазонах [175].

Тепловые инфракрасные изображения получаются при любых условиях освещенности. Объекты на них имеют тепловой контраст по сравнению с окружающим фоном. Основной задачей применения тепловых инфракрасных изображений является определение температуры поверхностей природных и искусственных объектов. Благодаря дополнительной информации о тепловом контрасте можно повысить достоверность дешифрирования. Тепловые инфракрасные изображения практически не имеют теней, но обладают невысоким пространственным разрешением – не выше нескольких десятков метров [94, 143].

Микроволновые изображения получают в сверхвысокочастотном (СВЧ) радиодиапазоне с применением принципа механического сканирования системами ДЗЗ космического базирования с помощью радиоантенн. В этом диапазоне практически полностью отсутствует влияние облачности и атмосферы на интенсивность теплового излучения поверхностей объектов. Но существенным недостатком съемки в этом диапазоне является низкое разрешение снимков – не более нескольких километров, что связано с сильной чувствительностью микроволновых радиометров к состоянию поверхностей, степени их шероховатости [168].

Активные системы ДЗЗ фиксируют отраженную часть ими сгенерированного электромагнитного излучения в диапазонах, соответствующих окнам прозрачности атмосферы. В зависимости от типа устройства, генерирующего излучение, различают лазерную локацию и радиолокацию.

Сущность технологии лазерной локации заключается в том, что короткий импульс света в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне излучается лазерным дальномером по направлению к объекту местности. Достигая объекта, импульс отражается от него, часть переотраженной энергии возвращается назад и фиксируется на приемнике излучения, который устанавливается на борту носителя. Это позволяет определить расстояние от лазерного дальномера до объекта [113]. В зависимости от метода измерения расстояний фиксируется время распространения импульса (импульсный метод), разность фаз и число целых длин волн (фазовый метод) или применяется принцип прямой угловой засечки (триангуляционный метод) [96].

Существуют различные варианты реализации технологии лазерной локации: лазерная альтиметрия, воздушное (ВЛС), наземное (НЛС), мобильное (МЛС) лазерное сканирование.

Лазерная альтиметрия является наиболее простым применением технологии лазерной локации. Выходными данными системы лазерной альтиметрии является полоса отдельных измерений в виде точек лазерных отражений (ТЛО), которая позволяет оценить профиль местности по направлению перемещения носителя системы. Различают аэробортовые и космические лазерные системы [143].

По сравнению с лазерной альтиметрией, системы ВЛС, НЛС и МЛС позволяют формировать не просто профиль местности, а ее трехмерную модель в виде массива ТЛО за счет наличия блока развертки, позволяющего отклонять луч в различных направлениях. Для систем ВЛС и МЛС отклонение выполняется в основном в одной плоскости перпендикулярно направлению движения, а для НЛС – в двух плоскостях, так как съемка осуществляется из стационарного положения.

Первоначальным результатом НЛС является растровое изображение в виде скана. На основе измеренных углов и расстояний вычисляются пространственные координаты точек местности, совокупность которых представляет собой массив ТЛО [96].

Для вычисления пространственных координат по данным МЛС и ВЛС в состав систем лазерного сканирования (ЛС) включают дополнительные блоки оборудования: ГНСС-приемник, инерциальная навигационная система (ИНС), блок управления. ГНСС-приемник записывает траекторию движения транспортного средства с установленной системой ЛС, а ее угловую ориентацию определяет ИНС. Блок управления контролирует работу отдельных измерительных блоков [156].

Основной характеристикой получаемого массива ТЛО является его плотность, которая определяется количеством точек на единицу площади.

Метод радарной альтиметрии схож с лазерной альтиметрией. Если при радарной съемке измеряется отраженная мощность, то такой метод называют микроволновой рефлектометрией. Оба этих метода не используются для построения изображений. Для получения изображений методом активной радарной съемки применяются радары бокового обзора с реальной (SLAR) или синтезированной апертурой антенны (SAR). Пространственное разрешение получаемых изображений радаром SLAR достигает десяти метров. Радары SAR основаны на анализе двух изображений одной и той же поверхности, снятой под различными углами. Такая съемка называется интерферометрической. Интерферометрия позволяет повысить разрешение радиолокационной съемки до 0,25 м [120].

Активным методом атмосферного зондирования является технология лидара, упрощенной формой которой является лазерная альтиметрия. Технология лидара позволяет анализировать временную структуру вернувшегося импульса с целью расчета вертикального профиля аэрозолей и облаков в атмосфере на основе коэффициентов отражения входящих в нее компонентов.

Среди всех описанных методов ДЗЗ, в сфере ТИ находят применение пассивные методы, которые позволяют получать изображение подстилающей поверхности с высоким или средним пространственным разрешением и имеют несколько спектральных каналов, а также активные, которые выполняют серию отдельных измерений и представляют их результат в виде трехмерных массивов ТЛО. Это методы, выполняющие съемку в видимом, ближнем инфракрасном и микроволновом диапазонах и чьи данные соответствуют локальному и фациальному пространственному уровню территориального охвата. Точность пространственных данных этих уровней превосходит 5 м в плане и по высоте и может достигать миллиметровых значений [35, 75, 81].

На рисунке 1.2 представлена схема классификации методов сбора пространственных данных, соответствующих локальному и фациальному уровню представления, оптимальных по точности для решения задач сферы ТИ. Точность пространственных данных, получаемых определенным методом, как правило, коррелирует со скоростью их сбора в пределах определенной площади. Чем выше точность данных, тем меньше их территориальный охват [5].

Точность методов ДЗЗ, формирующих изображения, определяется их пространственным разрешением. Она прямо пропорционально уменьшается с увеличением высоты или расстояния до объекта. Исходя из этого очевидно, что пространственное разрешение космических снимков ниже, чем снимков, полученных аэросъемочными или наземными камерами. Космическая съемка (КС) является наиболее производительным и экономичным методом сбора пространственных данных [301].

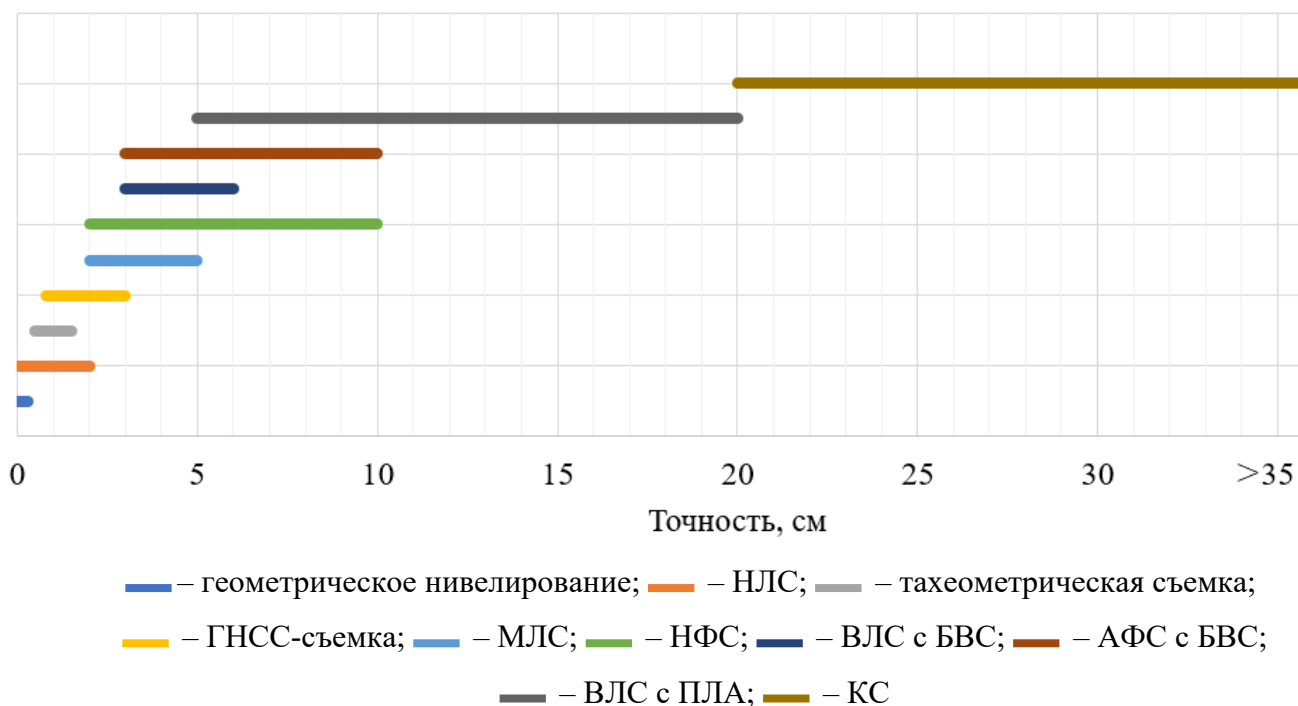


Рисунок 1.2 – Схема классификации методов сбора пространственных данных, применяемых для решения задач сферы ТИ, по точности измерений

По пространственному разрешению изображения, получаемые сенсорами космических съемочных систем, разделяются на несколько категорий от сверхвысокого до очень низкого. Разрешение снимков сверхвысокого разрешения может достигать 20 см. Метод КС в основном выбирают для картографирования обширных территорий. В сфере ТИ космические снимки целесообразнее всего использовать на стадиях планирования и проектирования, когда выполняются предпроектные изыскания для целей строительства, реконструкции и ремонта автомобильных и железных дорог. По космическим снимкам выполняют определение полос варьирования и отвода для целей строительства дорог, распознают существующую дорожную сеть на больших площадях. Создание топографических планов и карт выполняется в масштабах 1: 2 000 – 1: 100 000 [126]. В ходе распознавания автомобильных дорог осуществляется их автоматическая векторизация, отделяются дороги с покрытием и без него, распознается тип покрытия и оценивается его состояние. Железные дороги распознаются по результатам обнаружения двух рельс. Если для распознавания крупной дорожной сети достаточно использовать космические

снимки высокого разрешения, находящегося в диапазоне 1–10 м, то определение типа и состояния покрытия автомобильных дорог, обнаружение рельс требует применения космических снимков сверхвысокого разрешения. Снимки сверхвысокого разрешения позволяют также выполнять обнаружение отдельных небольших ОТИ, таких как дорожные знаки, пешеходные переходы и остановки транспорта [138].

Метод аэрофотосъемки (АФС) может применяться как при выполнении предпроектных изысканий и проектно-изыскательских работ, так и при строительстве, эксплуатации и реконструкции отдельных автомобильных и железных дорог. При предпроектных изысканиях выполняют определение границ земельных участков всех указанных в [126] категорий. По полученным данным строят ортофотопланы и топографические планы в масштабах 1: 500 – 1: 5 000 [130]. По сравнению с результатами КС, ортофотопланы, построенные по данным АФС, имеют более высокое пространственное разрешение, позволяющее детально оценивать состояние дорожного покрытия. Можно выполнять поиск некоторых дефектов дорожного полотна, выявлять трещины.

Метод АФС с пилотируемых летательных аппаратов (ПЛА) применяется для съемки дорог большой протяженности. АФС является наиболее затратным методом. Большая часть денежных средств уходит на обслуживание оборудования и заправку летательного аппарата. При небольших высотах полета и применении современных метрических камер добиваются точности измерения пространственных координат точек местности 10 см и выше.

АФС с БВС применяется для съемки дорог небольшой протяженности или их участков. Стоимость оборудования является относительно невысокой, и его обычно выбирают для съемки с более низких высот и еще меньших площадей. Преимущество БВС перед пилотируемой АФС заключается также в высокой степени оперативности получения результата за счет упрощения выполнения процесса съемки и камеральной обработки данных. Метод АФС с БВС часто выбирают для съемки территорий, где доступ наземными методами затруднен. За счет более низкой высоты полета точность данных АФС с БВС достигает первых значений сан-

тиметров [204, 299]. Благодаря этому становится возможным решать метрические задачи, требующие более высокой точности.

Метод наземной фотосъемки (НФС) наиболее частое применение находит при создании трехмерных моделей отдельных объектов. Он особенно актуален при ситуациях, когда необходимо получить пространственные данные на участки местности небольшой площади, где съемка другими методами была бы нерациональна или трудно осуществима. Часто этот метод выбирают в качестве дополнительного, когда требуется доснять участки, оказавшиеся в его теневых зонах, то есть такие, которые не отображаются в итоговой модели. Точность определения пространственных координат с помощью НФС достигает первых сантиметров.

ЛС применяется на всех стадиях жизненного цикла ОТИ. Применение ЛС в дополнении к методу АФС позволяет повысить точность данных АФС и извлечь дополнительную информацию [153]. В зависимости от стадии жизненного цикла, требуемой точности, площади съемки и протяженности участка выбирают ВЛС, МЛС или НЛС [156].

ВЛС выполняют, как правило, параллельно с АФС. Метод позволяет получить информацию о труднодоступных участках местности, таких как заболоченные и лесные территории [83]. В отличие от АФС метод ВЛС на участках с густой и высокой растительностью позволяет получить точные данные о рельефе местности.

МЛС оптимален для съемки линейно-протяженных объектов, таких как ОТИ. За кратчайшие интервалы времени можно выполнить съемку нескольких сотен километров дорог с чрезвычайно высокой степенью детализации. Точность данных МЛС находится на уровне 3–5 см с возможностью повышения до 1 см при применении опорных точек, измеренных более точным оборудованием [157].

НЛС находит наиболее частое применение при съемке застроенных территорий, объектов культурного наследия, ОТИ небольшой протяженностью. Преимущество этого вида ЛС перед другими заключается в миллиметровом уровне точности [122, 212].

Каждый из методов ЛС в зависимости площади съемочной территории и требуемой точности может применяться на этапах предпроектных изысканий, проектно-изыскательских работ, строительства и эксплуатации [68].

На этапе предпроектных изысканий по данным ЛС всех видов выполняют определение границ земельных участков. При решении этой задачи выбор оптимального метода ЛС или другого, такого как КС или АФС, определяется категорией земель, их площадью. По данным МЛС, ВЛС, КС или АФС выявляют участки с возможным опасным воздействием природных процессов и явлений. Выбор метода в этом случае определяется масштабом съемки и характеристикой участка.

На этапе проектно-изыскательских работ по данным ЛС создают топографические планы в масштабах 1: 200 – 1: 5000 и ЦМР [209]. По данным МЛС и ВЛС создают топографические планы в масштабах 1: 200 – 1: 5000, ЦМР, навигационные транспортные карты. По данным НЛС формируют обмерные чертежи объектов культурного наследия, применяя в качестве дополнения результаты МЛС и ВЛС. По данным НЛС и МЛС подготавливают рабочие документы при территориальном планировании, архитектурно-строительном проектировании, строительстве и реконструкции ОТИ.

На этапе строительства по данным НЛС и МЛС выполняют геодезический контроль точности геометрических параметров строящихся зданий и сооружений, контролируют результаты строительства, ремонта и реконструкции мостовых сооружений, труб, зданий и сооружений различного назначения. По данным НЛС, реже МЛС и ВЛС, оценивают качество строительного-монтажных работ при возведении дорог, измеряют толщину слоев дорожной одежды.

На этапе эксплуатации данные МЛС используют для паспортизации дорог, создания электронных банков данных о состоянии дорог, диагностики и оценки технического состояния дорог, в том числе оценки продольной и поперечной ровности покрытия автомобильных дорог, оценивают расстояние видимости. По данным МЛС и НЛС выполняют геотехнический мониторинг, оценивают техническое состояние искусственных сооружений, фиксируют деформации, разрушения и де-

фекты дорожных одежд и покрытий, определяют геометрические параметры автомобильных дорог. По данным МЛС и ВЛС измеряют расстояния видимости на дорогах.

Тахеометрическая съемка, геометрическое нивелирование и ГНСС-съемка применяются для решения отдельных геодезических задач на местности, а также для создания ПВО, которое используется для внешнего ориентирования данных ДЗЗ.

1.3 Особенности современного этапа развития методов ДЗЗ

Для успешного решения задач сферы ТИ в условиях современного этапа развития методов сбора и обработки данных ДЗЗ необходимо учитывать все последние достижения отрасли. Выполненный обзор методов ДЗЗ показывает, что современный этап их развития характеризуется значительным усовершенствованием съемочных систем, улучшением их технических характеристик и увеличением их общего количества. Развиваются специализированные космические съемочные системы, позволяющие выполнять исследования конкретных типов объектов, таких как водные объекты, растительность и другие. Создаются группировки дополняющих друг друга спутников [73, 79]. У космических снимков повысилось пространственное разрешение до 20 см на местности. Появились гиперспектральные космические и аэросъемочные системы. Были внедрены БВС в область АФС. Расширился круг методов точного определения местоположения с помощью ГНСС, в частности метод PPP (Precise point positioning). В состав многих съемочных систем стали включать инерциальные измерительные устройства. В практику АФС широко были внедрены системы ВЛС, которые стало возможным устанавливать на БВС, тем самым повысив плотность получаемого массива ТЛО [142].

Благодаря большому разнообразию съемочных систем и способности устанавливать их на различные носители стало возможным производить оперативную съемку местности любой площади с требуемой точностью и детальностью, а также осуществлять повторные измерения в рамках мониторинга состояния объектов.

Это привело к повышению требований к методам камеральной обработки данных ДЗЗ, особенно учитывая тот факт, что цифровые методы полностью вытеснили аналоговые. Растет количество специализированного программного обеспечения (ПО), в состав которого включаются новые и усовершенствованные методы обработки данных, имеющих различную форму, точность и детализацию [160]. Если большинство такого ПО нацелено на обработку данных определенного типа, то другие могут работать с данными сразу нескольких типов за счет внедрения отдельных универсальных инструментов.

Особенностью разработки современного ПО является соблюдение требований к высокой скорости, качеству и автоматизации обработки данных ДЗЗ, чему способствует стремительное развитие средств вычислительной техники. В общем виде в независимости от типа данных ДЗЗ выделяют 2 этапа: предварительная и тематическая (специальная) обработка [160]. Предварительная обработка заключается в приведении исходных данных ДЗЗ к виду, когда их становится возможным использовать для решения определенной задачи, а тематическая – в интерпретации данных ДЗЗ в ходе ее решения.

Обработка данных ДЗЗ может быть разделена на большее число этапов, адаптированных к их определенному типу. Например, в [127, 139] для космических изображений описаны следующие этапы: предварительная обработка, первичная обработка, вторичная обработка, комплексная обработка.

Одним из следствий увеличения числа съемочных систем ДЗЗ, модернизации принципов выполнения пространственных измерений и появления новых программных средств, способных оперативно обработать информацию, является быстрое накопление данных, в результате чего их общий объем значительно увеличивается. Большой объем – это одна из основных характеристик данных ДЗЗ [267].

Решение задач обработки данных значительного многообразия и большого объема часто требует применения отдельной совокупности подходов, методов и инструментов с целью получения результатов, эффективно воспринимаемых человеком и применяемых им для достижения конечной цели. Для описания данных

большого объема, когда стандартные методы обработки использовать становится крайне затруднительно, во многих областях науки и техники широко начинает применяться термин «большие данные», который включает огромный массив разнообразной структурируемой и неструктурированной информации, а также затрагивает методы сбора, обработки, хранения, поиска, передачи, анализа и визуализации данных [114, 267]. В случае, если «большие данные» имеют географическую привязку, то их называю «большими геопространственными данными» [179, 222, 254].

«Большие геопространственные данные» обладают своим набором признаков, учет которых позволяет описать объекты, явления или процессы: пространственные, временные, семантические и признаки последовательности [254, 282].

Данные ДЗЗ являются одним из источников информации для формирования единого геопространства (ЕГП) [283]. Кроме данных ДЗЗ в его формировании могут принимать участие результаты других наземных геодезических измерений, картографические материалы и любая другая информация, позволяющая упростить решение задачи повышения точности и детальности построения цифровой модели местности (ЦММ), а также предоставляющая дополнительную семантическую информацию об объектах местности с целью более полного восприятия построенной ЦММ для решения задач определенной сферы жизнедеятельности. Сочетание различных видов пространственных данных с целью формирования ЕГП является одной из особенностей современного этапа развития методов ДЗЗ [229].

Стремительное усовершенствование методов сбора данных ДЗЗ, появление новых съемочных систем, развитие программных средств сбора и обработки полученной информации также требуют оперативного внесения изменений в актуальную нормативно-техническую базу. Одни разработанные нормативно-технические документы в области топографического картографирования по материалам ДЗЗ устарели, а другие были обновлены с большой задержкой [123, 124]. Например, ГОСТ, учитывающий особенности выполнения АФС с помощью современного оборудования, был опубликован в 2021 г. [66], а ГОСТ, регламентирующий требования по применению ЛС на автомобильных дорогах – только в 2023 г. [67]. В свою

очередь, инструкция по топографической съемке [42] до сих пор не претерпела изменений, она не учитывает специфики применения такого оборудования и обработки полученных результатов.

Таким образом, основными особенностями современного этапа развития методов ДЗЗ являются:

- появление новых видов съемочных систем: гиперспектральные аэрокосмические системы; аэрофотосъемочные комплексы и системы ВЛС, устанавливаемые на БВС; системы МЛС;
- значительное усовершенствование технических характеристик систем ДЗЗ: повышение пространственного разрешения у космических снимков, частоты зондирующих импульсов и частоты сканирования у систем ЛС и другое;
- внедрение новых систем измерений, таких как спутниковые и инерциальные;
- стремительное накопление данных ДЗЗ, требующее применения специальных методов обработки их большого объема («большие данные»);
- интеграция различных методов ДЗЗ;
- необходимость обновления существующей нормативно-технической базы.

1.4 Анализ перечня задач при развитии сферы транспортной инфраструктуры и опыт их решения с помощью методов ДЗЗ

Все задачи, решаемые при развитии сферы ТИ, можно разделить на несколько групп [181]:

- пространственное моделирование;
- инвентаризация, паспортизация и технический учет;
- мониторинг состояния ОТИ и транспортных потоков;
- интеллектуальный анализ пространственной информации.

Задачи, входящие в группы пространственного моделирования, мониторинга и интеллектуального анализа могут решаться на всех стадиях жизненного цикла

ОТИ, а инвентаризация, паспортизации и технического учета – на стадии эксплуатации. Для этого применяются различные методы сбора пространственных данных, в том числе методы ДЗЗ. На рисунке 1.3 приведена схема, показывающая связь методов ДЗЗ с группами задач, решаемых в сфере ГИ. Одни из решаемых задач не требуют выделения ОТИ, а другие подразумевают осуществление предварительного распознавания отдельных объектов.

Пространственное моделирование заключается в представлении информации о расположении объектов местности посредством построения их моделей и в возможности осуществления действий с ними. Моделирование в этом аспекте рассматривается в качестве формы отражения действительности. Построенные модели могут применяться для переноса полученных в ходе моделирования результатов и выполненных на их основе исследований на оригинальные расположенные на местности объекты [178].

Пространственное моделирование, выполняемое в цифровом виде, применяет средства компьютерной графики с целью визуализации моделей, описанных с помощью математических методов и программных средств (математическое моделирование). Визуализация необходима для упрощения понимания процессов любой сложности, для упрощения работы конечного пользователя, для исследования непредвиденных результатов анализа процессов, для прогнозирования, контроля и управления [38].

Результат пространственного моделирования чаще всего привязывается к определенной территории. Моделирование ОТИ выполняют с применением высокоточных координатных систем, которые устанавливают единое координатно-временное пространство в качестве общей системы отсчета на всех этапах жизненного цикла объектов инфраструктуры [195].

Если при отображении результатов моделирования в виде цифровых карт и планов, ортофотопланов используется система плоских координат, то создание трехмерных цифровых моделей рельефа и местности, ее профилей подразумевает применение функции трех координат, что способствует устранению неоднозначно-

сти при описании топографических характеристик определенного объекта местности, но приводит к резкому возрастанию объема обрабатываемой информации [107]. Отображение результатов моделирования на плоскости выполняется с помощью средств растровой или векторной графики и требует меньших вычислительных ресурсов по сравнению с созданием трехмерных цифровых векторных моделей. Еще больших вычислительных затрат требует создание геоинформационных моделей, которые описывают не только геометрические характеристики реального объекта и его положение на местности, но и содержат дополнительную конструкторскую, технологическую, экономическую или иную информацию, в частности информацию о взаимосвязях между отдельными объектами или составными частями одного объекта (информационное пространственное моделирование).



Рисунок 1.3 – Схема применения данных ДЗЗ для решения задач сферы ТИ

В зависимости от метода сбора данных выделяют три подхода к пространственному моделированию [181]:

- поточечный. Построение модели выполняется из отдельно измеренных точек, что характерно для наземных геодезических методов, таких как тахеометрическая съемка, съемка с помощью ГНСС-приемников;
- групповой. Моделирование выполняется в результате измерений группы точек по стереопарам фотоснимков, полученным с помощью пассивных методов ДЗЗ;
- массовый. Процесс моделирования происходит по массиву ТЛО, полученному с помощью активных методов ДЗЗ.

Результаты пространственного моделирования также могут быть представлены в геоинформационных системах (ГИС) в виде тематических и топографических карт, планов, трехмерных моделей, имеющих географическую привязку. Такой вид моделирования называют геоинформационным.

Геоинформационное моделирование ОТИ имеет свои особенности:

- массовое моделирование всех ОТИ, а не только отдельных объектов;
- сбор целевой информации в пределах буферной зоны, которая задается вокруг линейно-протяженного объекта, такого как автомобильная дорога или железнодорожный путь, на основе пространственной модели, построенной по результатам измерений на местности. Процесс измерений всех объектов в пределах буферной зоны называют съемкой инфраструктурных коридоров. Инфраструктурные коридоры представляют собой составные части пространственной модели, связывающие несколько дорожных или городских зон [251];
- построение пространственной модели транспортного коридора. Транспортный коридор включает только те объекты, которые влияют на процесс движения транспорта. Построение моделей объектов, удаленных от линейно-протяженного объекта и не влияющих на движение, выполняется отдельно [226];
- большой объем информации при массовом подходе к пространственному моделированию.

Примеры решения задачи пространственного моделирования в сфере ГИ интерактивным способом приведены в [28, 147, 157, 189]. В [189] описан процесс составления кадастровых планов автомобильных дорог по данным АФС. В [147] представлен результат создания топографического плана автомобильной дороги по данным НЛС, а в [28] – по данным МЛС для железной дороги.

Пример решения задачи пространственного моделирования автоматизированным способом приведен в [34].

В работе [109] изложен процесс распознавания по наземным фотоснимкам с помощью нейронных сетей, которые позволяют локализовать дорожные знаки, светофоры, дорожное полотно, пешеходные переходы, автомобили. Подобные разработки также ведутся в рамках проектирования и создания наземных беспилотных транспортных средств, когда распознавание объектов должно осуществляться в реальном времени.

Нейронные сети также могут использоваться при распознавании ОТИ по космическим фотоснимкам [287]. Для городских территорий, где необходимо распознавать большое количество объектов, предпочтительнее использовать гиперспектральные снимки.

Распознавание ОТИ может выполняться в трехмерном пространстве по массиву точек. В работе [275] приведен обзор методов распознавания различных объектов в трехмерном массиве точек, а также предложена методика распознавания, позволяющая выделить большинство ОТИ.

Задачи инвентаризации, паспортизации и технического учета решаются на стадии эксплуатации для определения состояния транспортных путей и сооружений, для вычисления протяженности дорог, с целью идентификации ОТИ. Инвентаризация – это непрерывный процесс сопровождения ввода в эксплуатацию новых объектов и участков, обследования действующих и устранение устаревших [101].

Согласно стандарту [58] при паспортизации автомобильных дорог решаются следующие задачи: определение геометрических характеристик автомобильных дорог, таких как ширина земляного полотна, проезжей части, обочин; определение

типа покрытия, его состояния и конструкции дорожной одежды; составление продольного профиля; создание планов дорог; визуальная оценка состояния дорожных одежд и дорожных покрытий; визуальная оценка состояния земляного полотна и водоотвода; оценка продольной ровности дорожных покрытий; оценка прочности дорожных одежд; учет интенсивности движения и состава транспортного потока; оценка сцепных качеств дорожных покрытий; оценка поперечной ровности (колеиности) дорожного покрытия; определение категории дороги; обследование мест концентрации ДТП; обследование развязок, съездов, пересечений дорог; оценка расположения разметки и дорожных сооружений, таких как дорожные знаки, ограждения, сигнальные столбики и другие; определение габаритов приближения строений; оценка видимости в продольном профиле и плане; определение дефектов автомобильных дорог, включая величины колеиности; размеры сетки трещин, выкрашивания, выпотевания, шелушения; размеры выбоин, проломов, просадков; неровности ямочного ремонта; размеры сплошного разрушения дорожного покрытия; величины сдвига, гребенки и волны; вертикальные смещения дорожных плит; размеры разрушения кромки покрытия.

При паспортизации железных дорог решаются задачи [140]: составление ведомостей железнодорожных путей и определение их технического состояния, дефектов; вычисление габаритов приближения строений; измерение положения рельсовых нитей и междупутных расстояний; составление продольных и поперечных профилей; оценка видимости в продольном профиле и плане; создание планов дорог.

Современный опыт применения данных ДЗЗ для решения задач паспортизации весьма велик. В работах [225, 234, 263] приведены методики автоматической векторизации объектов дорожной сети по мультиспектральным космическим снимкам городских территорий.

Для решения задачи распознавания типа и характеристик дорожного покрытия широкое применение находят гиперспектральные изображения, по результатам дешифрирования которых составляют спектральные библиотеки, позволяющие выполнить более глубокий анализ дорожного полотна [241].

Полностью оценить состояние дорожного покрытия, выявить все его дефекты, такие как трещины, выбоины, сдвиги, колейность, проломы, ямы, наличие посторонних предметов в теле дорожного покрытия [149], позволяет комплексное применение различных систем. В работе [284] описана методика совместной обработки данных гиперспектральной АФС и НФС. Большой точности и уровня автоматизации позволяют добиться системы, которые ведут одновременную съемку с помощью различных датчиков. В работе [271] приведена методика оценки состояния дорожного покрытия по данным наземной мультисенсорной системы, в состав которой входят цифровая камера, спектрометр и лазерный сканер. Спектрометр позволяет оценить старение и износ дорожного покрытия. Лазерный сканер применяется для поиска крупных дефектов дорожного полотна: выбоины, проломы, колейность и ямы. Цифровая камера применяется для выявления трещин.

В [236] для решения задач паспортизации железных дорог применяются данные АФС с БВС. Построенные по ним трехмерные модели могут служить для определения деформаций рельс, обнаружения возможных столкновений подвижных составов с окружающими объектами путем симуляции их движения [257].

Следующая группа задач, решаемая в сфере ТИ – это мониторинг состояния ОТИ и транспортных потоков. Любая ТИ предполагает выполнение повторных измерений в ходе мониторинга с целью обнаружения и фиксации произошедших изменений в ее объектном составе. Мониторинг состояния ОТИ необходим для осуществления их оптимальной эксплуатации, оперативного контроля вследствие их устаревания. В ходе мониторинга выполняется моделирование жизненного цикла объектов, при котором решаются задачи определения технического состояния ОТИ, отслеживания изменений в их характеристиках с течением времени и в конфигурации всей транспортной сети, а также прогнозирование возможных изменений. Мониторинг позволяет своевременно предупреждать и выявлять угрозы природного и техногенного характера [118].

Создание системы мониторинга в сфере ТИ является необходимым условием ее функционирования. Система мониторинга в итоге должна предотвращать все

возможные угрозы состоянию ОТИ. Основными задачами такой системы являются:

- реализация функций сбора, обработки, хранения, анализа и передачи информации о состоянии ОТИ;
- создание общего информационного пространства в системе мониторинга с помощью аппаратных и программных средств;
- прогнозирование изменений в состоянии ОТИ и угроз со стороны естественных факторов;
- информационная поддержка при принятии мер по выявлению, предупреждению и прогнозированию неисправностей;
- обеспечение безопасности функционирования ОТИ;
- ведение информационной базы данных для решения задач управления ОТИ.

На основе выполненного анализа перечня задач, решаемых при развитии сферы ТИ, можно сделать вывод, что для ее эффективного управления необходимо учитывать множество составляющих и то, что основой контроля состояния ОТИ являются результаты измерений на местности с помощью различных методов сбора пространственных данных. Выбор оптимальных методов сбора пространственных данных и, в частности, ДЗЗ зависит от множества факторов, которые определяются особенностями решаемой задачи.

1.5 Обоснование выбора оптимальных методов ДЗЗ для решения задач сферы транспортной инфраструктуры

Каждый из методов ДЗЗ обладает своими особенностями, которые необходимо учитывать на этапе выбора оптимального с целью решения определенной задачи сферы ТИ. Нормативная точность и оперативность выполнения измерений – это основные критерии, которые необходимо учитывать при выборе оптимального метода ДЗЗ. Нормативным требованиям должны соответствовать результаты измерений, выполняемых на всех стадиях жизненного цикла ОТИ. В то же время с це-

люю снижения трудоемкости работ и снижения их себестоимости такие измерения должны быть выполнены за короткий промежуток времени, что обеспечивается за счет высокой скорости сбора данных при большом территориальном охвате.

При выполнении изысканий на стадиях планирования и проектирования руководствоваться необходимо в первую очередь требованиями ГОСТ 32869–2014 [51] и ГОСТ 32836–2014 [49], описывающими необходимые масштабы топографической съемки, по результатам которой создают топографические планы и карты, продольные и поперечные профили. При составлении топографических планов руководствуются погрешностями, указанными в СП 11-104-97 [163], исходя из которых для объектов плановые погрешности не должны превышать 25 см и 6 см по высоте [173].

На этапе создания проектной документации для строительства автомобильных дорог чертежи в виде планов, продольных и поперечных профилей в зависимости от характеристик участка трассы, определяемыми уровнем застроенности территории и типом рельефа, согласно ГОСТ 21.701-2013 [47] создаются в масштабах, указанных в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Масштабы чертежей, составляемых для территорий автомобильных дорог

Наименование чертежа	Масштаб чертежа
Продольный профиль	По горизонтали 1: 1 000 – 1: 5 000 По вертикали 1: 100 – 1: 500
Поперечный профиль земляного полотна дороги и конструкции дорожной одежды	1: 50 – 1: 200
Продольный профиль водоотводной и нагорной канав	По горизонтали 1: 2000 – 1: 5 000 По вертикали 1: 200 – 1: 500
Продольный профиль водосброса	1: 100 – 1: 500
План	1: 200 – 1: 2 000
Схема расположения технических средств организации дорожного движения	1: 200 – 1: 1 000

На этапе создания проектной документации для строительства железных дорог чертежи в виде планов, продольных и поперечных профилей приведены в ГОСТ 21.702-2013 [48]. Рекомендуемые масштабы чертежей показаны в таблице

1.3. Выбор масштаба определяется уровнем застроенности территории и участка железной дороги – станция, перегон или переезд. Например, на переездах выполняются съемки масштаба 1: 500 [140].

При создании проектной документации для ремонта и реконструкции железных дорог выполняется съемка ОТИ от пунктов съемочного обоснования (ПВО), закладываемых вдоль платформ, подпорных стенок, оттяжек опор и других объектов. Согласно распоряжению № 2888/р [140] СКО взаимного положения смежных пунктов ПВО в плане и по высоте не должны превышать 4 мм. Точность съемки связана с масштабом требуемого для составления топографического плана. Однако, на железных дорогах погрешности определения координат элементов станционной ситуации и путевого развития не связаны с масштабом топографического плана. Согласно ВСН 208-89 [41], они не должны превышать 6 см вдоль путей и 2 см поперек путей. Съемка железнодорожных путей в высотном положении должна выполняться в соответствии с нормами точности технического нивелирования, при котором невязка высотных измерений в миллиметрах допускается не более $30\sqrt{L}$ на станциях и $50\sqrt{L}$ на остальных участках, где L – длина нивелирного хода в километрах [140]. Согласно [170] погрешность определения оси пути не должна превышать 10 мм, а продольных уклонов – 0,1 ‰.

Таблица 1.3 – Масштабы чертежей, составляемых для территорий железных дорог

Наименование чертежа	Масштаб чертежа
Продольный профиль железнодорожных путей	По горизонтали 1: 1 000 – 1: 10 000 По вертикали 1: 100 – 1: 500
Поперечный профиль земляного полотна железнодорожных путей	1: 50 – 1: 200
Продольный профиль по водоотводным сооружениям	По горизонтали 1: 1 000 – 1: 10 000 По вертикали 1: 100 – 1: 500
План железнодорожных путей	1: 500 – 1: 5 000

Отдельно стоит выделить задачу создания обмерных чертежей зданий, в частности объектов культурного наследия, решаемой на этапе проектирования их ре-

монта и реконструкции. Такие чертежи могут составляться для отдельных значимых ОТИ. Согласно ГОСТ 56905–2016, предельная погрешность при их составлении зависит от выбранного масштаба [59]: до 1: 20 – 1–2 мм; 1: 50 – 2–5 мм; 1: 100 – 10–20 мм; 1: 200 – 30–50 мм; 1: 500 – 200–300 мм.

На стадии эксплуатации для инфраструктуры автомобильного транспорта большинство задач решается в ходе систематической диагностики дорог, от качества выполнения которой и осуществленного на ее основе ремонта зависит их безопасная эксплуатация [37]. Согласно отраслевому методическому документу ОДМ 218.4.039–2018 [129], диагностика разделяется на следующие виды:

- полная, выполняемая для определения всего комплекса характеристик дорог для оценки их фактического технического уровня и эксплуатационного состояния;
- приемочная, выполняемая при сдаче дороги в эксплуатацию после осуществления цикла работ;
- плановая, выполняемая при определении эксплуатационных характеристик состояния дороги с заданной периодичностью с целью определения необходимости выполнения ремонтных работ;
- специализированная, выполняемая на предназначенных для ремонта или реконструкции участках автомобильных дорог с целью выявления комплекса характеристик состояния дорог, необходимого для определения причин их несоответствия установленным нормативным требованиям.

В нормативных документах [49, 52–57, 60, 64, 129] приведены требования к точности получения данных о различных элементах ТИ автомобильных дорог, которые систематизированы в таблице 4.1. Указанные значения охватывают различные условия выполнения измерений и применяемые методы.

Также приводятся требования для съемки железнодорожных станций при их строительстве, ремонте и реконструкции с целью составления масштабных планов [182]. Методы съемки должны обеспечивать точность определения координат объектов станции масштаба 1: 1 000, то есть не грубее 0,1 м.

Таблица 1.4 – Точность измерений объектов инфраструктуры автомобильного транспорта

Показатель	Погрешность и точность			Нормативный документ	
	Плановое положение	Высотное положение	Пространственное положение		
1	2	3	4	5	
Координаты инженерного обустройства	100 см			ОДМ 218.4.039–2018	
Координаты километровых столбов	100 см				
Ширина проезжей части	10 см				
Ось дороги	В соответствии с точностью топографического плана масштаба 1: 2 000				
Расстояние видимости	1 %, 0,1 м			ГОСТ 32963–2014	
Пройденный путь	0,05 ‰			ГОСТ 33383–2015	
Продольные уклоны			0,2–2 %		
Поперечные уклоны			0,3–2,0%		
Углы поворота трассы	0,04–0,4°				
Измерение размеров	0,5–2,0 %	1–3 %			
Радиусы кривых	0,5–2,0 %	1–2 %		ГОСТ 32825-2014	
Сдвиг, волна, гребенка	10 см	0,1 см			
Выбоины, просадки, проломы	1 см	0,1 см			
Неровности ямочного ремонта	–	0,1 см			
Сетки трещин, выкрашивания, выпотевания, шелушения, отдельные трещины	10 см	–			
Вертикальное смещение дорожных плит		0,1 см			
Глубина колеи		0,1 см			
Разрушение кромки покрытия	10 см				
Толщина дорожной одежды		0,4–1 см			ГОСТ Р 58349-2019
Сплошное разрушение дорожного покрытия	10 см				ГОСТ 32825-2014
Продольная ровность		0,05–0,5 см		ГОСТ 33101-2014, ГОСТ Р 56925-2016	
Геометрические параметры опор дорожных сооружений			0,1–2 см	ГОСТ 32948-2014	
Размеры разметки	1–10 см			ГОСТ 32953-2014	

В таблице 1.5 приведены значения точности основных измерений объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Таблица 1.5 – Точность измерений объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта

Показатель	Погрешность и точность			Нормативный документ
	Плановое положение	Высотное положение	Пространственное положение	
Железнодорожные пути		5 см на 1 км нивелирного хода		Распоряжение ОАО "РЖД" от 12 декабря 2021 г. № 2888/р
Железнодорожные пути на станциях		3 см на 1 км нивелирного хода		
Разбивка пикетажа (линейные измерения)			10 см на 100 м (1:1000 относительная точность)	Методические указания ОАО "РЖД" № ЦПТ-54/26 от 17.12.2008
Ось пути			10 мм	Распоряжением ОАО "РЖД" № 75р от 18.01.2013, редакция от 17.07.2017
Продольные уклоны			0,1 ‰	
Определение координат элементов станционной ситуации и путевого развития			6 см вдоль путей, 2 см поперек путей	ВСН 208-89
Габариты приближения строений			1 см	ГОСТ 9238-2013
Местоположение объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта			Первые миллиметры-сантиметры в зависимости от вида выполняемых работ	СП 233.1326000.2015
Съемка объектов железнодорожных станций для создания масштабных планов	0,1 см			ЦПТ-54/27

Таким образом, на основе выполненного анализа в 1.2 и 1.5, можно сделать вывод, что для решения метрических задач на всех стадиях жизненного цикла ОТИ относительная точность измерений должна быть не хуже 1 мм, а абсолютная 2 см. Такую точность способно обеспечить НЛС и при определенных условиях МЛС.

Для решения большинства задач стадии проектирования, кроме составления обмерных чертежей, необходима точность измерений не ниже 6 см, которую могут обеспечить все методы ЛС, а также методы АФС и НФС. В свою очередь, не все из оптимальных по точности методов могут соответствовать критерию оперативности. Поэтому требуется определить, какой из методов сбора пространственных данных в пределах площади всей съемочной территории наиболее оперативно решает отдельную поставленную задачу с допустимой точностью, удовлетворяющей нормативным требованиям.

С целью упрощения задачи определения оптимального метода ДЗЗ с точки зрения критериев нормативной точности и оперативности предлагается классификация требуемой точности (таблица 1.6), согласно которой для решения отдельных задач сферы ТИ могут применяться все указанные на рисунке 1.2 методы.

Таблица 1.6 – Классификация требуемой точности для решения научно-технических задач дорожной отрасли

Класс точности	Значения точности в плановом или пространственном положении, см	Значения точности в высотном положении, см
1	< 1	< 0,1
2	1–2	0,1–1
3	2–10	1–6
4	10–25	6–33
5	25–30	
6	30–50	
7	50–100	6–66
8	100–500	12–166
9	>500	> 166

Выполненный анализ перечня задач в сфере ТИ и приведенные примеры современного применения данных ДЗЗ показывают, что не каждую задачу всегда можно решить с применением только одного метода. Зачастую требуется применение комплексного решения, подразумевающего использование разновременных однородных или разнородных пространственных данных, полученных различными системами ДЗЗ и средствами наземных геодезических измерений. Также сочетание пространственных данных позволяет не только решить какую-либо отдельную за-

дачу, но и повысить точность и достоверность такого решения. В таблице 1.7 приведен сформированный перечень задач сферы ТИ на различных стадиях жизненного цикла ОТИ, список методов, которые оптимальны для решения каждой из них.

Результаты съемки с помощью альтернативного метода ДЗЗ также могут быть применены для оперативного решения определенной задачи с точностью, соответствующей нормативным требованиям, но в совокупности уступают результатам основного. То есть скорость сбора и обработки данных альтернативного метода или их точность ниже, чем основного. Выбор альтернативного метода вместо основного обосновывается дополнительными критериями:

- ниже доступность оборудования для осуществления съемки с помощью основного метода ДЗЗ;
- ограничение доступа на территорию ОТИ для съемки с помощью основного метода ДЗЗ;
- наличие архивных материалов, полученных по результатам съемки с помощью альтернативного метода и актуальных для решения требуемой задачи;
- необходимость совместного решения нескольких задач сферы ТИ, когда могут быть использованы результаты съемки с помощью одного альтернативного метода или нескольких основных. Применение одного альтернативного метода позволяет более оперативно, менее трудоемко, с меньшей себестоимостью решить поставленную задачу, чем использование нескольких основных.

Досъемка с помощью дополнительного метода ДЗЗ применяется, когда данных основного оказывается недостаточного для решения определенных задач, что связано с наличием теневых зон. К таким задачам относятся:

- топографическая съемка в пределах полосы отвода, результаты которой применяются для создания топографических и разбивочных планов, поперечных профилей;
- определение геометрических параметров автомобильных дорог;
- создание обмерных чертежей ОТИ.

Таблица 1.7 – Оптимальные методы ДЗЗ для решения задач сферы ТИ

Стадии жизненного цикла ОТИ	Задача	Характеристики территории	Основной метод (классы точности)	Альтернативный метод	Метод досъемки
1	2	3	4	5	6
Планирование и проектирова- ние строитель- ства (предпро- ектные изыска- ния)	Определение координат характерных точек гра- ниц земельных участков (приказ Росреестра от 23 октября 2020 года № П/0393) для составления кадастровых планов	–	КС/АФС/НЛС/МЛС/ВЛС в зависимости от катего- рии земель и их площади (3–8)	–	–
	Выявление участков с развитием опасных и тех- ногенных процессов (ГОСТ 32869)	–	КС/АФС/МЛС/ВЛС в за- висимости от масштаба съёмки, характеристики участков трассы (3–8)	–	–
	Топографические карты для получения нагляд- ной информации и определения полосы варьиро- вания в масштабе 1: 25 000 – 1: 100 000 (ГОСТ 32869)	Без растительности	КС (9)	АФС	–
		Покрытая растительностью	КС (9)	ВЛС	
	Топографические карты и планы для определе- ния сложных участков, предварительного поло- жения притрассовой полосы, трассы и полосы отвода в масштабе 1: 2 000 – 1: 25 000 (ГОСТ 32869)	Без растительности	КС (7–9)	АФС/МЛС в зависимости от площади съёмки и про- тяженности участка	–
Покрытая растительностью		ВЛС (7–9)	КС/МЛС в зависимости от площади съёмки и про- тяженности участка		
Планирование и проектирова- ние строитель- ства (проектно- изыскатель- ские работы), эксплуатация	а) Топографические планы (ГОСТ 32836–2014): 1) сложных участков (высокие насыпи, глубокие выемки, площадки под здания и сооружения и т.д.) и других отдельных мест (автобусных оста- новок, искусственных сооружений, проходящие по населенным пунктам участки трасс) в мас- штабе 1: 200 – 1: 5 000; 2) переходов через дороги в масштабе 1: 500 – 1: 2 000; 3) переходов через реки и водные препятствия в масштабе 1: 1 000 – 1: 5000; 4) проблемных участков автомобильных дорог в масштабе 1: 500 – 1: 5 000;	Незастроенная тер- ритория без растительности	АФС (3–8)	МЛС/НЛС в зависимости от площади съёмки и про- тяженности участка	МЛС/НЛС в зависимости от площади съёмки и про- тяженности участка
		Незастроенная территория, покры- тая растительно- стью	ВЛС (3–8)	МЛС/НЛС в зависимости от площади съёмки и про- тяженности участка	АФС/МЛС/ НЛС/ВЛС в зависимости от площади съёмки и про- тяженности участка

Продолжение таблицы 1.7

1	2	3	4	5	6
	б) Разбивочный план трассы в масштабе 1: 500 – 1: 2 000 (для строительства), поперечные профили земляного полотна, конструкции дорожной одежды; продольные профили автомобильных, железных дорог и канав; планы автомобильных и железных дорог в масштабе 1: 500 – 1: 2 000 (ГОСТ 21.701–2013, ГОСТ 21.702–2013)	Застроенная территория	МЛС (3–8)	ВЛС/НЛС в зависимости от площади съемки и протяженности участка	АФС/ВЛС/МЛС/НЛС в зависимости от площади съемки и протяженности участка
Проектирование строительства (проектно-изыскательские работы), ремонта и реконструкции	Ситуационный план размещения трассы в масштабе 1: 5 000 – 1: 25 000 (для строительства) (ГОСТ 32836)	–	КС (8–9)	АФС/МЛС в зависимости от площади съемки и протяженности участка	–
	а) Топографические планы (ГОСТ 32836): 1) вариантов трассы, принятых к проектированию, в масштабе 1: 1 000 – 1: 2 000 – на этапе подготовки проектной документации; 2) полосы местности вдоль трассы, площадок под карьеры строительных материалов в масштабе 1: 500 – 1: 1 000 – на этапе подготовки рабочей документации; б) Определение габаритов приближения строений на автомобильных и железных дорогах, геометрических параметров проезжей части и земляного полотна – проектная документация для ремонта и реконструкции (ГОСТ 32836–2014, распоряжение ОАО "РЖД" от 12 декабря 2021 г. № 2888/р)	Незастроенная территория без растительности	АФС (8–9)	МЛС	–
		Незастроенная территория, покрытая растительностью	ВЛС (8–9)	МЛС	–
		Застроенная территория	МЛС (8–9)	ВЛС	–
	Цифровые навигационные карты (Приказ Минэкономразвития России от 1 октября 2010 года № 464)	–	КС (8–9)	АФС/ВЛС/МЛС в зависимости от площади съемки	–
	Обмерные чертежи зданий и сооружений – на этапе подготовки проектной документации (ГОСТ Р 56905)	–	НЛС (2–5)	МЛС/ВЛС в зависимости от вида обмера, требуемой точности и детализации	НФС/НЛС в зависимости от обмера, требуемой точности и детализации
Строительство, реконструкция, ремонт	Контроль качества строительства дорог (ровности дорожных оснований) (СП 78.13330.2012). Измерение толщины дорожной одежды (ГОСТ Р 58349.)	–	НЛС (1)	МЛС	–
	Исполнительные чертежи построенных участков дорог в масштабе 1: 500 – 1: 1 000 (ГОСТ 32836)	Незастроенная территория без растительности	АФС (5–6)	МЛС	–

Окончание таблицы 1.7

1	2	3	4	5	6
		Незастроенная территория, покрытая растительностью	ВЛС (5–6)	МЛС	–
		Незастроенная территория без растительности	МЛС (5–6)	ВЛС	–
	Масштабные планы ж/д станций (ЦПТ-54/27), ситуационный план (ГОСТ 32836)	–	АФС (3)	МЛС	–
Эксплуатация	Паспортизация автомобильных дорог (визуальная оценка состояния дорог, определение геометрических параметров дорог, оценка поперечной и продольной ровности дорожного покрытия дорог) (ГОСТ 33383). Фиксирование дефектов дорожного полотна (ГОСТ 33220). Создание баз данных о состоянии дорог (ОДМ 218.9.008–2019). Диагностика и оценка технического состояния автомобильных дорог (ОДМ 218.4.039–2018). Определение продольной (ГОСТ 33101) и поперечной (ГОСТ 32825) ровности дорожных покрытий. Определение геометрических параметров автомобильной дороги (ГОСТ 33383). Паспортизация железных дорог (распоряжение ОАО "РЖД" от 12 декабря 2021 г. № 2888/р)	–	МЛС/НЛС в зависимости от протяженности (1–7)	–	ВЛС
	Измерение расстояния видимости на автомобильных дорогах общего пользования (ГОСТ 32963) и на железных дорогах (приказ Министерства транспорта РФ от 23 июня 2022 г. № 250)	–	МЛС (3)	ВЛС	–
	Геотехнический мониторинг сооружений инженерной защиты автомобильных дорог, при строительстве земляного полотна на слабых грунтах (ГОСТ 24846–2019). Геодезические наблюдения за деформациями автомобильных дорог и искусственных сооружений на них в полосе отвода на территориях с развитием опасных природных и техноприродных процессов (ГОСТ 32869)	–	НЛС (1, 2)	МЛС	–

При выборе оптимального основного, альтернативного или метода досъемки для решения отдельных задач также следует учитывать следующие вспомогательные критерии: протяженность и площадь участка съемки, уровень застроенности территории, наличие сплошного покрова растительности от 0,5 м высоты, категория земель, вид обмера и требуемая детализация объекта. В таблице 1.7 под застроенной подразумевается территория, где площадь занимаемых строений составляет более 5%. В противном случае территория считается незастроенной.

В случае, если необходимо применение комплексного решения, подразумевающего использование различных методов сбора пространственных данных, требуется осуществить разработку принципов и методологии их интеграции, которая может быть выполнена двумя способами:

- представление в единой базе различных наборов обработанных геопространственных данных в форме пространственно-информационных моделей (ПИМ), где каждая ПИМ отвечает за решение определенной задачи сферы ТИ;

- объединение различных геопространственных данных в форме гибридной геопространственной модели (ГПМ), используемой для решения конкретных задач.

Если в первом случае выполняется независимая обработка геопространственных данных, то во втором – их совместный анализ, для чего требуется осуществлять распознавание отдельных объектов и их элементов. Независимая обработка геопространственных данных подразумевает разработку системы технологических решений сбора и предварительной обработки данных ДЗЗ для формирования ПИМ, а совместный анализ – систему методик интеграции данных ДЗЗ для формирования гибридных ГПМ.

1.6 Выводы по первому разделу

Формирование ГПМ является современной тенденцией развития сферы ТИ в условиях ее цифровой трансформации. По ГПМ можно выполнять непосредствен-

ные измерения с целью извлечения необходимой информации в рамках решаемой задачи и создания требуемой цифровой продукции. Источником создания ГПМ являются различные виды пространственных данных, среди которых основными являются методы ДЗЗ.

Выполненный анализ всех существующих методов сбора пространственных данных выявил набор методов, которые могут быть применены для решения большинства задач сферы ТИ на различных стадиях жизненного цикла ОТИ. Анализ современного этапа развития методов ДЗЗ выявил ряд особенностей, которые необходимо учитывать при разработке технологии геопространственного моделирования территории ТИ и ряда технологических решений и методик обработки данных ДЗЗ. Такие особенности связаны с появлением новых съемочных систем, совершенствованием их технических характеристик, накоплением большого объема получаемых данных и частой необходимостью их совместной обработки – осуществлении процесса интеграции.

Детальный анализ перечня задач при развитии сферы ТИ и современные примеры применения методов ДЗЗ для их решения показали, что основой геопространственного и, в частности, геоинформационного моделирования ОТИ является правильный подбор наиболее подходящего метода измерений на местности, а при определенных условиях и задачах – их комплекса. Выбор оптимальных методов сбора пространственных данных в условиях учета специфики решаемой задачи позволяет осуществлять эффективное управление сферой ТИ.

Все выбранные методы сбора пространственных данных должны соответствовать критерию нормативной точности. Приведенные требования к точности решения отдельных задач сферы ТИ определили круг подходящих для этого методов.

Оперативность выполнения измерений является еще одним немаловажным критерием при геопространственном моделировании территорий. По результатам теоретического анализа выявлен широкий круг методов ДЗЗ, удовлетворяющих в совокупности как критерию оперативности, так и нормативной точности для создания ГПМ, соответствующей определенной стадии жизненного цикла ОТИ. Было

определено, в какой ситуации необходимо применять комплекс методов ДЗЗ, а когда достаточного данных съемки, выполненной единственным методом. Применение комплекса методов ДЗЗ необходимо при топографической съемке, когда требуется получение результатов плановых и высотных измерений в пределах полосы отвода с целью создания топографических и разбивочных планов, поперечных профилей. Дополнительно комплекс методов ДЗЗ может использоваться при определении геометрических параметров автомобильных дорог, создании обмерных чертежей отдельных ОТИ, имеющих сложную конфигурацию.

Также было выявлено, что на принятие решения о выборе оптимального метода ДЗЗ или их комплекса в рамках определенной задачи оказывают влияние не только критерии нормативной точности и оперативности, но и такие как протяженность и площадь участка съемки, уровень застроенности территории, наличие сплошного покрова растительности от 0,5 м высоты, категория земель, вид обмера. Совместный анализ этого списка критериев, существующих методов ДЗЗ и перечня задач сферы ТИ позволил сформировать для каждой задачи список оптимальных методов, где в виде набора альтернативных методов учитываются дополнительные критерии: доступность оборудования, ограничения доступа на территорию, наличие архивных материалов, необходимость совместного решения нескольких задач.

Анализ выполненных теоретических исследований показал, что для учета всех современных тенденций развития сферы ТИ необходима разработка универсальной технологии геопространственного моделирования территории по данным ДЗЗ, обеспечивающая решение всех научно-технических задач отрасли. Разработка этой технологии должна выполняться на базе единой структуры в едином координатном пространстве. Для обеспечения этого процесса требуется выполнять интеграцию пространственных данных в это пространство, для чего необходимо разработать соответствующую методологию интеграции.

2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОГО ГЕОПРОСТРАНСТВА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

2.1 Методологические принципы интеграции данных ДЗЗ

Каждый из методов ДЗЗ обладает своими особенностями. Не существует такого метода, который позволил бы решить все задачи сферы ГИ, а также построить точную и детализированную ЦММ со всеми необходимыми характеристиками, которая содержала бы информацию обо всех объектах местности и их отдельных элементах. Если при съемке с воздуха методы ДЗЗ позволяют построить ЦМР и цифровую модель поверхности (ЦМП) с равномерной плотностью с определенным значением точности, то методы ДЗЗ, осуществляемые сбор данных с земли, обеспечивают непостоянный уровень плотности и точности, что связано со значительным изменением дальности от сенсора до объектов съемки. ДЗЗ, выполняемое аэрокосмическими методами, позволяет получить наиболее полную информацию о горизонтальных поверхностях, таких как крыши зданий и сооружений, рельеф. В свою очередь, при выполнении ДЗЗ наземными методами обеспечивается получение информации о вертикальных поверхностях, в частности фасадах зданий, о небольших вертикальных объектах, таких как дорожные знаки, опорные сооружения, светофоры. Наземные методы также позволяют получить информацию о любых объектах, расположенных под кронами деревьев [250].

Указанные особенности сбора данных ДЗЗ подтверждают необходимость разработки комплексной технологии по их применению. С учетом возрастающих в стране темпов строительства и ремонта путей сообщения различных видов транспорта повышается роль научных исследований на тему подбора оптимальной группы методов ДЗЗ при решении конкретной задачи и построения на их основе ЦММ с максимально возможным уровнем точности и детализации [246]. Разработка теоретических основ сбора и обработки данных ДЗЗ и методологии их инте-

грации позволяет как усовершенствовать существующие технологии и отдельные технологические решения во многих сферах производства, так и разработать новые. Формирование ЕГП ОТИ является основой всех таких разработок. Применение данных ДЗЗ при формировании ЕГП ОТИ требует соблюдения следующих основных принципов интеграции пространственных данных:

- интегрированности, заключающийся в осуществлении интеграции пространственных данных в том случае, если применение одного вида данных не позволяет решить поставленные задачи;

- системности, предполагающий применение взаимосвязанной системы технологических решений, включая методы, методики, алгоритмы сбора и обработки пространственных данных, в рамках единой технологии;

- единства измерений, подразумевающий представление различных наборов пространственных данных в принятых единицах измерения и в единой системе координат;

- достоверности данных, основанный на необходимости исключения ложных измерений и ошибок в пространственных данных до начала процесса интеграции с целью установления соответствия точности обработанных данных нормативным требованиям при решении определенной задачи в соответствии с предложенной классификаций нормативной точности;

- оптимальности, определяющий наиболее подходящий набор методов сбора пространственных данных и применяемого оборудования для решения конкретной группы задач в зависимости от внешних условий измерений и особенностей конкретной местности;

- достаточности, при интеграции различной пространственной информации образуется система «больших данных», одним из путей обработки которой является выделение достаточного набора данных для решения той или иной научно-технической задачи;

- согласованности, заключающийся в том, что все применяемые методы сбора пространственных данных и методики обработки полученной информации

должны быть согласованы друг с другом с целью снижения трудоемкости решения производственной задачи;

– гибкости, представляющий собой возможность адаптации разработанных технологических решений и методик к специфике определенной производственной задачи;

– динамичности, определяющий возможность модернизации разработанных технологических решений и методик с учетом прогресса технических средств сбора и обработки пространственных данных, а также с целью достижения соответствия современным требованиям экономики;

– преемственности, заключающийся в том, что при разработке новых технологических решений должен учитываться существующий опыт.

2.2 Теоретические основы сбора и обработки данных ДЗЗ для формирования единого геопространства объектов транспортной инфраструктуры

Формирование ЕГП ОТИ представляет собой комплексный процесс, включающий в себя сбор и обработку данных с целью получения геопространственной информации, создания ГПМ, их анализ и выработку пространственных решений.

Сущность формирования ЕГП описывается комплексной функцией F , осуществляющей серию преобразований на множестве геопространственных данных D

$$EGP = \{F, D\}, \quad (2.1)$$

где $F = \{F_{ss}, F_g, F_e, F_s, F_i, F_m, F_{m2}, F_{m2}, F_a, F_r, F_n\}$;

$D = \{G, E, S, I, M, N, A, R\}$;

G – решение о целесообразности полевого сбора первичных данных;

E – решение о выборе оптимальных моделей геодезического оборудования;

S – первичные данные о территории;

I – геопространственная информация (ПИМ);

M – ГПМ;

N – цифровая продукция;

A – результаты пространственного анализа;

R – пространственные решения.

Первичные данные S разделяются на геометрические D_g , семантические D_s , топологические D_t и идентификационные D_i . Они отображают пространственные C_p и непространственные C_{np} свойства объектов территории. Геометрические данные описываются пространственными свойствами, семантические и идентификационные – непространственными, а топологические – обоими видами свойств.

Геометрические данные могут быть представлены в виде снимков или множества точек

$$D_g = \{P_M, T_l\}, \quad (2.2)$$

где P_M – снимки;

T_l – множество точек.

Снимки представляют собой двумерную матрицу, элементами которой являются яркости. Многоспектральный снимок P_M , как более сложный вид представления данных, состоящий из k изображений $P^{(k)}$, можно представить в виде матрицы

$$P_M = \begin{bmatrix} \bar{P}_{11} & \bar{P}_{12} & \dots & \bar{P}_{1M} \\ \bar{P}_{21} & \bar{P}_{22} & \dots & \bar{P}_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{P}_{N1} & \bar{P}_{N2} & \dots & \bar{P}_{NM} \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

где $\bar{P}_{ij} = (p_{ij}^I, p_{ij}^{II} \dots p_{ij}^k)$ и включает значения яркостей элементов p_{ij} в каждом из k

каналов системы ДЗЗ.

Радиолокационные снимки не содержат информации о значениях спектральной яркости. Их можно описать в виде двумерного массива комплексных чисел с индексами, содержащими, например, информацию об изменении дальности, координат, а также об амплитуде и фазе сигнала. Информация об амплитуде каждого элемента массива связана с силой коэффициента обратного рассеяния радара в определенной части сцены [176].

Геометрические данные, представляемые в виде точек, описываются в виде набора координатных пар. Точки получаются в результате дальномерных измерений с помощью наземных геодезических методов и методов ЛС.

Совокупность всего множества точек T_l можно описать в виде массива

$$T_l = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}. \quad (2.4)$$

Каждая точка массива l_i , полученная наземными геодезическими методами, имеет характеристики

$$l_i = \{X_i, Y_i, Z_i, S_i\}, \quad (2.5)$$

где l_i – точка массива;

X_i, Y_i, Z_i – пространственные координаты точки массива;

S_i – семантические данные точки массива.

Множество точек массива, получаемого методом ЛС, представляется в виде массива ТЛО. Каждая из таких точек l_i обладает следующими характеристиками

$$l_i = \{X_i, Y_i, Z_i, I_i, R_i, G_i, B_i, E_i\}, \quad (2.6)$$

где l_i – точка массива ТЛО;

X_i, Y_i, Z_i – пространственные координаты точки массива ТЛО;

I_i – значение интенсивности отраженного сигнала, фиксируемое приемником излучения;

R_i, G_i, B_i – значение яркости соответственно в красном, зеленом и синем каналах, получаемое после наложения с фотографий информации о цвете;

E_i – информация о порядковом номере отражения.

Согласно результату анализа методов сбора пространственных данных, подходящих для решения задач сферы ТИ и представленному в разделе 1.5, геометрические данные D_g в виде снимков разделяются на следующие

$$P_M = \{D_{gk}, D_{gafb}, D_{gafp}, D_{gnf}\}, \quad (2.7)$$

где D_{gk} – данные КС;

D_{gafb} – данные АФС с БВС;

D_{gafp} – данные АФС с ПЛА;

D_{gnf} – данные наземной фотосъемки.

Геометрические данные D_g в виде множества точек представлены следующими видами

$$T_l = \{D_{gvsb}, D_{gvsp}, D_{gms}, D_{gns}, D_{gr}, D_{gl}, D_{gt}\}, \quad (2.8)$$

где D_{gvsb} – данные ВЛС с БВС;

D_{gvsp} – данные ВЛС с ПЛА;

D_{gms} – данные МЛС;

D_{gns} – данные НЛС;

D_{gr} – данные ГНСС-съемки;

D_{gl} – данные геометрического нивелирования;

D_{gt} – данные тахеометрической съемки.

Первичные данные получают как в результате изучения территории без непосредственного выезда на нее, так и в результате полевого сбора

$$S = \{S_a, S_p\}, \quad (2.9)$$

где S_a – архивные первичные данные, полученные в результате изучения территории;

S_p – первичные данные, полученные в результате полевого сбора.

Сбор первичных данных S_a осуществляют опосредованно путем изучения материалов ранее выполненных наземных и аэросъемок с помощью методов, приведенных на рисунке 1.2, а также путем анализа архива данных космической съемки. Также к этим первичным данным относятся такие архивные материалы, как абрисы территории, видеосъемка, результаты дешифрирования. В свою очередь, первичные данные S_p собирают при полевых работах посредством изучения территории и выполнения геодезических съемок. Состав полевых работ отображается в рабочей программе геодезических съемок, составляемой по результатам анализа территории, архивных первичных данных S_a и полученных на их основе моделей. В рабочей программе приводятся результаты анализа выбора наиболее оптимального метода сбора пространственных данных в зависимости от стадии жизненного цикла ОТИ и решаемой задачи по критериям нормативной точности и оперативности в соответствии с таблицей 1.7. Учитывается также себестоимость, трудоемкость, полнота покрытия, уровень застроенности территории, площадь и протяженность участка съемки. Для задач, требующих по таблице 1.7 применение нескольких методов, обосновывается их совместное использование.

Отображение свойств объектов территории производится с помощью функции F_S в виде множества S

$$F_s : C \rightarrow S, \quad (2.10)$$

где $C = \{C_p, C_{up}\}$;

$$S = \{D_g, D_s, D_t, D_i\}.$$

Первичные данные подвергаются упорядоченной обработке, в результате которой они преобразуются в геопространственную информацию I , которая отображается в единой пространственно-информационной среде и состоит из нескольких видов информации

$$I = \{I_g, I_t, I_a\}, \quad (2.11)$$

где I_g – геометрическая информация, получаемая в результате предварительной обработки геометрических данных D_g ;

I_t – топологическая информация, получаемая из топологических данных D_t в результате преобразования схематического изображения территории в форму контуров, отображаемых в цифровом табличном виде;

I_a – атрибутивная информация, получаемая из семантических данных D_s . В процессе обработки семантических данных выполняется систематизация, классификация и кодирование характеристик непространственных свойств объектов.

В состав топологической и атрибутивной информации входят идентификационные данные D_i , обеспечивая их связь для каждого отдельного объекта.

Геометрическая и топологическая информация образуют геопространственную информацию I_p

$$I_p = \{I_g, I_t\}. \quad (2.12)$$

Формирование геопространственной информации в виде множества I можно описать с помощью функции F_i

$$F_i: S \rightarrow I, \quad (2.13)$$

где $I = \{I_p, I_a\}$.

Геопространственная информация уже может быть использована при решении различных производственных задач, связанных с отдельными измерениями на местности. Геопространственная информация представляет собой первичную форму ЦММ – ПИМ. Но для получения комплексного представления об исследуемых объектах требуется выполнить дальнейшее моделирование территории – создать ЦММ в форме ГПМ.

ЦММ – это основной результат обработки пространственных данных в ходе геопространственного моделирования в различных сферах [105, 261, 262].

Создание ЦММ по данным, полученным в результате геодезических съемок двумя или более методами ДЗЗ, требует применения определенных технологических решений и методик, позволяющих в ходе обработки получаемых данных осуществить их интеграцию. Основными ситуациями применения подобных технологических решений являются:

- геодезическая съемка местности с помощью метода ДЗЗ, не обеспечивающего требуемый уровень точности привязки. Применение второго метода сбора пространственных данных, обеспечивающего необходимую точность привязки, выполняется для повышения точности данных ДЗЗ, полученных основным методом. В этом случае результаты измерений второго метода служат в качестве съемочного обоснования для выполнения съемки с помощью основного;

- геодезическая съемка местности с помощью метода ДЗЗ, не обеспечивающего требуемый уровень детализации определенных участков местности из-за возникновения теневых зон или из-за съемки под острыми углами к поверхностям отдельных объектов;

- геодезическая съемка местности с помощью метода ДЗЗ, не обеспечивающего требуемый уровень детализации ключевых участков местности из-за низкого пространственного разрешения или плотности получаемых данных. Применение

второго метода ДЗЗ выполняется для получения данных с более высоким пространственным разрешением или плотностью на ключевых участках;

- геодезическая съемка местности для целей мониторинга, при котором выявляются изменения на местности за определенный промежуток времени;
- создание базы данных результатов геодезических съемок местности, дающей комплексное представление об объекте инфраструктуры. Результат анализа материалов такой базы данных позволяет спрогнозировать состояние объекта.

ЦММ включает ЦМР и цифровые модели объектов (ЦМО). ЦМО в основном включают топографические объекты, но также могут содержать и нетопографические в виде процессов и явлений, связанных с топографическими [31]. Согласно [106], для того чтобы описать представление объектов в ЦММ применяются модели пространственных данных:

- растровая;
- векторная топологическая;
- векторная нетопологическая;
- модели, использующие растровые и векторные данные.

Растровая модель M_r , создаваемая на основе геоинформации, описывается в виде изображений, состоящих из пикселей. Изображения получаются в результате фотограмметрической обработки снимков P_M и представляются в виде фотопланов, ортофотопланов.

Векторная нетопологическая модель создается на основе геометрической информации I_g , а векторная топологическая – пространственной I_p .

Векторные модели характеризуют геометрические параметры объектов при их отображении в виде точек, линий или полигонов. Размерность данных таких моделей может быть двух- или трехмерной. Векторная топологическая модель с трехмерной размерностью наилучшим образом подходит для подробного описания реальных объектов местности, она включает описание отношений пространственных объектов.

Векторные модели M_v могут быть представлены в виде обработанных массивов точек M_{pt} , примитивов M_p , твердых тел M_t или поверхностей M_s

$$M_v = \{M_{pt}, M_{vt}\}, \quad (2.14)$$

$$M_{vt} = \{M_p, M_t, M_s\}. \quad (2.15)$$

Векторные модели M_{pt} включают в свой состав только точки, которым в результате операции сегментации назначается номер группы, а в результате дальнейших операций – определенный класс. К таким операциям относятся описание, распознавание и интерпретация. То есть каждая точка массива дополнительно описывается номером группы и названием класса. Такие векторные модели отличаются от точечных ПИМ также тем, что они представляют собой детализированные и плотные массивы без теневых зон, в которых каждый исследуемый объект территории описывается достаточным для этого количеством точек.

Векторные модели M_p создаются на основе геометрических примитивов, представляющих собой базовые элементарные математические модели предметов: цилиндр, плоскость, шар, конус и т. д.

Векторные модели M_t получаются на основе осуществления связей между геометрическими примитивами с помощью сложных математических моделей. К таким моделям могут относиться параллелепипед, швеллер, балка и т. д.

Векторные модели M_s представляют собой набор объединенных в цельный объект элементарных звеньев, представленных треугольниками или сплайн-функциями.

Сущность процесса моделирования территории описывается с помощью функции F_m

$$F_m : I \rightarrow M, \quad (2.16)$$

где $M = \{M_r, M_v\}$.

В случае, если было выполнено создание векторной точечной модели M_{pt} , моделирование в виде твердых тел, примитивов или поверхностей может быть осуществлено с помощью функции F_{m2}

$$F_{m2} : M_{pt} \rightarrow M_{vt}. \quad (2.17)$$

Векторные модели могут быть дополнены атрибутивной информацией, которая может назначаться каждому объекту модели или территории в целом. Связи пространственных объектов или их частей описываются с помощью идентификаторов.

Векторные модели территории обычно состоят из тематических слоев, каждый из которых представляет собой определенный класс пространственных объектов: дороги, здания, растительность, опорные сооружения, линии электропередач, трубопроводы и др. В виде отдельного слоя выделяется физическая поверхность земли, которая может быть представлена в виде отметок высот или глубин, триангуляционных или сплайновых поверхностей, совокупностей изолиний.

Полученные модели могут использоваться для создания цифровой продукции на территорию ТИ: цифровых топографических карт и планов, продольных и поперечных профилей, трехмерных информационных моделей и чертежей ОТИ, а также масштабных планов железнодорожных станций. Процесс создания цифровой продукции N описывается с помощью функции

$$F_n : M \rightarrow N. \quad (2.18)$$

Результаты геопространственного моделирования M в форме ГПМ подвергаются пространственному анализу, в результате которого выполняется оценка территории или происходящих на ней процессов. Для этого, в частности, применяется функционал ГИС. При оценке состояния территории ТИ и отдельных объектов ОТИ решаются описанные в 1.4 задачи. Пространственный анализ описывается в виде функции

$$F_a : M \rightarrow A, \quad (2.19)$$

где A – результаты анализа.

При условии создания цифровой продукции выполняется ее совместный пространственный анализ вместе с ГПМ

$$F_a : M \cup N \rightarrow A. \quad (2.20)$$

На основе результатов анализа A выполняется выработка пространственных решений, которые представляют собой проект действий. В сфере ГИ это могут быть проекты развития транспортных сетей, связанные с их эксплуатацией, проекты ремонта существующих ОТИ и строительства новых. Результатом осуществления пространственных решений является модернизация и расширение транспортных сетей, повышение уровня безопасности их эксплуатации. Функция выработки пространственных решений F_r описывается следующим образом

$$F_r : M \cup A \rightarrow R, \quad (2.21)$$

где R – выработанное пространственное решение.

Так как при построении актуальных ГМП могут быть использованы архивные материалы: первичные данные S_a , а также созданные на их основе архивные ПИМ I_a и ГПМ M_a , то необходимо ввести дополнительную функцию сбора архивных материалов F_{ss}

$$F_{ss} : C_a \rightarrow S_s, \quad (2.22)$$

где C_a – свойства объектов территории, для которых имеются архивные материалы;

$S_s = \{S_a, I_a, M_a\}$ – архивные материалы.

Архивные материалы подвергаются анализу на предмет целесообразности осуществления полевых работ и выборе в этом случае оптимальных методов сбора пространственных данных. Совместный анализ всех имеющихся архивных материалов с целью подготовки решения о целесообразности выполнения полевых работ и группе оптимальных методов сбора пространственных данных реализуется с помощью следующей функции

$$F_g : S_s \rightarrow G, \quad (2.23)$$

где G – выработанное решение о целесообразности полевого сбора первичных данных S_p .

Это решение зависит от поставленной задачи в рамках реализуемой стадии топографо-геодезических изысканий в жизненном цикле автомобильной или железной дороги.

В случае принятия решения о необходимости полевых геодезических измерений следует составить технический проект на выполняемые работы, в котором указываются оптимальные модели геодезического оборудования [39]. Решение о выборе таких моделей принимается на основе анализа их технических характеристик и результатов выполненных исследований точности

$$F_e : G \rightarrow E, \quad (2.24)$$

где E – выработанное решение о выборе оптимальных моделей геодезического оборудования.

Результатом формирования ЕГП ОТИ является совокупность всех функций, процессов, данных, получаемой информации, построенных моделей и созданной цифровой продукции. Такая совокупность представлена в виде разработанной структуры единого геопространства территории ТИ, показанной на рисунке 2.1.

Эта структура подобна тем, что предложены в работах [77, 88, 98], но отличается тем, что она адаптирована для сбора различных наборов пространственных данных в сфере ТИ и вводом дополнительных функций сбора архивных материалов, подготовки решения о полевом сборе первичных данных и выборе оптимальных моделей геодезического оборудования.

2.3 Теоретические основы получения данных ДЗЗ в едином координатном пространстве

2.3.1 Сущность задачи построения цифровой модели местности по данным ДЗЗ

Основой решения задачи построения детализированной ЦММ является предварительная обработка различных наборов данных ДЗЗ с целью их представления в одной пространственной системе координат в единой информационной системе.

Для отображения в составе ЦММ нескольких различных наборов данных необходимо в одной системе координат описать положение снимков различных пассивных съемочных систем в момент фотографирования, радиолокационных снимков и массивов ТЛО.

Положение данных во внешней системе координат определяется тремя линейными и тремя угловыми элементами внешнего ориентирования (ЭВнешО): X_S , Y_S , Z_S , α , ω , κ . Характер их расчета зависит от типа применяемой съемочной системы.

Для кадровых съемочных систем ЭВнешО рассчитываются отдельно для каждого снимка и должны быть известны элементы внутреннего ориентирования (ЭВнутО): фокусное расстояние съемочной камеры f , координаты главной точки снимка x_0 , y_0 и параметры дисторсии объектива камеры d_x и d_y [78, 100, 121].

Построчно ЭВнешО рассчитываются для пассивных систем щелевого или панорамного типа, для активных систем ВЛС и МЛС, аэрокосмических радиолокационных систем.

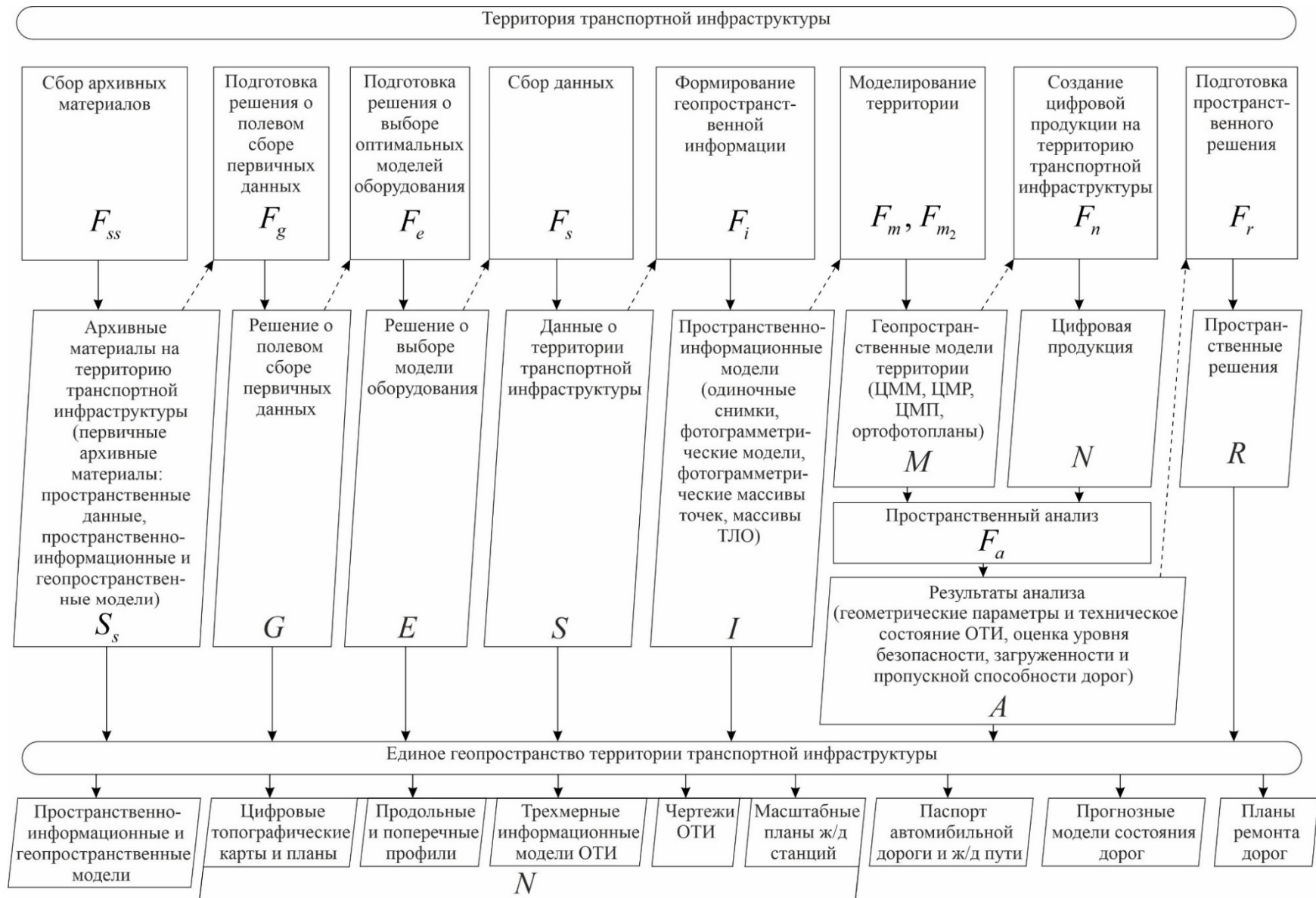


Рисунок 2.1 – Разработанная структура единого геопространства территории ТИ

При методе НЛС ЭВнешО рассчитываются отдельно для данных каждой сканерной позиции.

Определение пространственных координат точек местности может быть выполнено следующими методами:

- прямая фотограмметрическая засечка;
- двойная обратная фотограмметрическая засечка.

Метод прямой фотограмметрической засечки предполагает, что известны все элементы ориентирования. Во многих современных системах ДЗЗ помимо самого сенсора присутствует ГНСС-приемник и система ИНС, которые позволяют определять ЭВнешО во время съемки. На рисунке 2.2 показана схема определения координат точек объекта при такой ситуации.

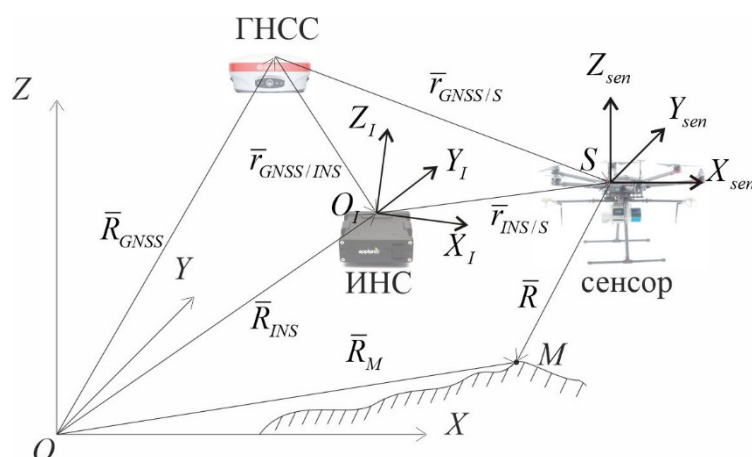


Рисунок 2.2 – Определение координат точек объекта при измеряемых во время съемки ЭВнешО сенсора

Вектор \bar{R} , описывающий положение точки местности M в системе координат объекта $OXYZ$, можно рассчитать по формуле

$$\bar{R}_M = \bar{R}_{INS} + A_{INS} \bar{r}_{INS/S} + A_{INS} A_{INS/S} \bar{R}, \quad (2.25)$$

где \bar{R}_{GNSS} – вектор, описывающий положение антенны ГНСС-приемника в системе координат объекта;

$\bar{R}_{INS} = \bar{R}_{GNSS} - A_{INS} r_{GNSS/INS}$ – вектор, описывающий положение ИНС в системе координат объекта;

$\bar{r}_{GNSS/INS}$ – вектор, определяющий положение антенны в системе координат ИНС $O_I X_I Y_I Z_I$;

$\bar{r}_{INS/S}$ – вектор, определяющий положение сенсора в системе координат ИНС $O_I X_I Y_I Z_I$;

A_{INS} – матрица поворота, определяющая угловую ориентацию системы координат сенсора $SX_{sen} Y_{sen} Z_{sen}$ относительно системы координат объекта $OXYZ$;

$A_{INS/S}$ – матрица поворота, определяющая угловую ориентацию системы координат сенсора $SX_{sen} Y_{sen} Z_{sen}$ относительно системы координат ИНС $O_I X_I Y_I Z_I$.

Формула для вычисления вектора \bar{R} в системе координат сенсора зависит от типа сенсора: кадровая, сканерная, радиолокационная или лазерно-локационная.

Далее вектор \bar{R}_M можно преобразовать к виду

$$\bar{R}_M = \bar{R}_{GNSS} + A_{INS} (\bar{r}_{GNSS/S} + A_{INS/S} \bar{R}). \quad (2.26)$$

В координатной форме уравнение (2.26) представляется в виде

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{GNSS} \\ Y_{GNSS} \\ Z_{GNSS} \end{bmatrix} + A_{INS} \left(\begin{bmatrix} X_{GNSS/S} \\ Y_{GNSS/S} \\ Z_{GNSS/S} \end{bmatrix} + A_{INS/S} \begin{bmatrix} X_{sen} \\ Y_{sen} \\ Z_{sen} \end{bmatrix} \right) \quad (2.27)$$

где $X_{GNSS}, Y_{GNSS}, Z_{GNSS}$ – координаты центра антенны ГНСС-приемника в системе координат объекта;

$X_{GNSS/S}, Y_{GNSS/S}, Z_{GNSS/S}$ – координаты вектора $\bar{r}_{GNSS/S}$, определяющего взаимное положение сенсора и антенны в системе координат ИНС;

$X_{sen}, Y_{sen}, Z_{sen}$ – координаты точки объекта в системе координат сенсора.

Матрица $A_{INS/S}$, вектора $\bar{r}_{GNSS/INS}$, $\bar{r}_{GNSS/S}$ и $\bar{r}_{INS/S}$ постоянны и определяются в результате калибровки съемочной системы.

2.3.2 Схема определения пространственных координат точек местности различными системами ДЗЗ в единой системе координат

На рисунке 2.3 показана схема определения координат точек местности различными системами ДЗЗ.

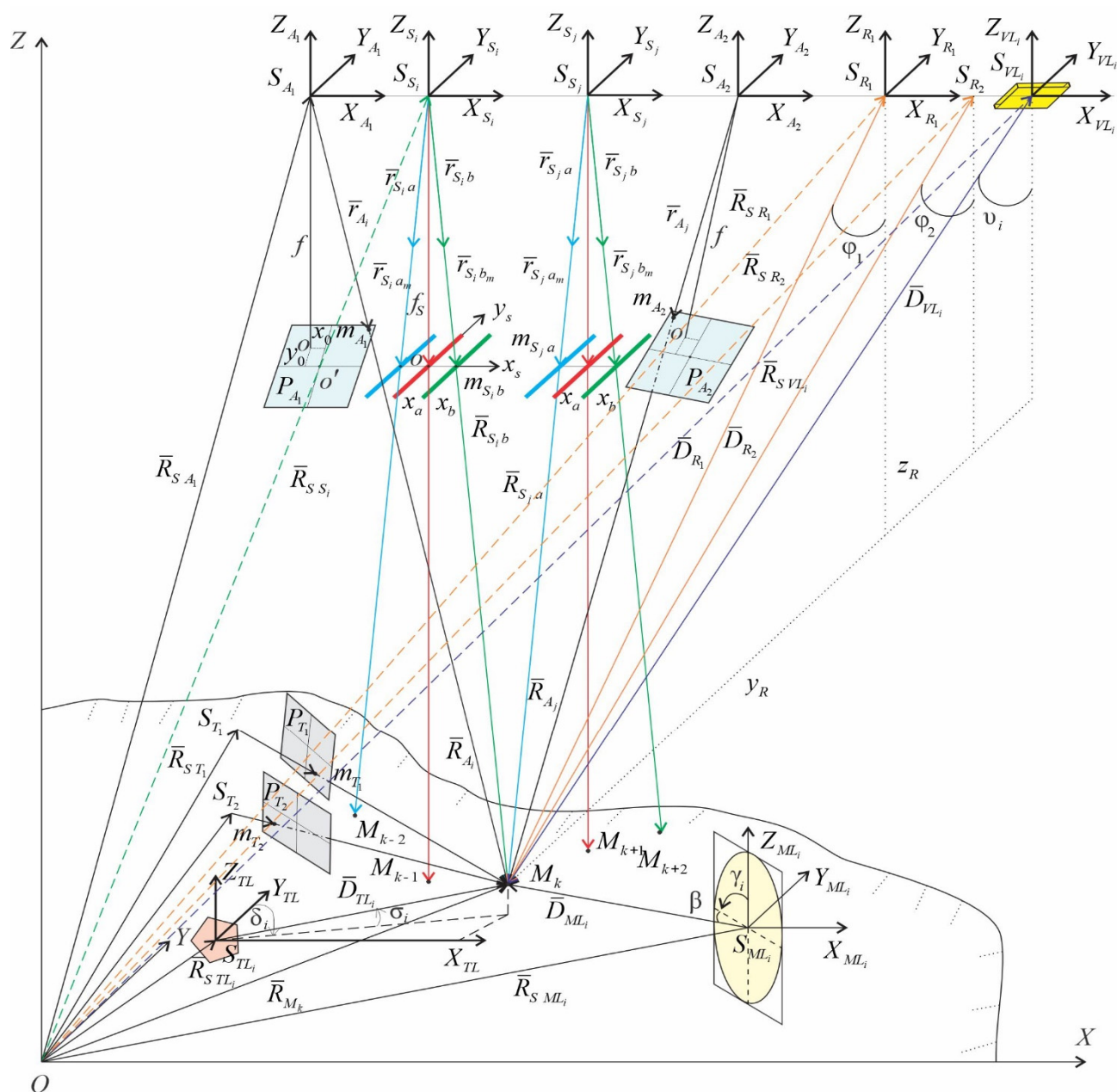


Рисунок 2.3 – Связь систем координат различных съемочных систем

На этом рисунке точка M_k отобразилась на стереопарах следующих видов снимков:

- аэрокосмические кадровые;
- аэрокосмические сканерные, полученные с камеры, на которой было установлено три линейки ПЗС;
- наземные кадровые;
- радиолокационные.

Точка M_k также отобразилась в массивах ТЛО, полученных различными методами ЛС: НЛС, МЛС и ВЛС. Для систем различных видов ЛС отображены схемы вычисления пространственных координат. Направление полета всех носителей аэрокосмических съемочных систем совпадает и лежит параллельно оси X внешней системы координат объекта, которому принадлежит точка M_k .

2.3.3 Определение пространственных координат точек местности по снимкам методом прямой фотограмметрической засечки

Для определения пространственных координат точек местности по методу прямой фотограмметрической засечки должны быть известны все элементы ориентирования стереопар снимков. Рассмотрим этот процесс на примере данных, показанных на рисунке 2.3.

Кадровые аэроснимки. Чтобы рассчитать положение точки местности M_k на кадровом снимке, необходимо решить уравнение

$$\bar{R}_{M_k} = \bar{R}_{S_{A_i}} + \bar{R}_{A_i}, \quad (2.28)$$

где $\bar{R}_{S_{A_i}} = OS_{A_i}$ – вектор, описывающий положение точки фотографирования S_{A_i} , из которой получен снимок P_{A_i} , в фотограмметрической системе координат объекта $OXYZ$;

$\bar{R}_{A_l} = S_{A_l} M_k$ – вектор, описывающий положение точки местности M_k , которая отобразилась на снимке P_{A_l} в виде точки m_{A_l} ;

$l = 1, 2$ – номер снимка, на котором отобразилась точка M_k .

Уравнение (2.28) можно записать в виде

$$\bar{R}_{M_k} = \bar{R}_{S_{A_l}} + \bar{R}_{A_l} = \bar{R}_{S_{A_l}} + N_{A_l} \cdot \bar{r}_{A_l}. \quad (2.29)$$

где $\bar{r}_{A_l} = S_{A_l} m_{A_l}$ – вектор, описывающий положение точки снимка m_{A_l} ,

N_{A_l} – скалярный множитель.

В координатной форме уравнение (2.29) представляется в виде

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{S_{A_l}} \\ Y_{S_{A_l}} \\ Z_{S_{A_l}} \end{bmatrix} + N_{A_l} \begin{bmatrix} X_{A_l} \\ Y_{A_l} \\ Z_{A_l} \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

где
$$\begin{bmatrix} X_{A_l} \\ Y_{A_l} \\ Z_{A_l} \end{bmatrix} = A_{A_l(\alpha, \omega, \kappa)} \begin{bmatrix} x_l - x_{0l} \\ y_l - y_{0l} \\ -f_l \end{bmatrix};$$

$X_{S_{A_l}}, Y_{S_{A_l}}, Z_{S_{A_l}}$ – координаты точки фотографирования $S_{S_{A_l}}$;

X, Y, Z – пространственные координаты точки M_k .

Значение скалярного множителя N_{A_l} можно рассчитать, если известна высота фотографирования

$$N_{A_l} = \frac{Z - Z_{S_{A_l}}}{Z_{A_l}}. \quad (2.31)$$

Из уравнения (2.30), можно получить формулы связи координат точек местности и снимка в координатной форме, называемые уравнениями коллинеарности

$$\left. \begin{aligned} X &= X_{S_{A_1}} + (Z - Z_{S_{A_1}}) \frac{X_{A_1}}{Z_{A_1}} \\ Y &= Y_{S_{A_1}} + (Z - Z_{S_{A_1}}) \frac{Y_{A_1}}{Z_{A_1}} \end{aligned} \right\}. \quad (2.32)$$

На основании формул (2.31) можно вычислить координаты точек местности, зная их положение на кадровых снимках, их ЭВнутО и высоту фотографирования.

Если неизвестна высота фотографирования, то для вычисления координат точек местности необходимо использовать стереопары снимков. В этом случае также используется формула (2.30), в которой следует рассчитать новое значение скалярного множителя N на основе определения базиса фотографирования \bar{B} . Для стереопары кадровых снимков P_{A_1} и P_{A_2} базис $\bar{B}_A = S_{A_1} S_{A_2}$. Из рисунка 2.3 $\bar{B}_A = \bar{R}_{S_{A_1}} - \bar{R}_{S_{A_2}}$. Тогда можно определить значение \bar{R}_{A_2}

$$\bar{R}_{A_2} = N \cdot \bar{r}_{A_1} - \bar{B}_A. \quad (2.33)$$

Векторы \bar{R}_{A_2} и \bar{r}_{A_2} коллинеарны, поэтому

$$\bar{R}_{A_2} \times \bar{r}_{A_2} = 0. \quad (2.34)$$

Решая уравнение (2.33), рассчитывают значение скалярного множителя N

$$N = \frac{\sqrt{(B_{A_Y} Z_{A_2} - B_{A_Z} Y_{A_2})^2 + (B_{A_Z} X_{A_2} - B_{A_X} Z_{A_2})^2 + (B_{A_X} Y_{A_2} - B_{A_Y} X_{A_2})^2}}{\sqrt{(Y_{A_1} Z_{A_2} - Y_{A_2} Z_{A_1})^2 + (X_{A_2} Z_{A_1} - X_{A_1} Z_{A_2})^2 + (X_{A_1} Y_{A_2} - X_{A_2} Y_{A_1})^2}}, \quad (2.35)$$

где $X_{A_1}, Y_{A_1}, Z_{A_1}, X_{A_2}, Y_{A_2}, Z_{A_2}, B_{A_X}, B_{A_Y}, B_{A_Z}$ – координаты векторов $\bar{r}_{A_1}, \bar{r}_{A_2}, \bar{B}_A$.

Таким образом, пространственные координаты точек местности по стереопаре кадровых снимков вычисляются при их известных ЭВнутО и ЭВнешО на основе измерения соответственных точек в зонах перекрытия по формуле (2.30), где для расчета скалярного множителя N применяется формула (2.35).

Сканерные снимки. Для определения пространственных координат сканерных снимков при известных ЭВнешО применяются уравнения коллинеарности (2.32), как и для кадровых, которые получаются в результате решения уравнения (2.28) [186]. Но так как сканерные съемочные системы строят изображения построчно, ЭВнешО у различных строк отличаются. Применительно к примеру связи систем координат различных съемочных систем, показанного на рисунке 2.3, уравнения коллинеарности при вычислении положения точки местности M_k на сканерном снимке из центра фотографирования S_{S_i} можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} X &= X_{S_{S_i}} + (Z - Z_{S_{S_i}}) \frac{X_{S_i}}{Z_{S_i}} \\ Y &= Y_{S_{S_i}} + (Z - Z_{S_{S_i}}) \frac{Y_{S_i}}{Z_{S_i}} \end{aligned} \right\}. \quad (2.36)$$

Формула (2.36) получается в результате решения уравнения

$$\bar{R}_{M_k} = \bar{R}_{S_{S_i}} + \bar{R}_{S_i b}. \quad (2.37)$$

При использовании камеры с тремя линейками ПЗС, находящимися в фокальной плоскости объектива, значение вектора $\bar{R}_{S_i b}$ необходимо вычислять отдельно для каждой линейки. Для передней линейки ПЗС b сканерной камеры этот вектор рассчитывается как [117]

$$\bar{R}_{S_i b} = N_{S_i b_m} \cdot \bar{r}_{S_i b_m}, \quad (2.38)$$

где $\bar{r}_{S_i b_m}$ – вектор, определяющий положение точки $m_{S_i b}$ в системе координат сканерного снимка, рассчитываемый по формуле

$$\bar{r}_{S_i b_m} = \begin{bmatrix} x_{b,m} \\ y_{b,m} \\ z_{b,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b - x_{0S} \\ y_S - y_{0S} \\ -f_S \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

где x_b – постоянная величина, определяющая расстояние между центральной и передней линейкой ПЗС;

x_{0S} , y_{0S} – координаты главной точки сканерной съемочной системы в системе координат сканерного снимка;

f_S – фокусное расстояние сканерной камеры.

Для задней линейки ПЗС a сканерной камеры вектор, определяющий положение точки $m_{S_j a}$ в системе координат сканерного снимка в момент фотографирования из точки S_j , будет рассчитываться по формуле

$$\bar{r}_{S_j a_m} = \begin{bmatrix} x_{a,m} \\ y_{a,m} \\ z_{a,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a - x_{0S} \\ y_S - y_{0S} \\ -f_S \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

где x_a – постоянная величина, определяющая расстояние между центральной и задней линейкой ПЗС.

Для определения пространственных координат точек местности по стереопаре сканерных снимков при известных изменениях ЭВнешО применяется следующая методика:

- вычисляются координаты единичных векторов для всех измерений, выполненных по стереопаре снимков, в момент формирования первой строки снимка;
- вычисляются ЭВнешО сканерной съемочной системы в момент формирования первой строки левого и правого снимков стереопары;
- вычисляются координаты точек местности.

Применяя эту методику, можно вычислить пространственные координаты точки M_k по стереопаре сканерных снимков, образованных линейками ПЗС a и b .

ЭВнешО в момент формирования первой строки снимка линейки a и снимка линейки b определяются путем составления уравнений компланарности

$$\begin{vmatrix} X_{Sa_jM} - X_{Sb_iM} & Y_{Sa_jM} - Y_{Sb_iM} & Z_{Sa_jM} - Z_{Sb_iM} \\ X'_{b_iM} & Y'_{b_iM} & Z'_{b_iM} \\ X'_{a_jM} & Y'_{a_jM} & Z'_{a_jM} \end{vmatrix} = 0, \quad (2.41)$$

$$\text{где} \quad \begin{bmatrix} X_{Sa_jM} \\ Y_{Sa_jM} \\ Z_{Sa_jM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{Sa_i} \\ Y_{Sa_i} \\ Z_{Sa_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_{Sa_jM} \\ \Delta Y_{Sa_jM} \\ \Delta Z_{Sa_jM} \end{bmatrix}; \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} X_{Sb_jM} \\ Y_{Sb_jM} \\ Z_{Sb_jM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{Sb_i} \\ Y_{Sb_i} \\ Z_{Sb_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_{Sb_jM} \\ \Delta Y_{Sb_jM} \\ \Delta Z_{Sb_jM} \end{bmatrix}; \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} X'_{a_jM} \\ Y'_{a_jM} \\ Z'_{a_jM} \end{bmatrix} = A_{\alpha_1(a,\omega,\kappa)} \begin{bmatrix} x_{a_jM} \\ y_{a_jM} \\ z_{a_jM} \end{bmatrix}; \quad (2.44)$$

$$\begin{bmatrix} X'_{b_iM} \\ Y'_{b_iM} \\ Z'_{b_iM} \end{bmatrix} = A_{b_1(a,\omega,\kappa)} \begin{bmatrix} x_{b_iM} \\ y_{b_iM} \\ z_{b_iM} \end{bmatrix}; \quad (2.45)$$

$A_{\alpha_1(a,\omega,\kappa)}$, $A_{b_1(a,\omega,\kappa)}$ – матрицы поворота, вычисляемые по угловым ЭВнешО при формировании первой строки снимков a и b ;

x_{a_jM} , y_{a_jM} , z_{a_jM} – координаты точки M на снимке a в системе координат сканерной съемочной системы при формировании первой строки этого снимка;

x_{b_iM} , y_{b_iM} , z_{b_iM} – координаты точки M на снимке b в системе координат сканерной системы при формировании первой строки этого снимка;

$\Delta X_{S_{a_j M}}, \Delta Y_{S_{a_j M}}, \Delta Z_{S_{a_j M}}$ – изменения линейных ЭВнешО координат сканерной системы относительно первой строки снимка a ;

$\Delta X_{S_{b_j M}}, \Delta Y_{S_{b_j M}}, \Delta Z_{S_{b_j M}}$ – изменения линейных ЭВнешО координат сканерной системы относительно первой строки снимка b .

Радиолокационные снимки. Для определения пространственных координат по радиолокационным снимкам в векторной форме можно записать уравнение

$$\bar{R}_{M_k} = \bar{R}_{S_{R_l}} + \bar{D}_{R_l}, \quad (2.46)$$

где $\bar{R}_{S_{R_l}}$ – вектор, описывающий положение точки съемки S_{R_l} в фотограмметрической системе координат объекта OXYZ;

\bar{D}_{R_l} – вектор, описывающий положение точки местности M_k , которая отображалась на радиолокационных снимках;

$l = 1, 2$ – номер снимка, на котором отобразилась точка M_k .

В системе координат радиолокационных снимков вектор \bar{D}_{R_l} в координатной форме можно представить как

$$\begin{bmatrix} D_{X_{R_l}} \\ D_{Y_{R_l}} \\ D_{Z_{R_l}} \end{bmatrix} = A_{R_l(\alpha, \omega, \kappa)} \begin{bmatrix} x_{R_l M} \\ y_{R_l M} \\ z_{R_l M} \end{bmatrix}, \quad (2.47)$$

где $x_{R_l M}, y_{R_l M}, z_{R_l M}$ – координаты точки M_k , изобразившейся на радиолокационных снимках в их системе координат.

Чтобы рассчитать координаты изобразившейся на радиолокационных снимках точки M_k , необходимо знать значение углов проектирования φ_l

$$\begin{bmatrix} x_{R_l M} \\ y_{R_l M} \\ z_{R_l M} \end{bmatrix} = D_{R_l} \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \varphi_l \\ -\cos \varphi_l \end{bmatrix}, \quad (2.48)$$

где D_{R_l} – измеренная радиолокационной системой наклонная дальность.

Для нахождения угла проектирования φ_l по одиночному радиолокационному изображению при известных из бортовых измерений ЭВнешО необходимо знать высоту Z точки M_k .

При обработке стереопары радиолокационных снимков для нахождения углов проектирования φ_l применяется выражение

$$\bar{B}_R = \bar{D}_{R_1} - \bar{D}_{R_2}, \quad (2.49)$$

где $\bar{B}_R = S_{R_1} S_{R_2}$ – базис съемки.

Кадровые наземные снимки. Фотограмметрическая обработка наземных снимков выполняется таким же образом, как и аэрокосмических. Для определения пространственных координат показанной на рисунке 2.3 точки местности M_k , изобразившейся на кадровых снимках m_{T_l} составляется уравнение

$$\bar{R}_{M_k} = \bar{R}_{S_{T_l}} + \bar{R}_{T_l}, \quad (2.50)$$

где $\bar{R}_{S_{T_l}} = OS_{T_l}$ – вектор, описывающий положение точки фотографирования S_{T_l} , из которой получен снимок P_{T_l} , в фотограмметрической системе координат объекта OXYZ;

$\bar{R}_{T_l} = S_{T_l} M_k$ – вектор, описывающий положение точки местности M_k , которая отобразилась на снимке P_{T_l} в виде точки m_{T_l} ;

$l = 1, 2$ – номер снимка, на котором отобразилась точка M_k .

Уравнение (2.49) можно преобразовать к виду

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{S_{T_l}} \\ Y_{S_{T_l}} \\ Z_{S_{T_l}} \end{bmatrix} + N_{T_l} \begin{bmatrix} X_{T_l} \\ Y_{T_l} \\ Z_{T_l} \end{bmatrix}, \quad (2.51)$$

где N_{T_l} – скалярный множитель;

$X_{S_{T_l}}, Y_{S_{T_l}}, Z_{S_{T_l}}$ – координаты точки фотографирования S_{T_l} ;

X, Y, Z – пространственные координаты точки M_k ;

$$\begin{bmatrix} X_{T_l} \\ Y_{T_l} \\ Z_{T_l} \end{bmatrix} = A_{T_l(\alpha, \omega, \kappa)} \begin{bmatrix} x_l - x_{0l} \\ y_l - y_{0l} \\ -f_l \end{bmatrix}. \quad (2.52)$$

Затем получают аналогичные (2.32) уравнения коллинеарности, которые используют для вычисления пространственных координат точки местности M_k по одиночным наземным снимкам P_{T_l} , если известны плоские координаты точек на снимках, их ЭВнутО и высота фотографирования.

При использовании стереопар наземных снимков P_{T_l} для вычисления координат точки местности M_k применяются уравнения (2.51), в которых значение скалярного множителя N_{T_l} рассчитывается по формулам, аналогичным (2.35), с использованием известных ЭВнутО и ЭВнешО.

2.3.4 Определение пространственных координат точек местности по данным лазерного сканирования

ЛС относится к активным методам ДЗЗ, где фиксируются углы отклонения лазерного луча и рассчитываются пространственные координаты точек местности из одного центра проецирования.

Наземное лазерное сканирование. Для определения пространственных координат точки местности M_k , измеренной методом НЛС, можно записать уравнение

$$\bar{R}_{M_k} = \bar{R}_{S_{TL_i}} + \bar{D}_{TL_i}, \quad (2.53)$$

где $\bar{R}_{S_{TL_i}}$ – вектор, описывающий положение точки съемки S_{TL_i} в фотограмметрической системе координат объекта OXYZ;

\bar{D}_{TL_i} – вектор, описывающий положение точки местности M_k в системе координат наземного лазерного сканера.

В координатной форме уравнение (2.53) можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{S_{TL_i}} \\ Y_{S_{TL_i}} \\ Z_{S_{TL_i}} \end{bmatrix} + A_{TL_i(\alpha, \omega, \kappa)} D_{TL_i} \begin{bmatrix} \cos \sigma_i \sin \delta_i \\ \cos \sigma_i \cos \delta_i \\ \sin \sigma_i \end{bmatrix}, \quad (2.54)$$

где $X_{S_{V_i}}, Y_{S_{V_i}}, Z_{S_{V_i}}$ – линейные ЭВнешО, координаты точки S_{TL_i} в момент измерения наклонного расстояния D_{TL_i} ;

$A_{TL_i(\alpha, \omega, \kappa)}$ – матрица поворота, вычисляемая по угловым ЭВнешО;

σ_i – угол поворота системы зеркал или призмы, отклоняющий лазерный луч в вертикальном направлении;

δ_i – угол поворота сервопривода, отклоняющий лазерный луч в горизонтальном направлении.

Расстояние в лазерных сканерах измеряется одним из трех методов: импульсным, фазовым или триангуляционным. При импульсном методе расстояние измеряется на основе измерения времени распространения лазерного излучения до объекта и обратно, при фазовом – посредством определения разности фаз между посылаемым и принимаемым сигналами, а также вычисления целого числа длин волн, которое укладывается на определяемом расстоянии. Триангуляционный метод измерения расстояний предполагает применение специальных моделей сканеров, в чей состав входит пара ПЗС-камер или зеркало и ПЗС-камера. Этот метод используется только при НЛС. В нем применяется прямая угловая засечка.

Воздушное лазерное сканирование. Определение пространственных координат точки местности M_k , измеренной методом ВЛС, выполняется на основе уравнения

$$\bar{R}_{M_k} = \bar{R}_{S_{VL_i}} + \bar{D}_{VL_i}, \quad (2.55)$$

где $\bar{R}_{S_{VL_i}}$ – вектор, описывающий положение точки съемки S_{VL_i} в фотограмметрической системе координат объекта OXYZ;

\bar{D}_{VL_i} – вектор, описывающий положение точки местности M_k в системе координат воздушного лазерного сканера.

Принцип расчета вектора \bar{D}_{VL_i} зависит от схемы развертки, реализованной в применяемой модели лазерного сканера (рисунок 2.4) [305].

При использовании качающегося зеркала точка начала системы координат воздушного лазерного сканера S_{VL_i} получается в результате пересечения оптической оси системы Y_{VL_i} с осью вращения зеркала X_{VL_i} , совпадающей с направлением полета.

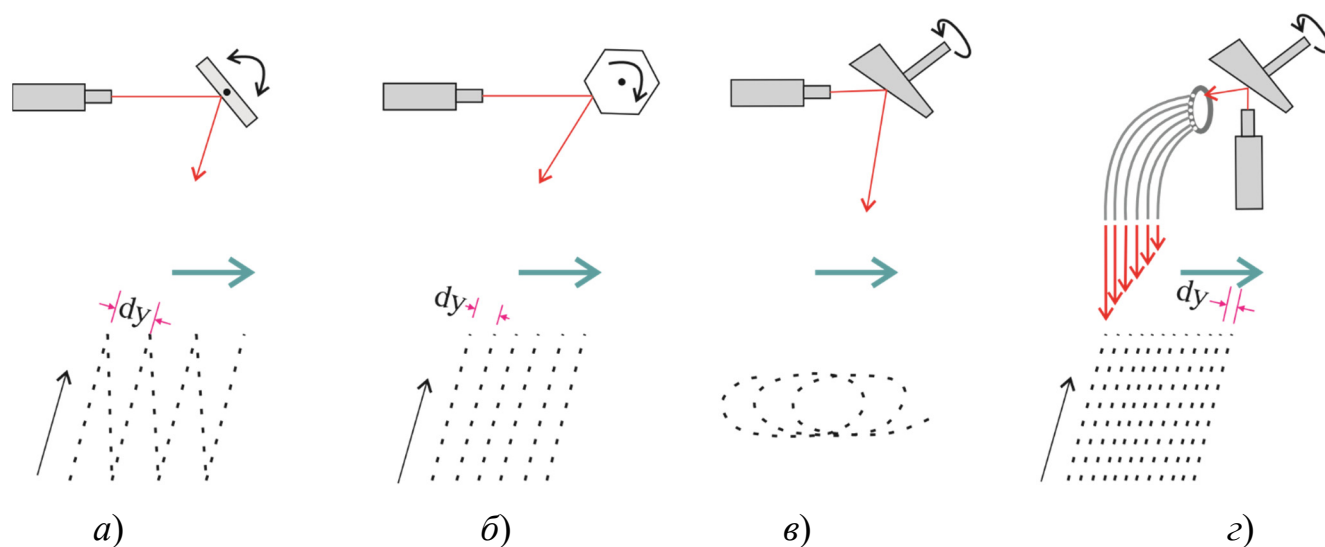


Рисунок 2.4 – Схемы развертки лазерного луча:

- а) качающееся зеркало; б) вращающаяся призма; в) оптический клин;
 г) оптоволоконный сканер; \rightarrow – лазерный луч; \rightarrow – направление полета;
 \rightarrow – направление вращения

В координатной форме уравнение (2.55) при использовании качающегося зеркала представляется в виде

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{SVL_i} \\ Y_{SVL_i} \\ Z_{SVL_i} \end{bmatrix} + A_{VL_i(\alpha, \omega, \kappa)} D_{VL_i} \begin{bmatrix} 0 \\ \sin v_i \\ -\cos v_i \end{bmatrix}, \quad (2.56)$$

где $X_{SVL_i}, Y_{SVL_i}, Z_{SVL_i}$ – линейные ЭВнешО строки массива ТЛО, координаты точки S_{VL_i} , в момент измерения наклонного расстояния D_{VL_i} ;

$A_{VL_i(\alpha, \omega, \kappa)}$ – матрица поворота, вычисляемая по угловым ЭВнешО;

v_i – угол поворота зеркала, отклоняющего лазерный луч.

При ВЛС линейные ЭВнешО определяются с помощью ГНСС-приемника, а угловые – с помощью ИНС.

Мобильное лазерное сканирование. При МЛС можно составить аналогичное уравнение определения пространственных координат точки местности M_k

$$\bar{R}_{M_k} = \bar{R}_{S_{ML_i}} + \bar{D}_{ML_i}, \quad (2.57)$$

где $\bar{R}_{S_{ML_i}}$ – вектор, описывающий положение точки съемки S_{ML_i} в фотограмметрической системе координат объекта OXYZ;

\bar{D}_{ML_i} – вектор, описывающий положение точки местности M_k в системе координат лазерного сканера системы МЛС.

Мобильные лазерные сканеры выполняют круговую развертку лазерного луча с помощью специальных головок, отклоняющих его в вертикальном направлении на угол γ_i в момент времени t_i (рисунок 2.3). Угол отклонения лазерного луча β по горизонтали у мобильных лазерных сканеров фиксирован

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{S_{ML_i}} \\ Y_{S_{ML_i}} \\ Z_{S_{ML_i}} \end{bmatrix} + A_{ML_i(\alpha, \omega, \kappa)} D_{ML_i} \begin{bmatrix} \cos \beta_i \sin \gamma_i \\ \cos \beta_i \cos \gamma_i \\ \sin \beta_i \end{bmatrix}, \quad (2.58)$$

где $X_{S_{ML_i}}, Y_{S_{ML_i}}, Z_{S_{ML_i}}$ – линейные ЭВнешО строки массива ТЛО, координаты точки S_{ML_i} , в момент измерения наклонного расстояния D_{ML_i} ;

$A_{VL_i(\alpha, \omega, \kappa)}$ – матрица поворота, вычисляемая по угловым ЭВнешО;

ν_i – угол поворота зеркала, отклоняющего лазерный луч.

2.4 Методология интеграции данных ДЗЗ для решения задач сферы транспортной инфраструктуры

Получение данных ДЗЗ в едином координатном пространстве необходимо для осуществления их процесса интеграции. На рисунке 2.5 представлена технологическая схема интеграции ПИМ, построенных на основе однородных или разнородных данных ДЗЗ. К однородным относятся данным ДЗЗ, первоначально имеющие один формат: двумерные изображения или трехмерные массивы точек. Данные ДЗЗ называются разнородными, если их формат отличается.

Процесс интеграции ПИМ можно разделить на 3 стадии [272]:

- привязка ПИМ;
- формирование гибридных ПИМ;
- распознавание объектов для формирования гибридной ГПМ.

Привязка ПИМ может быть осуществлена тремя способами [255]:

- взаимное ориентирование посредством вычисления положения одних ПИМ относительно других;
- независимое внешнее ориентирование ПИМ в заданной системе координат;
- калибровка оборудования.

При выборе способа привязки необходимо ориентироваться на особенности применяемых методов ДЗЗ, на наличие результатов измерений с помощью традиционных наземных геодезических методов и ГНСС-измерений, имеются ли в наличии дополнительные картографические материалы. Информация о цели измерений, территории съемки, виде создаваемой продукции, временном интервале между измерениями также оказывает влияние на выбор способа привязки.

Взаимное ориентирование ПИМ выполняется посредством отождествления соответственных объектов. Это действие может быть выполнено с помощью интерактивных операций [304] или автоматизировано посредством применения специальных автоматических методов [245]. Автоматизированный способ предполагает подбор оптимальных методов отождествления, разработку новых, подходящих для определенного набора данных, а также составление новых методик и алгоритмов обработки. Одно из основных достоинств способа взаимного ориентирования нескольких ПИМ заключается в необходимости присутствия привязки к внешней системе координат только у одной из моделей. Это снижает требования к созданию планово-высотного обоснования и объем наземных полевых работ.

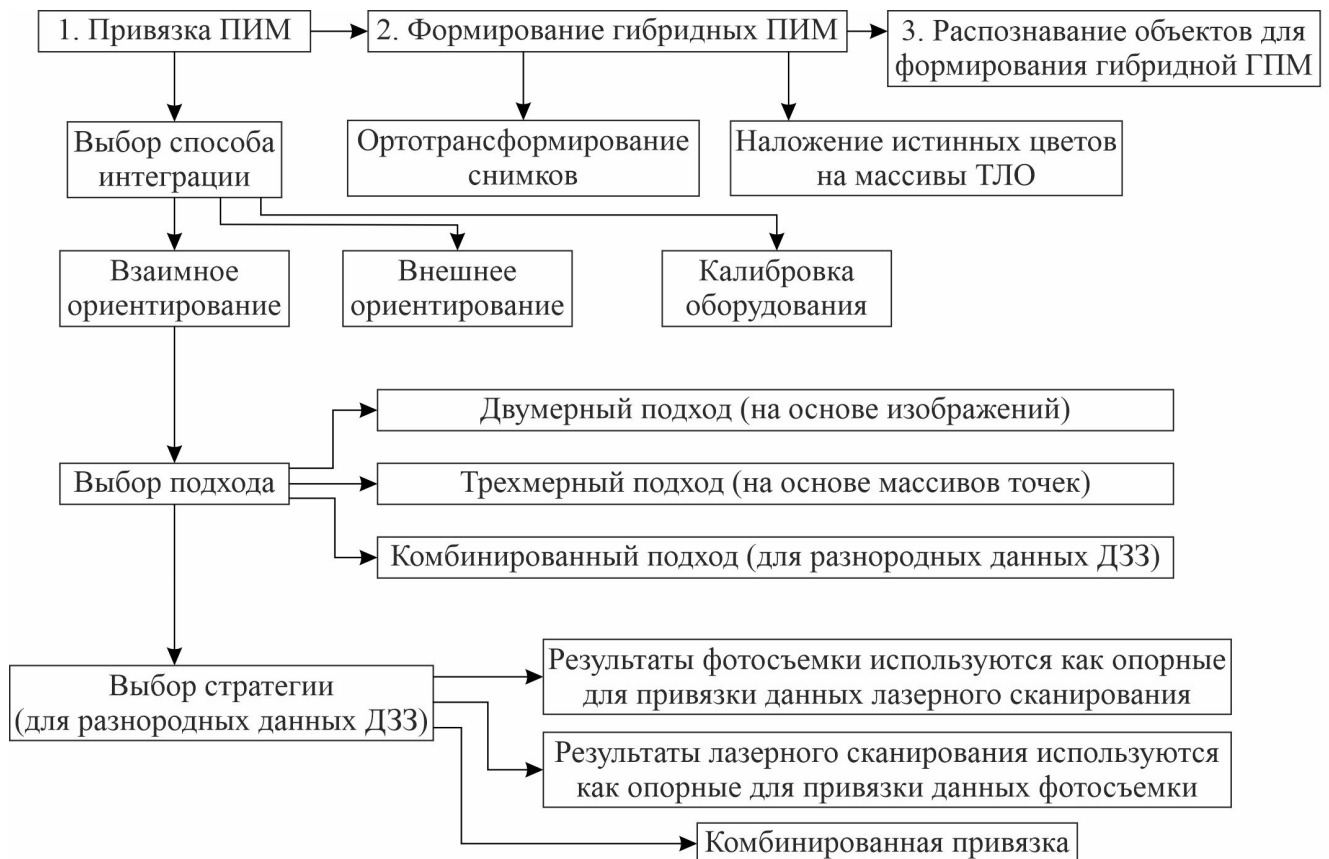


Рисунок 2.5 – Технологическая схема интеграции ПИМ

При привязке однородных ПИМ применяются 2 подхода:

- двумерный подход на основе изображений: снимков, ортофотопланов;

– трехмерный подход на основе массивов ТЛО или сгенерированных по снимкам фотограмметрических массивов точек.

Сложность привязки с помощью способа взаимного ориентирования возрастает при привязке ПИМ, построенных на основе разнородных данных ДЗЗ: фотосъемки и ЛС. Необходимо учитывать их различия в принципе регистрации измерений и форматах представления данных. В этом случае для отождествления соответственных объектов между фотоснимками и массивами ТЛО выбирается один из трех подходов:

– двумерный подход на основе снимков и сгенерированных по массиву ТЛО изображений [237]. Распознавание объектов выполняется в двумерном пространстве;

– трехмерный подход на основе массива ТЛО и сгенерированного по снимкам фотограмметрического массива точек [268]. Распознавание объектов выполняется в трехмерном пространстве;

– комбинированный подход. Выполняется распознавание трехмерных объектов по массивам ТЛО в трехмерном пространстве и соответствующих им контуров по снимкам в двумерном.

Выбор метода отождествления, применяемого на этапе взаимного ориентирования, зависит от того, какое используется пространство измерений, так как первоначально результаты фотосъемки представляются в двумерном пространстве в виде снимков, а результаты ЛС в трехмерном в виде массивов ТЛО.

При отождествлении объектов в двумерном пространстве на основе разнородных ПИМ применяются те же методы, что и для привязки снимков. Для отождествления разнородных ПИМ в трехмерном пространстве измерений применяются методы уравнивания данных ЛС, в частности сканов, являющихся результатом НЛС.

Подход к интеграции в трехмерном пространстве менее требователен к разрешению данных. По данным фотосъемки можно построить массив точек высокой плотности, даже превышающий плотность массива ТЛО. На точность привязки в этом случае может оказывать тот факт, что массив точек, полученный в результате

обработки фотоснимков, обладает однородной плотностью, а плотность массива ТЛО значительно падает с увеличением расстояния. Также в отличие от массива ТЛО представление вертикальных и горизонтальных плоскостей объектов местности может быть искажено в сгенерированном по фотоснимкам массиве точек при недостаточном изобразительном качестве некоторых из них. Например, в массиве ТЛО, полученным методом МЛС или НЛС, не будут изображаться крыши зданий, а в массиве точек, сгенерированном в результате фотограмметрической обработки, могут быть значительные ошибки в изображении их стен.

Из-за несовпадающего источника получения массивов точек двух различных методов съемки вопрос точности привязки наземных данных ЛС к данным фотосъемки остается открытым. Особенно это касается ситуации, когда необходимо привязать данные МЛС к результатам космической или аэрофотосъемки. Все данные МЛС невозможно привязать к результатам съемки с воздуха за один цикл, что связано с непостоянством значений элементов внешнего ориентирования массива вследствие особенностей его получения в виде сканерных линий.

Способ взаимного ориентирования разнородных ПИМ предполагает выбор одной из трех стратегий [308]:

- результаты фотосъемки используются как опорные для привязки данных ЛС;
- результаты ЛС используются как опорные для привязки данных фотосъемки;
- комбинированная привязка, заключающаяся в одновременном применении двух предыдущих стратегий. Например, привязка в плановом положении по первой стратегии, а в высотном – по второй.

Способ калибровки оборудования заключается в вычислении ЭВзаимО всех находящихся в составе одной системе сенсоров [97]. Далее осуществляется вычисление ЭВнешО всего массива разнородных данных и его трансформирование в требуемую систему координат с помощью метода прямой или обратной фотограмметрической засечки в зависимости от того, были ли использованы наземные опорные

точки или применялось ли входящее в состав системы ДЗЗ дополнительное оборудование, такое как система ИНС и ГНСС-приемники [240, 255].

Вторая стадия интеграции заключается в формировании гибридных ПИМ определенного формата, где результаты предварительной обработки одних данных используются для обработки других. Например, с применением массивов ТЛО может быть выполнено ортотрансформирование снимков [262], истинные цвета снимков могут быть наложены на массивы ТЛО [244].

На третьей стадии интеграции выполняется распознавание объектов местности или их составных элементов для построения гибридной ГПМ. Основой таких моделей являются наиболее точные и детализированные данные ДЗЗ, а недостающие зоны заполняются данными, полученными другими методами измерений. Благодаря применяемым методам распознавания в итоговую ГПМ можно включить лишь те объекты или их элементы, которые получены определенным методом ДЗЗ и лучше всего описывают местность [231]. Также результаты распознавания объектов по одним данным ДЗЗ могут быть использованы для повышения достоверности распознавания по другим. Например, в [203] приведена методика, позволяющая классифицировать массивы ТЛО на основе классификации фотограмметрических массивов.

Учесть все многообразие методов и методик обработки данных ДЗЗ позволяет универсальная технологическая схема обработки и интеграции данных ДЗЗ по уровням (рисунок 2.6). Эта схема включает две группы методов: на основе фотосъемки и технологии ЛС. Она может сочетать в себе обработку разновременных данных, данных различного разрешения, плотности или точности, а также полученных различными сенсорами, основанными на одном и том же или различных принципах регистрации измерений.

При интеграции данных, полученных методами разных групп, в зависимости от ее целей, вида конечной продукции и конфигурации съемочного оборудования всего можно выделить четыре уровня интеграции:

- объектный уровень интеграции;

- обработка данных фотосъемки с помощью ЛС;
- обработка данных ЛС с помощью фотосъемки;
- интеграция разнородных данных одной системы ДЗЗ.

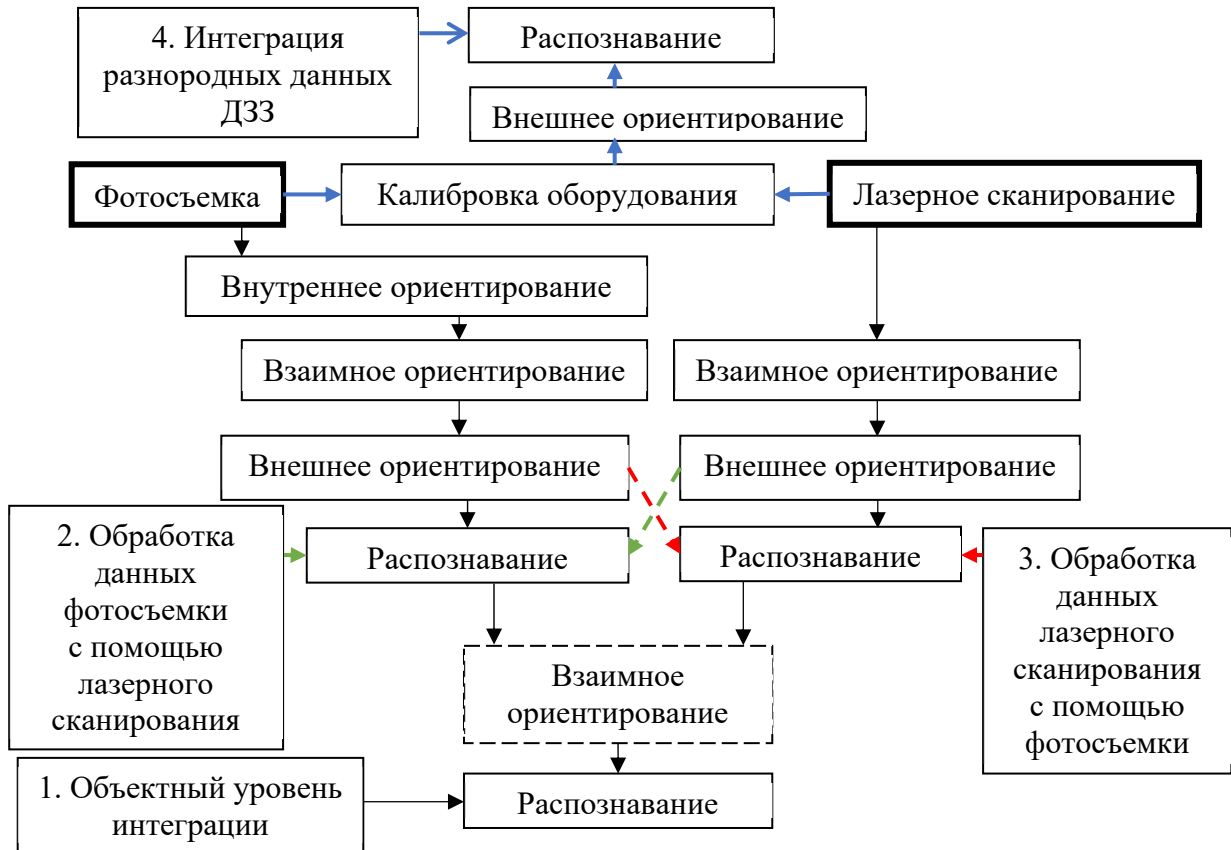


Рисунок 2.6 – Универсальная технологическая схема обработки и интеграции данных ДЗЗ по уровням

Объектный уровень интеграции подразумевает, что данные фотосъемки и ЛС сначала обрабатываются отдельно. Внешнее ориентирование разнородных данных выполняется независимо. Получается гибридная модель. Например, ЦМР строится по массиву ТЛЮ, а структурные линии дорог, контуры зданий векторизуются по данным фотосъемки. В случае недостаточной точности после независимого внешнего ориентирования дополнительно может быть выполнено взаимное между двумя наборами разнородных данных. Это можно осуществить на основе общих точек, линий и контуров, идентифицированных в обоих наборах данных.

Уровень интеграции путем обработки данных фотосъемки с помощью ЛС при-

меняется, когда необходимо, в первую очередь, обработать данные фотосъемки, а данные ЛС только помогают выполнить эту обработку на определенном этапе. Например, по данным АФС строятся ортофотопланы, где используется информация о рельефе, полученная не в результате фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, а в результате распознавания точек поверхности земли из массива данных ЛС.

Уровень интеграции путем обработки данных ЛС с помощью фотосъемки используется при обратной ситуации – когда в первую очередь обрабатываются данные ЛС, а фотоснимки применяются для извлечения дополнительной информации. Например, в качестве такой информации может служить истинный цвет объектов местности.

Последний уровень интеграции, интеграция разнородных данных одной системы ДЗЗ, применяется в случае, если цифровая камера и лазерные сканеры жестко закреплены в пределах единой съемочной системы. Главное отличие этого уровня интеграции от предыдущих заключается в том, что этап взаимного ориентирования здесь необязателен, так как параметры калибровки съемочной системы уже известны или вычисляются отдельно.

Разработанная методология интеграции включает различные варианты сочетания разнородных данных ДЗЗ (таблица 2.1). При первом варианте интеграции выполняется привязка снимков и массивов ТЛО, полученных методом ВЛС. В этом варианте чаще всего реализуется четвертый уровень интеграции, когда аэрофотоаппарат и лазерный сканер жестко закреплены в одной системе, а для определения их ЭВзаимО выполняется калибровка. Для выполнения калибровки осуществляют серию тестовых полетов или специальную предварительную обработку на основе данных основного полета.

Таблица 2.1 – Варианты интеграции разнородных данных ДЗЗ

1	2	3	4	5	6
АФС (КС) + ВЛС	АФС+ВЛС 1 + ВЛС 2	АФС (КС) + НЛС	АФС (КС) + МЛС	НФС + НЛС	НФС + МЛС

Одной из методик определения параметров калибровки на этапе предварительной обработки может быть следующая, которая использует сразу несколько подходов к интеграции:

- распознавание линейных элементов по массиву ТЛО и аэрофотоснимкам (комбинированный подход);
- предварительное уравнивание массивов ТЛО и аэрофотоснимков на основе распознанных элементов;
- генерация фотограмметрических массивов точек по аэрофотоснимкам (трехмерный подход);
- применение метода ИСР для точного уравнивания массивов ТЛО и фотограмметрических массивов точек.

Второй вариант интеграции применяется, когда необходимо привязать данные второго полета системы ВЛС к результатам первого. В этом случае реализуется объектный уровень интеграции. Взаимное ориентирование разновременных данных ВЛС выполняется с помощью метода обратной фотограмметрической засечки.

Третий вариант интеграции заключается в привязке аэрофотоснимков к данным НЛС. Целью этого варианта зачастую является повышение точности данных АФС до точности результатов НЛС. Массивы ТЛО могут быть использованы в качестве источника опорных данных, а аэрофотоснимки для заполнения теневых зон.

Четвертый вариант интеграции реализуется между данными АФС и МЛС. Этот вариант может быть использован для решения той же задачи, что и третий, но находит основное применение на застроенных городских территориях, когда необходимо повысить точность данных МЛС до точности данных АФС, так как в условиях плотной городской застройки качество спутникового сигнала, непосредственно влияющего на точности массива ТЛО, резко падает. В этом случае данные АФС используются в качестве источника опорных данных. Предпочтение прежде всего отдается методу АФС с помощью БВС, так как существенно понижается трудоемкость и себестоимость выполняемых работ по сравнению с ПЛА.

Пятый и шестой варианты интеграции применяются, когда необходимо оперативно заполнить теневые зоны в массивах ТЛЮ, полученных методами НЛС и МЛС. В этом случае досъемка выполняется методом НФС. Также осуществляется калибровка камеры, входящей в состав системы МЛС или НЛС.

Также интеграция может выполняться среди однородных данных ДЗЗ, полученных различными методами (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Варианты интеграции однородных данных ДЗЗ

1	2	3	4
АФС + НФС	ВЛС + НЛС	ВЛС + МЛС	МЛС + НЛС

Первый вариант интеграции однородных данных применим для уточнения деталей отдельных объектов, занимаемых небольшую площадь. Например, АФС для отображения крыш зданий, а НФС – их стен. Второй и третий варианты интеграции однородных данных аналогичны третьему и четвертому вариантам интеграции разнородных. При четвертом варианте интеграции НЛС применяется для заполнения теневых зон массива ТЛЮ, полученного методом МЛС.

На рисунке 2.7 представлена разработанная методология интеграции, этапы которой опираются на результаты анализа территории геодезической съемки: линейно-протяженный или площадной объект, наличие растительности, застроенная или незастроенная территория, площадь территории.

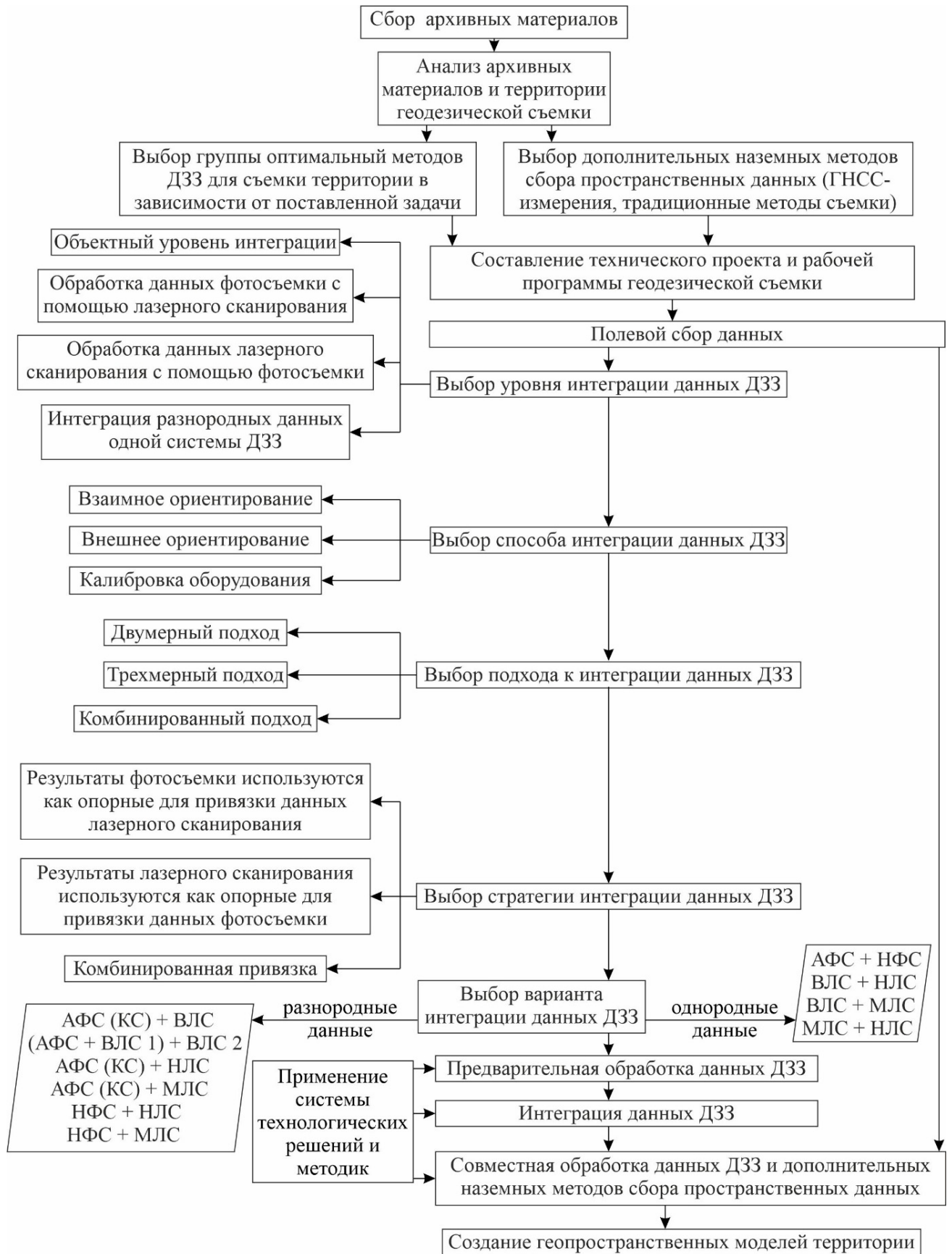


Рисунок 2.7 – Методология интеграции данных ДЗЗ

2.5 Технология геопространственного моделирования территории транспортной инфраструктуры по данным ДЗЗ

В соответствии с принципом системности все технологические решения и методики сбора и обработки пространственных данных разделяются на четыре этапа: подготовительные работы, полевой сбор данных, предварительная и тематическая обработка.

На рисунке 2.8 приведена технология геопространственного моделирования по данным ДЗЗ, являющихся основой решения научно-технических задач сферы ТИ, в которой традиционные наземные геодезические методы и ГНСС-съёмка применяются только в качестве дополнительного источника данных при создании ПВО и в случае, если выбранной группы методов ДЗЗ оказывается недостаточно. Представленная технология основана на разработанной структуре единого геопространства территории ТИ и включает методологию интеграции данных ДЗЗ.

Этап подготовительных работ заключается в следующем:

- постановка задачи, которую требуется решить;
- сбор доступных архивных материалов;
- анализ архивных материалов и территории ТИ;
- выбор наиболее оптимального метода сбора данных ДЗЗ или их группы. Выполняется путем применения функции F_g . Если делается вывод о необходимости применения более одного метода ДЗЗ в соответствии с принципом оптимальности, то выбирается определенный вариант интеграции разработанной методологии;
- выбор дополнительных методов сбора пространственных данных (традиционные наземные геодезические методы, ГНСС-съёмка);
- составление технического проекта на выполняемые работы, в котором выбирается формат готовой продукции, описывается ее содержание, обосновывается выбор применяемого оборудования, приводится список архивных материалов, проектных документов и другой информации об объекте съёмки;

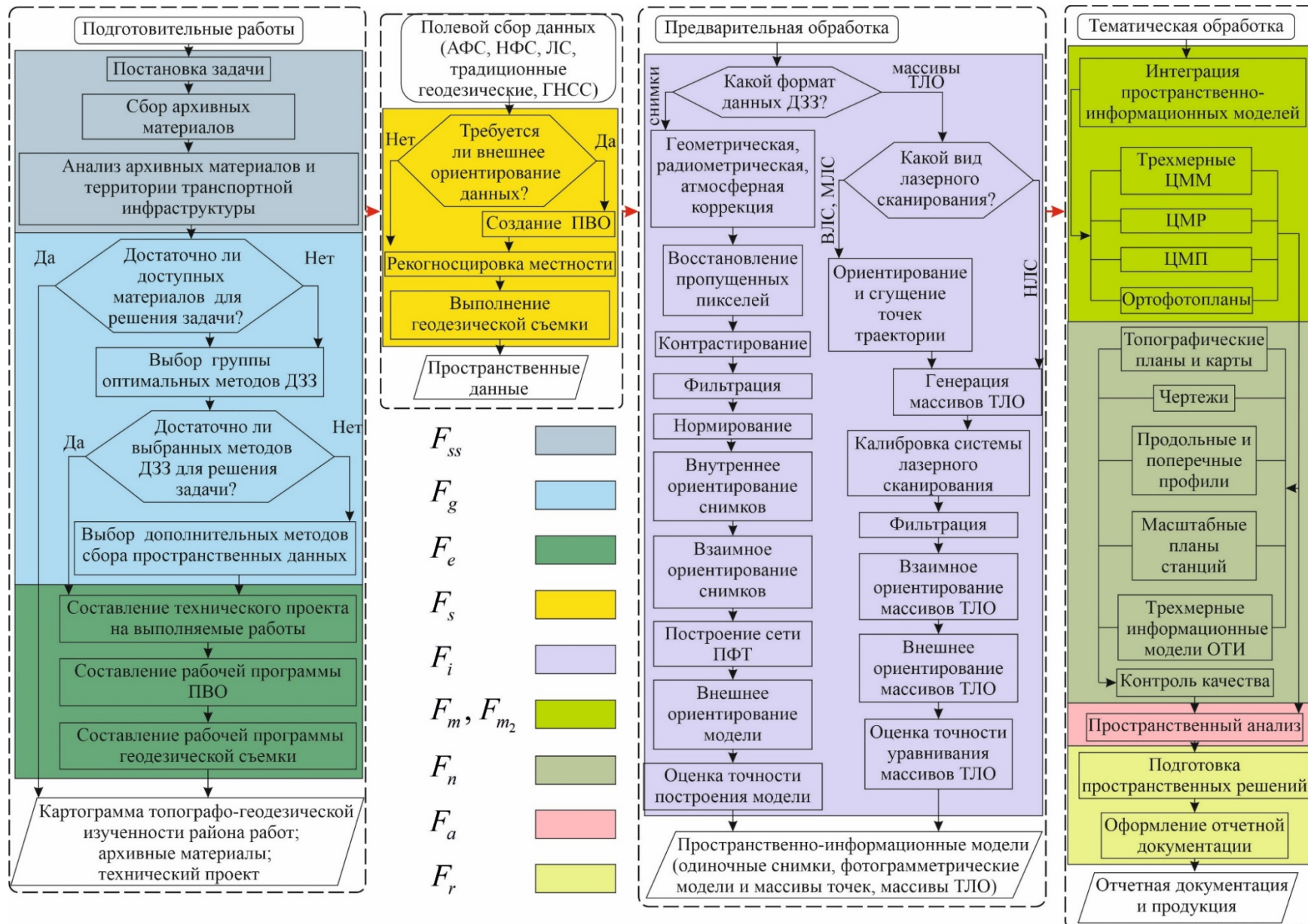


Рисунок 2.8 – Технология геопро пространственного моделирования территории ТИ по данным ДЗЗ

- составление рабочей программы по созданию ПВО, в которой указывается проект сети, метод создания ПВО и определяется способ его закрепления;
- составление рабочей программы по геодезической съемке с помощью выбранных методов сбора пространственных данных. Эта программа может включать результаты расчета параметров АФС, схему размещения сканерных станций при НЛС и расположения маршрутов движения при АФС, ВЛС или МЛС. С целью получения оптимального по плотности массива ТЛО при НЛС рассчитывается шаг сканирования, а при ВЛС и МЛС – скорость движения транспортного средства с установленной системой МЛС при определенной частоте сканирования и частоте зондирующих импульсов. Требования к минимальной плотности массива ТЛО зависят от точности измерений выполняемых работ и определяются по формуле [68]

$$P_{\min} = \left(\frac{1}{k} + 1 \right)^2, \quad (2.59)$$

где P_{\min} – минимальное число ТЛО на 1 м²;

k – допуск погрешности измерений.

При составлении рабочей программы также учитывают применяемый технологический процесс: проектный или общий.

На этапе полевого сбора данных выполняются следующие виды работ:

- создание ПВО, в ходе которого выполняется рекогносцировка местности для уточнения его схемы, закрепление точек ПВО, измерение их координат, обработка результатов измерений, и готовится каталог координат и высот точек ПВО;
- рекогносцировка местности с целью уточнения схемы осуществления геодезической съемки с помощью выбранных методов;
- геодезическая съемка местности в соответствии с разработанной рабочей программой.

Если результатом полевого сбора стал набор данных ДЗЗ нескольких видов, то далее необходимо применение системы технологических решений и методик их

совместной обработки, базирующейся на разработанных методологических принципах и методологии интеграции.

Результатом этапа предварительной обработки являются ПИМ в виде одиночных снимков, фотограмметрических моделей или единых массивов ТЛО. Содержание этого этапа зависит от вида данных ДЗЗ, обработка которых выполняется независимо друг от друга с целью создания отдельных ПИМ.

Для снимков оптического диапазона на этапе предварительной обработки в соответствии с принципом качества могут применяться методы улучшения изображений, которые включают выполнение геометрической, радиометрической и атмосферной коррекции, восстановление пропущенных пикселей, контрастирование, фильтрацию и нормирование [89, 92, 177].

Восстановление пропущенных пикселей выполняется посредством интерполяции значений яркостей пикселей. Контрастирование позволяет улучшить изображения за счет увеличения диапазона яркостей. Фильтрация позволяет снизить зернистость, уровень различных помех на изображениях, таких как шумы фотоприемных устройств и каналов связи, подчеркнуть контуры объектов. Все методы фильтрации разделяются на пространственные и частотные.

Пространственные методы связаны с изменениями значений яркости пикселей. Они делятся на линейные и нелинейные. Процессы пространственной обработки изображений описываются уравнением [43]

$$g(x, y) = T[f(x, y)], \quad (2.60)$$

где $f(x, y)$ – входное изображение;

$g(x, y)$ – обработанное изображение;

T – оператор над f , определенной в некоторой окрестности точки (x, y) .

Для определения окрестности около точки (x, y) применяются прямоугольные или квадратные маски. Центр маски попиксельно двигается по всему изображению, выполняя при линейной фильтрации свертку, которая описывается оператором T .

Для устранения влияния условий съемки осуществляется нормирование изображений. Нормирование заключается в приведении однотипных участков местности к одним и тем же яркостным характеристикам на различных изображениях посредством вычисления отношения средних яркостей на различных снимках [177].

Далее осуществляется фотограмметрическая обработка снимков, заключающаяся в их внутреннем и взаимном ориентировании, построении сети пространственной фототриангуляции (ПФТ), внешнем ориентировании построенной фотограмметрической модели, которая является основным результатом предварительной обработки аэрокосмических снимков [32].

Предварительная обработка данных ВЛС и МЛС начинается с уравнивания точек траектории в результате совместной обработки результатов спутниковых измерений. Пространственные координаты точек траектории соответствуют положению подвижного ГНСС-приемника, отсчитываются относительно центра ГНСС-антенны или системы ИНС. Для достижения более высокой точности уравнивания координат точек траектории следует использовать режим пост-обработки, что позволяет исключить проблему появления помех у радиосигнала и запаздывания применения дифференциальных поправок, которая присуща для режима обработки ГНСС-данных в реальном времени [103].

Для уравнивания координат точек траектории, соответствующей положению подвижных приемников системы ЛС, используются известные координаты базовых станций. Количество точек траектории невелико и для достижения заявляемых производителями систем ЛС значений точности определения пространственных координат массива ТЛО необходима дополнительная информация, которую обеспечивает система ИНС – к уравненным координатам точек траектории добавляется информация об угловой ориентации системы ЛС в каждый момент времени.

Система ИНС позволяет выполнить сгущение и ориентирование траектории. Траектория дополняется новыми точками, к каждой из которых добавляется информация об угловой ориентации, представляющей собой вектор направления

перемещения подвижного спутникового приемника, входящего в комплект системы ЛС [102, 110, 112].

Затем выполняется генерация массивов ТЛО. Для системы ВЛС и МЛС генерация выполняется на основе совместной обработки уравненной траектории и лазерных дальномерных измерений. При НЛС координаты точек объектов местности рассчитываются относительно установленного стационарно лазерного сканера только на основе дальномерных измерений и фиксации углов отклонения лазерного луча блоком развертки.

На основе сгенерированных массивов ТЛО далее может быть выполнена калибровка системы ЛС, заключающаяся в вычислении ЭВзаимО лазерных сканеров и цифровых камер, а также ЭВнутО для последних. Осуществление этих процессов выполняется путем поиска соответственных точек на массивах ТЛО и цифровых снимках [285].

После этого в соответствии с принципом качества с целью снижения шумовых составляющих сгенерированных массивов ТЛО и для их сглаживания применяются различные методы фильтрации [15, 192, 310].

В настоящее время существует большое число методов фильтрации результатов ЛС. Существуют разнообразные классификации методов фильтрации массивов точек. Согласно одной из них все методы фильтрации разделяются на семь групп: статистические, методы на основе соседства, проецирования, обработки сигналов, составления дифференциальных уравнений, гибридные методы и группа других методов [199, 265, 310].

Статические методы используют средства математической статистики, такие как метод главных компонент, кластерный анализ, байесовский классификатор, метод максимального правдоподобия, метод наименьших квадратов.

Методы на основе соседства вычисляют подобие между анализируемой и всеми соседними точками.

В методах, основанных на проецировании, осуществляется поиск опорной поверхности, на которую выполняется проецирование всех точек массива [265]. Ме-

тоды данной группы уменьшают шум путем сглаживания массива ТЛЮ, а также удаляют изолированные ложные точки.

Методы на основе обработки сигналов содержат разнообразные фильтры, которые разработаны на основе дискретных ортогональных преобразований, таких как преобразование Лапласа и Фурье.

Методы, основанные на составлении дифференциальных уравнений, расширяют сферы применения этих уравнений и частных производных [310].

Гибридные методы используют несколько методов фильтрации совместно. К группе других методов относятся те, которые не подходят ни к одной из описанных групп. К такой группе можно отнести следующие [277, 300]: представление пространства массива ТЛЮ в виде трехмерной воксельной сетки; классификация нижних точек; классификация воздушных точек; классификация точек, расположенных ниже поверхности; классификация изолированных точек.

Метод фильтрации путем представления всего охватывающего массив ТЛЮ пространства в виде трехмерной воксельной сетки заключается в том, что в пределах границ каждого вокселя для множества точек определяется пространственное среднее положение. Количество точек массива ТЛЮ после фильтрации будет равно количеству вокселей. Недостатком этого метода будет потеря геометрической информации вследствие снижения плотности массива точек и зависимость точности его положения от числа ошибочных точек [277].

Метод классификации нижних точек позволяет выделить находящиеся под уровнем физической поверхности земли одиночные ложные точки или их группы. Сначала задается максимальное количество точек в группе. Осуществляется поиск не более определенного количества точек в группе, находящихся в пределах заданного радиуса ниже указанного превышения относительно остальных точек.

Метод классификации воздушных точек осуществляет поиск ложных точек путем расчета среднего значения отметки и среднего квадратического отклонения значений отметок точек, располагаемых в рамках указанного радиуса. Минимальное количество точек в пределах радиуса не должно быть менее заданного пользо-

вателем значения. Точка распознается как воздушная, если ее отметка отличается от среднего значения отметки больше, чем на произведение значения среднего квадратического отклонения и выбираемого коэффициента.

Метод классификации точек, расположенных ниже поверхности, осуществляет поиск ошибочно распознанных точек физической поверхности земли. Для каждой точки метод распознает до 25 соседних точек, в которые выполняет вписывание плоской или сплайновой поверхности. Выполняется расчет среднего значения превышения между поверхностью и точками. Точка исключается из поверхности в том случае, если превышение между ними больше результата произведения рассчитанного среднего значения превышения и выбираемого коэффициента.

Метод классификации изолированных точек позволяет распознать ТЛО, удовлетворяющие условию: в пределах задаваемого от анализируемой точки радиуса находится в пространстве не более указанного количества точек.

После фильтрации массивов ТЛО выполняется их уравнивание, которое состоит из взаимного и внешнего ориентирования. Взаимное ориентирование массивов ТЛО, полученных методом НЛС, позволяет объединить отдельные сканерные позиции в единую точечную модель. В свою очередь, взаимное ориентирование данных ВЛС и МЛС выполняется в целях создания такой модели на основе массивов ТЛО, находящихся в межмаршрутных перекрытиях. Съемка в несколько маршрутов необходима для покрытия территории большей площади при ВЛС. При МЛС путем многократного сканирования одной и той же территории происходит снижение количества теневых зон, возникающих из-за съемки с земли. Следствием съемки в несколько маршрутов также является увеличение плотности массивов ТЛО и повышение внешней точности их пространственного положения. От точности выполненного взаимного ориентирования зависят дешифровочные свойства единого массива ТЛО. Большие значения ошибок взаимного ориентирования проявляются в виде двоений контуров объектов местности [145]. Другой причиной их появления является недостаточно точно выполненная калибровка оборудования, которое включает несколько сканеров в одной системе, что характерно для метода

МЛС. Вычисление ЭВзаимО лазерных сканеров возможно по данным тестовых проездов в различных направлениях в ходе калибровочной процедуры. В случае жесткого закрепления лазерных сканеров в измерительном блоке ЭВзаимО сохраняются при повторном сборе и установке системы ЛС на носитель. В противном случае калибровочная процедура повторяется при каждой новой установке [154, 266].

С целью привязки данных ЛС к требуемой системе координат выполняется их внешнее ориентирование. Для этого применяются координаты контрольных и опорных точек, расположенных в пределах территории съемки [201, 228, 309]. Необходимое количество этих точек зависит от требований к точности определенной решаемой задачи [252]. Результатом внешнего ориентирования является единая точечная модель местности в заданной системе координат. К этой модели могут быть повторно применены методы фильтрации с целью удаления остаточных ложных точек, а также для распознавания точек определенного класса, в частности точек земли.

Этап тематической обработки начинается с интеграции ПИМ, полученных на основе различных наборов данных ДЗЗ, с целью создания гибридных ПИМ и ГПМ ОТИ, цифровой продукции и решения определенных задач, описанных для сферы ТИ в 1.4.

Цифровая продукция проходит контроль качества. На основе ГПМ и созданной продукции подготавливаются пространственные решения, выполняется оформление отчетной документации для сдачи заказчику.

Для достижения высокого качества создания продукции и решения с ее помощью задач сферы ТИ все применяемые методы сбора пространственных данных должны быть согласованы между собой, что позволяет добиться высокого экономического эффекта при их достаточном количестве. Это утверждение соответствует принципу согласованности, на основе которого необходимо разработать определенные технологические решения по сбору и обработке пространственных данных таким образом, чтобы они дополняли друг друга и не противоречили.

На этапе тематической обработки, в соответствии с принципом гибкости, должна учитываться специфика решаемой задачи определенной сферы, требования к точности получения необходимых пространственных данных, особенности территории съемки. Для сферы ГИ – это геодезическая съемка преимущественно линейно-протяженных объектов с различными значениями точности.

Основным условием тематической обработки нескольких различных видов данных ДЗЗ является их получение в едином координатном пространстве, что соответствует принципу единства измерений.

2.6 Автоматическая привязка данных ДЗЗ по способу взаимного ориентирования

2.6.1 Технологическая схема привязки по способу взаимного ориентирования

На рисунке 2.9 приведена технологическая схема привязки по способу взаимного ориентирования.

Привязка данных ДЗЗ на основе двумерного подхода предполагает выполнение отождествления изображений. Двумерный подход при привязке данных ДЗЗ применяется в следующих случаях [16, 74]:

- взаимное ориентирование аэрокосмических и наземных снимков для построения фотограмметрических моделей в виде ПИМ;
- построение растровой модели M_r в виде ортофотоплана на основе фотограмметрических моделей;
- построение плотного фотограмметрического массива точек в виде векторной точечной модели M_{pt} на основе фотограмметрических моделей;
- взаимное ориентирование снимков, ортофотопланов и сгенерированных по массиву ТЛО изображений, позволяющее построить гибридную векторную точечную модель M_{pt} на основе данных ЛС и фотосъемки;
- взаимное ориентирование разновременных снимков, полученных различными сенсорами и в разные моменты времени, для выявления изменений.

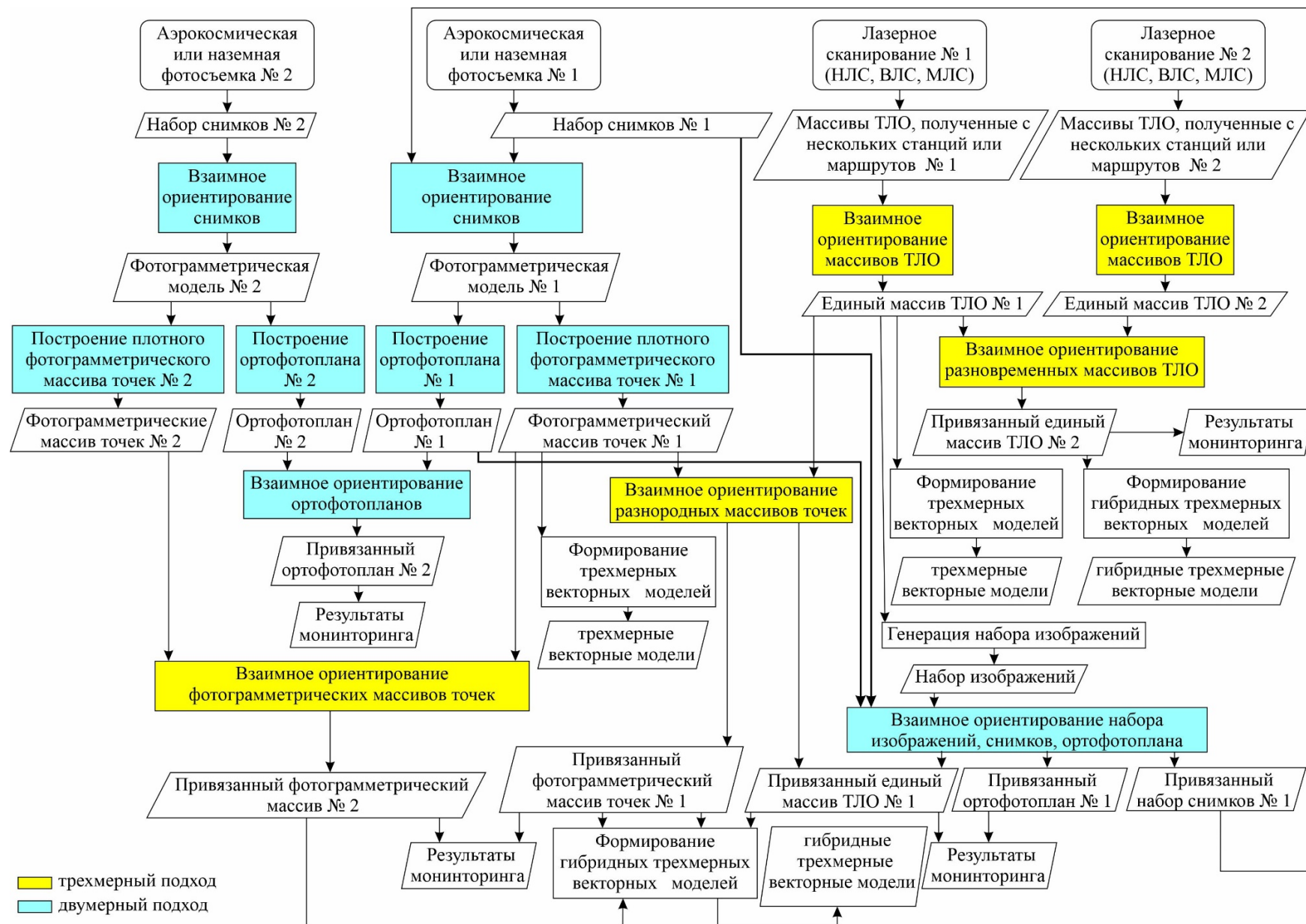


Рисунок 2.9 – Технологическая схема привязки по способу взаимного ориентирования

Привязка данных ДЗЗ на основе трехмерного подхода предполагает выполнение отождествления трехмерных массивов точек. Трехмерный подход при привязке данных ДЗЗ применяется в следующих случаях [16]:

- взаимное ориентирование массивов ТЛО, полученных одним методом ЛС с соседних сканерных позиций или маршрутов, с целью построения единого массива ТЛО в виде ПИМ;
- взаимное ориентирование массивов ТЛО, полученных разными методами ЛС, для построения векторной модели M_v ;
- взаимное ориентирование плотного фотограмметрического массива точек и массива ТЛО для построения векторной модели M_v ;
- взаимное ориентирование разновременных массивов ТЛО для выявления изменений;
- взаимное ориентирование разновременных фотограмметрических массивов точек.

2.6.2 Анализ методов привязки на основе двумерного подхода

Всего можно выделить две основные классификации методов автоматической привязки изображений и согласно первой – можно выделить три группы [185]: локальные, основанные на выделении деталей или областей изображений; глобальные; полуглобальные.

Согласно второй классификации методы отождествления разделяются на четыре группы [276]: спектральные методы (применяющие значения яркости пикселей); структурные методы (Фурье-преобразование, вейвлет-преобразование); методы, использующие детали низкого уровня (границы, углы); методы, использующие детали высокого уровня (крупные объекты).

На рисунке 2.10 приведена обобщенная классификация методов привязки на основе двумерного подхода.



Рисунок 2.10 – Методы привязки на основе двумерного подхода

Локальные методы отождествления, основанные на выделении областей изображений, выполняют площадное отождествление путем сравнения пикселей фрагментов изображений определенного размера вокруг интересующей точки, к которым относятся корреляционные методы, метод наименьших квадратов и их модификации [224, 256, 289]. Недостатком этих методов отождествления является сильное влияние освещенности территории, необходимость наличия выраженной текстуры, а также возможность появления ошибок отождествления на границах снимков и рядом с границами высотных объектов.

Локальные методы отождествления, основанные на выделении деталей изображений, сущность которых заключается в следующем [185, 293]:

– на изображениях выделяются определенные детали в виде характерных точек с помощью специальных операторов, называемых детекторами, и которые представляют собой центр масс полигонов, линий, пересечений линий, углов и т. д. Детекторы позволяют найти на изображениях области, где контраст изменяется сильнее всего. Наилучшими детекторами являются те, которые инвариантны к масштабированию, повороту и сдвигу;

– характерные точки отождествляются посредством анализа вокруг них локальной области, ее описания с помощью дескрипторов и их сравнении.

Наиболее широкое распространение получили детекторы, позволяющие распознавать углы [258, 286]. Углы – это области на изображениях, где небольшое изменение местоположения приводит к значительному изменению значений яркости как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. К таким детекторам относятся операторы: Моравека, Харриса, Ши-Томаси, Форстера, FAST, MSER (Maximally Stable Extremal Regions) и т. д. Эти детекторы оптимальны для распознавания характерных точек на изображениях застроенных территорий.

Существует большое количество различных дескрипторов, некоторые из которых также позволяют решать задачу детекторов – поиска характерных точек. Например, дескриптором, который имеет только функцию описания связей, является BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) [264]. Дескрипторами, включающими функцию детекторов, являются SIFT [68, 193, 285] и SURF [166, 220]. Существуют различные модификации метода SIFT, такие как DWT-SIFT, ASIFT, UR-SIFT, PCA-SIFT, SAR-SIFT и др. [230, 260, 274, 288].

Недостатком работы всех локальных методов автоматической идентификации соответственных характерных точек изображений является то, что они допускают большой процент неверных отождествлений. Для уменьшения процента неверных отождествлений дополнительно могут применяться различные методы фильтрации характерных точек, которые были ошибочно определены. Среди таких методов, наибольшую популярность приобрел метод RANSAC и его модификации [306]. Преимуществом метода является его устойчивость к различным выбросам, шумам. То есть метод не искажает модель, дает надежную оценку результатов отождествления с помощью локальных методов [162].

При применении описанных локальных методов с целью сужения области поиска соответственных точек могут применяться операторы высокочастотной фильтрации, позволяющие выделить границы объектов в виде линий и полигонов [43]. Наиболее известными из них являются операторы Робертса, Кэнни, Собеля, Прю-

итта и Лапласа. Границы изображений операторы выделяют на основе обнаружения изменений значений яркости пикселей. Операторы позволяют выделить участки изображений, где контраст является наибольшим.

Глобальные и полуглобальные методы отождествления. Глобальные методы наиболее трудоемки для реализации. Данная группа методов находит взаимосвязи сразу между всеми пикселями изображений, анализирует не только разности значений яркостей соответственных пикселей, но и учитывает взаимосвязи между соседними пикселями с целью определения изменений разностей продольных параллаксов [185]. Каждый пиксель сравнивается со всеми окружающими пикселями.

Чтобы упростить процесс реализации методов глобальной группы и ускорить их работу в 2005 г. Хиршмюллером был разработан метод так называемого полуглобального отождествления Semi-Global Matching (SGM) [154]. В данном методе сравниваются не все пиксели смежных изображений, а лишь те, которые находятся вдоль заданных направлений, базисных линий. В первую очередь SGM применяется для построения плотного массива точек. В настоящее время появляется огромное число методов, являющихся дальнейшим развитием идеи Хиршмюллера [46], среди которых следует выделить метод, предложенный в [185], благодаря чему стало возможным применять для поиска соответственных характерных точек не-трансформированные снимки.

2.6.3 Анализ методов привязки на основе трехмерного подхода

Для привязки по трехмерному подходу применяются методы взаимного ориентирования массивов точек. Их можно разделить на две группы [281]:

- методы предварительного уравнивания на основе вычисления приближенных ЭВзаимО массивов точек;
- методы точного уравнивания путем уточнения приближенных ЭВзаимО массивов точек, вычисленных методами предварительного уравнивания или определяемых при полевых измерениях.

На рисунке 2.11 приведена обобщенная классификация методов привязки на основе трехмерного подхода.

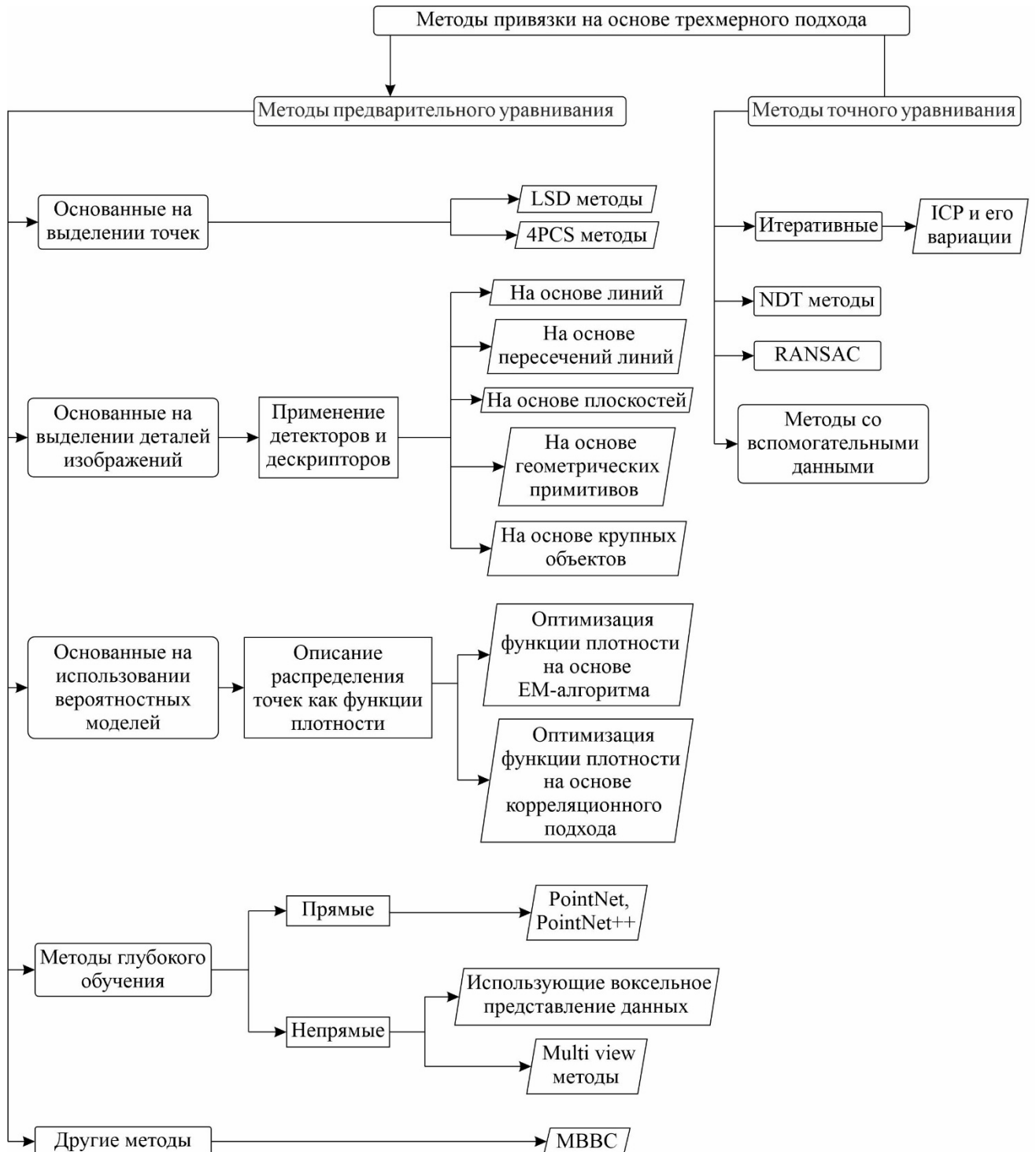


Рисунок 2.11 – Методы привязки на основе трехмерного подхода

Методы предварительного уравнивания разделяются на следующие [218, 281]: основанные на выделении точек; основанные на выделении деталей изобра-

жений; основанные на использовании вероятностных моделей; методы глубокого обучения и т. д.

Одним из наиболее простых методов предварительного уравнивания является метод «сопоставления центров ограничительных рамок» (MBBC). Его можно отнести в группу других методов [239].

Методы, основанные на выделении точек, являются наиболее универсальными и подходят для территорий с различным уровнем застроенности. Они разделяются на [218]:

- LSD (local shape descriptor) методы – выполняют поиск и отождествление соответственных точек на основе применения 3D-дескрипторов [280];
- 4PCS (four-point congruent set) методы – выполняют поиск группы четырех характерных точек, которые конгруэнтны соответствующей группе произвольно расположенных точек исходного массива.

Методы, основанные на выделении деталей, выполняют привязку трехмерных массивов данных в два этапа: выделение характерных деталей в каждом массиве, а затем их отождествление между массивами. В качестве таких деталей могут выступать характерные линии, пересечение линий, плоскости, геометрические примитивы, крупные объекты. Для распознавания таких объектов также применяются локальные и глобальные 3D-дескрипторы [211, 214, 217, 233, 286].

Методы, основанные на использовании вероятностных моделей, описывают распределение точек в массиве как функцию плотности, а затем выполняют ее оптимизацию с помощью корреляционного подхода или на основе алгоритма максимизации ожидания – EM-алгоритма (expectation maximization) [223].

Один из методов, основанный на корреляционном подходе, описан в [302], где в качестве меры сходства была предложена корреляция ядра.

EM-алгоритм основан на вычислении оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей. Одним из основных методов, использующих EM-алгоритм, является метод когерентного дрейфа точек CPD (coherent point drift).

Методы глубокого обучения основываются на применении нейронных сетей и разделяются на две большие группы: прямые и непрямые [200].

Прямые методы выполняют непосредственную привязку массивов точек. Одними из первых прямых методов глубокого обучения являются PointNet и PointNet++. Непрямые методы глубокого обучения выполняют предварительное преобразование массива в другую форму. Они делятся на использующие воксельное представление данных (voxelization) и основанные на получении набора изображений с разных ракурсов (multi view).

Методы точного уравнивания разделяются на группы [119]: итеративные, основанные на преобразовании нормального распределения (NDT), RANSAC, методы со вспомогательными данными.

Самым популярным итеративным методом точного уравнивания является «итеративный алгоритм ближайших точек» (ICP), основанный на анализе расстояний между ближайшими его точками и расчете параметров трансформирования [8, 221, 235, 239].

Методы точного уравнивания RANSAC применяются как для привязки изображений, так и массивов точек.

Сущность методов NDT заключается в том, что массивы точек преобразуются в трехмерную сетку, ячейки которой представлены с помощью непрерывных дифференцируемых функций нормального распределения [119].

Методы с вспомогательными данными используют дополнительную информацию, такую как результаты ГНСС-измерений или набор изображений.

2.7 Анализ методов распознавания объектов и дешифрирования данных ДЗЗ

Распознавание объектов выполняется в рамках процесса дешифрирования данных ДЗЗ, от качества выполнения которого зависит результат создания цифровой продукции и достоверность решения различных поставленных задач. Дешифрирование выполняется как по снимкам, так и по трехмерным массивам ТЛО. Дешифрирование разделяется на следующие виды [72]:

– визуальное. Выполняется оператором путем просмотра объектов, изображенных на снимках или массивах ТЛО. Визуальное дешифрирование основано на анализе прямых и косвенных дешифровочных признаков. При дешифрировании снимков прямыми признаками являются цвет, тон, текстура, форма, размер, а косвенными – взаимное расположение объектов, тени и другие, указывающие на факт наличия объекта. Понятие дешифровочных признаков можно применять и к трехмерным массивам ТЛО. К массивам ТЛО можно применять такие прямые признаки, как форма, размер, цвет, интенсивность отраженного сигнала, порядковый номер отражения, а также косвенные признаки, описываемые взаимным положением объектов. Недостатком визуального дешифрирования является то, что одновременно анализируется только ограниченное количество информации. Для снимков это любая комбинация из трех спектральных каналов, а для массивов ТЛО – информация о цвете, полученная в результате ее присвоения точкам со снимков, или информация об интенсивности и порядковом номере отражения;

– интерактивное. Оператор выполняет дешифрирование данных ДЗЗ, прошедших предварительную обработку с помощью средств вычислительной техники. Полученные в результате преобразования данные анализируются визуально;

– автоматизированное. Применяются методы и алгоритмы обработки данных ДЗЗ, выполняющие их преобразование и предварительную классификацию. Оператор выполняет окончательный анализ обработанных данных;

– автоматическое дешифрирование. Распознавание объектов выполняется без участия оператора.

Автоматизированное и автоматическое дешифрирование основано на применение методов распознавания образов, за разработку которых отвечает область компьютерного зрения. Компьютерное зрение – это сложная система, под которой понимается процесс выделения, идентификации и преобразования информации, полученной одним из методов ДЗЗ [171].

Автоматизированное и автоматическое дешифрирование данных ДЗЗ можно разделить на следующие процессы [28, 46, 72]: преобразование данных ДЗЗ, выбор

дешифровочных признаков, сегментация данных ДЗЗ, выбор метода распознавания, классификация данных ДЗЗ в соответствии с методом распознавания, оценка достоверности классификации.

Компьютерное зрение включает все эти процессы, а также решает вопросы, связанные со сбором и обработкой данных ДЗЗ. На рисунке 2.12 показана связь области компьютерного зрения с этапами разработанной технологии геопространственного моделирования, а на рисунке 2.13 приведены методы автоматизированного дешифрирования.

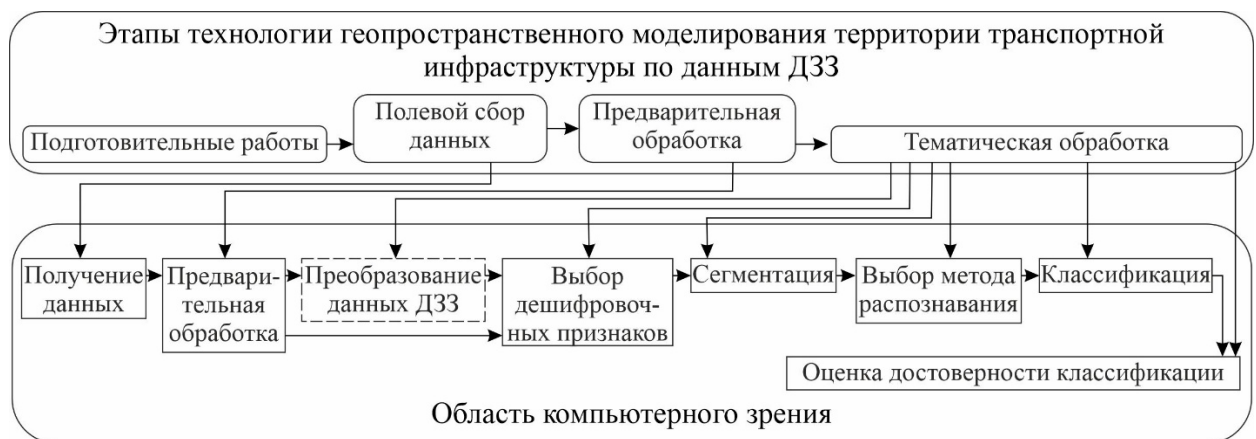


Рисунок 2.12 – Связь области компьютерного зрения с этапами технологии сбора и обработки данных ДЗЗ

Преобразование данных ДЗЗ выполняется перед применением определенных методов распознавания.

Для изображений выполняются спектральные преобразования, основными из которых являются следующие: создание индексных изображений, преобразование по методу главных компонент, преобразование по методу независимых компонент, преобразование по методу Tasseled Cap.

Суть спектральных преобразований заключается в переходе от одного пространства признаков к другому [190].

Создание индексных изображений выполняется в результате применения математических операций со значениями отражательной способности в различных зонах спектра [304].

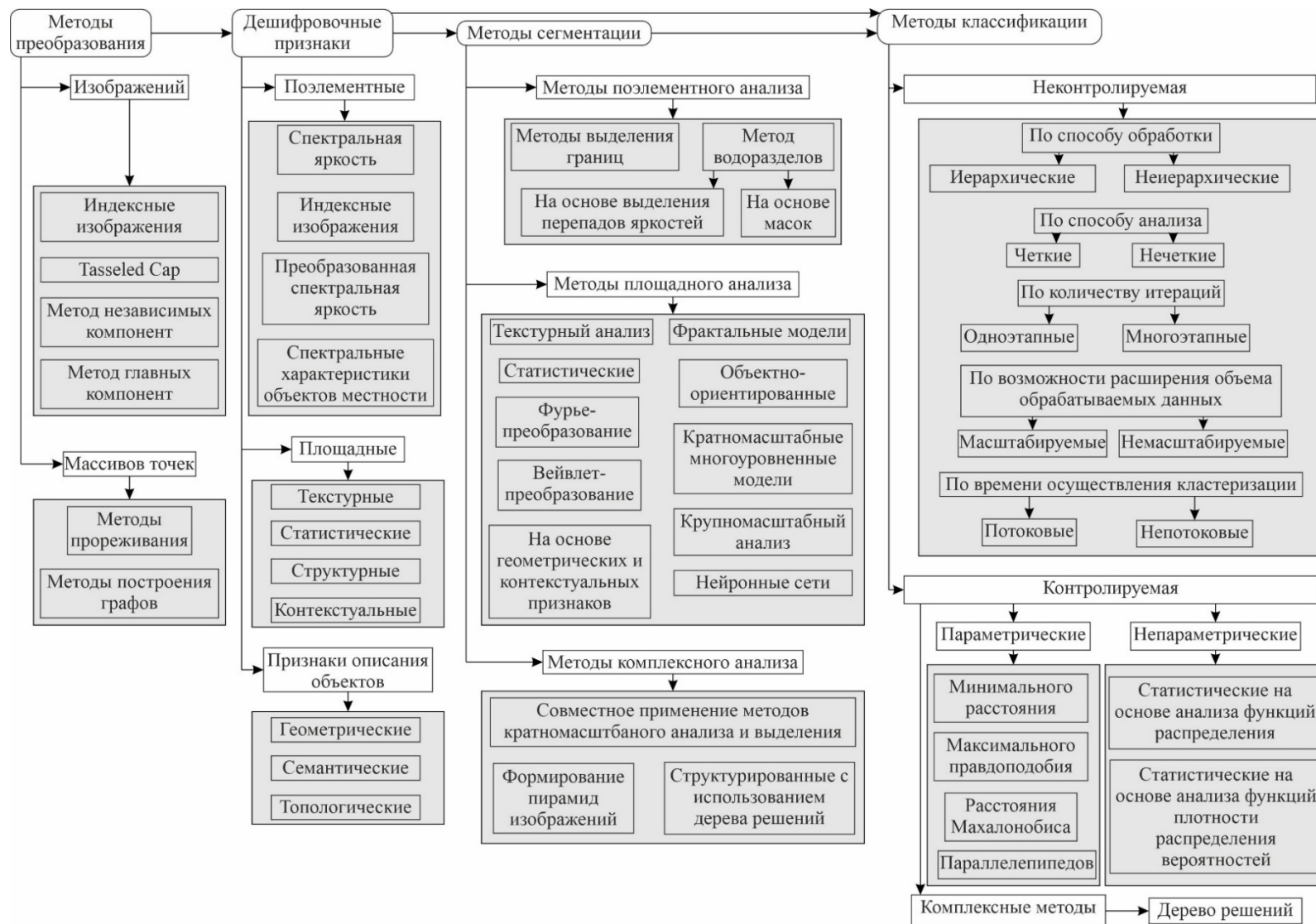


Рисунок 2.13 – Методы автоматизированного дешифрования данных ДЗЗ

Метод главных компонент применяется для создания более информативных сочетаний спектральных каналов изображений [227].

Преобразование Tasseled Cap было предложено с целью обобщения метода главных компонент. В отличие от метода главных компонент позволяет использовать фиксированный набор физических характеристик, который отличается у различных типов датчиков и съемочных систем. Коэффициенты преобразования Tasseled Cap подбираются для каждой съемочной системы отдельно [190]. Благодаря рассчитанным коэффициентам вычисляется новое изображение, компоненты которого имеют определенную зависимость между собой.

Независимость получения компонент позволяет обеспечить метод независимых компонент, который разделяет исходные каналы многоспектрального изображения даже в случаях, когда они не подчиняются нормальному закону распределения [70].

Для массивов точек популярным методом преобразования является представление данных в виде графов, что означает поиск центральных точек, вокруг каждой из которых находится определенное число ближайших соседей [85]. Также применяется большое количество методов прореживания, среди которых можно выделить следующие:

- вычисление точек с усредненными координатами на основе метода ближайших соседей;
- вычисление замкнутых контуров и гистограмм распределений координат точек;
- применение математической модели потенциального поля, которое состоит из смоделированных зарядов на поверхности объекта.

Все дешифровочные признаки разделяются на три большие группы: поэлементные, площадные и признаки описания объектов [46, 72].

Поэлементные признаки связаны с описанием отдельных элементов изображений:

- спектральные яркости пикселей;

– преобразованные спектральные яркости пикселей, получаемые в результате нормирования, применения индексов, преобразований по различным спектральным методам, таким как метод главных компонент, метод независимых компонент, Tasseled Cap. Такие операции выполняются на этапе предварительной обработки данных ДЗЗ;

– спектральные характеристики объектов местности.

Площадные признаки описывают группу взаимосвязанных элементов:

– текстурные признаки, характеризующие текстуру участка изображения по определенным факторам;

– структурные признаки, характеризующие участок изображения и определяемые коэффициентами разложения по ортогональным базисным функциям (коэффициенты Фурье-преобразования или вейвлет-разложения);

– статистические характеристики участка (функция распределения, функция плотности распределения вероятностей);

– контекстуальные признаки, характеризующие отношения между объектами и их свойства.

Признаки описания объектов разделяются на следующие:

– геометрические, такие как форма, объем, размер отдельных ЦМО или ЦМР местности;

– топологические признаки, характеризующие степень взаимосвязей между объектами;

– семантические признаки, представляющие собой атрибутивную информацию об объектах, хранящуюся в ГИС.

На основе выбранных дешифровочных признаков выполняется сегментация, выбор метода распознавания и классификация.

Методы сегментации по способу анализа данных можно разделить на следующие: поэлементный анализ, площадной анализ, комплексный анализ.

Поэлементный анализ использует поэлементные признаки. Для изображений к этой группе относятся методы выделения границ, основанные на применении масочных операторов выделения линий, которые имеют определенное направление,

или методы выделения перепадов яркостей с помощью градиентных операторов. Также сюда можно отнести метод водоразделов, основанный на анализе яркостей путем представления их значений в виде «высот» условной модели, плоские координаты которой соответствуют координатам пикселя изображения.

Площадной анализ применяет площадные дешифровочные признаки. К таким методам сегментации относятся: текстурный анализ, крупномасштабный анализ, нейронные сети, площадные статистические методы, объектно-ориентированные методы, фрактальные модели, кратномасштабные многоуровневые модели, Фурье-преобразование, вейвлет-преобразование, методы на основе применения геометрических и контекстуальных признаков.

Комплексный анализ включает методы, основанные на совместном использовании методов кратномасштабного анализа и выделения границ, формирование пирамид изображений, применение дерева решения. Кратномасштабный анализ заключается в выделении границ на различных уровнях разложения изображения или применения моделей различного вида для каждого масштаба. Масштаб изображения обеспечивает уровень детальности изображения и соответственно выделение определенного типа границ на каждом уровне разложения.

Классификация разделяется на неконтролируемую (без обучения) и контролируемую (с обучением) [104, 242]. Неконтролируемая классификация заключается в группировке пикселей изображения или точек массива без предварительной информации о количестве классов и их характеристик. Такой вид классификации еще называется кластерным анализом. Все методы кластерного анализа можно разделить на пять категорий [187]:

- по способу обработки данных: иерархические (CURE, BIRCH, ROCK, CHAMELION,) и неиерархические (PAM, K-MEANS, CLOPE);
- по способу анализа данных: четкие и нечеткие;
- по количеству итераций: с одноэтапной кластеризацией и с многоэтапной;
- по возможности расширения объема обрабатываемых данных: масштабируемые и немасштабируемые;

– по времени осуществления кластеризации: потоковые (on-line) и не потоковые (off-line).

Контролируемая классификация основана на признаках объектов, принадлежность которых к определенному классу на местности известна. С целью формирования вектора признаков используются эталонные участки на изображениях и фрагменты массива точек, соответствующих известному объекту. На основе вектора признаков строятся статистические модели. Наиболее распространенными статистическими моделями являются: метод минимального расстояния, метод максимального правдоподобия, метод расстояния Махаланобиса, метод параллелепипедов.

Описанные модели статистической классификации используют нормальный закон распределения. Статистические модели, соответствующие этому закону, называют параметрическими [73].

Параметрические модели, которые основаны на количественных признаках, позволяют упростить задачу распознавания объектов. Но если распределение отличается от нормального, то достоверность распознавания объектов при применении параметрических моделей снижается. При такой ситуации применяют непараметрические модели, основанные на качественных признаках [7, 71].

Согласно непараметрическому подходу для распознаваемых классов объектов создаются эталонные признаки в виде функций плотности распределения вероятностей или функций распределения [1, 3].

К контролируемой классификации также относится комплексный метод на основе дерева решений. Этот метод можно рассматривать с позиции теории графов или формальных языков грамматики. Деревья решений образуют ветви с множеством узлов [45].

2.8 Выводы по второму разделу

Решение метрических задач сферы ТИ выполняется по широкому набору пространственных данных, полученных различными методами геодезической съемки.

В ходе обработке пространственных данных выполняется построение ЦММ, которая может быть представлена в форме ПИМ или ГПМ территорий. Комплексное применение нескольких методов с целью создания ЦММ должно опираться на определенные методологические и теоретические основы. Для этого были определены методологические принципы интеграции данных ДЗЗ, которые позволили дать теоретическое обоснование для разработки технологии геопространственного моделирования с целью решения всех научно-технических задач дорожной отрасли и предложить структуру единого геопространства территории транспортной инфраструктуры. Такая структура позволяет представить этапы сбора и обработки пространственных данных в виде системы технологических решений, необходимых для создания координатного пространства. Доказано, что методы ДЗЗ являются основой формирования ЕГП, а остальные могут применяться в качестве дополнительных.

Рассмотренные теоретические основы интеграции данных ДЗЗ в единое координатное пространство были применены для разработки соответствующей методологии. Такая методология затрагивает различные комбинации методов ДЗЗ, подробно описывает процесс их привязки, формирования гибридных ПИМ и ГПМ.

На основе сформированной структуры ЕГП ОТИ и методологии интеграции данных ДЗЗ была разработана оптимальная технология геопространственного моделирования, описывающая этапы подготовительных работ; полевого сбора пространственных данных, полученных методами ДЗЗ, традиционными наземными геодезическими методами и ГНСС-съёмкой; предварительной и тематической обработки в едином координатном пространстве. Эта технология позволяет сформировать систему технологических решений и соответствующих методик геопространственного моделирования для решения задач сферы ТИ.

Представленные методология интеграции и технология геопространственного моделирования используют различные автоматизированные методы обработки данных ДЗЗ, которые позволяют ускорить различные процессы: привязку данных ДЗЗ, распознать объекты и выявить изменения. Все автоматизированные методы обработки были проанализированы и структурированы в виде отдельных схем.

3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СБОРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ

3.1 Факторы, влияющие на результат формирования пространственно-информационной модели

Результат формирования ПИМ в первую очередь зависит от качества фотоснимков и особенностей получения массивов ТЛО. Всего можно выделить несколько групп факторов, влияющих на результаты построения ПИМ [30, 28, 94, 85, 98, 75, 97]: инструментальные ошибки измерений, внешние условия выполнения измерений, метрологические свойства объектов местности, характеристика территории и ее уровень застроенности, ошибки опознавания марок и определения их координат, тип носителя съемочной системы, результаты подготовительных работ, метод внешнего ориентирования данных ДЗЗ, методические ошибки.

Для того чтобы ПИМ соответствовала принципу достоверности данных, все эти факторы должны быть учтены в ходе ее построения и при дальнейшем применении полученного результата при формировании ГПМ и создании цифровой продукции.

Инструментальные ошибки измерений. Эта группа ошибок связана с техническими характеристиками съемочного оборудования. Для цифровых камер такими характеристиками являются: тип затвора; наличие или отсутствие компенсации сдвига изображения; разрешающая способность камеры; размер матрицы; ЭВнуТО камеры; дисторсия объектива.

Внешние условия выполнения измерений. Внешние условия выполнения измерений связаны с состоянием атмосферы и уровня освещенности [206]. Состояние атмосферы оказывает влияние на результат сбора данных любыми методами ДЗЗ, а уровень освещенности – на данные, полученные пассивными методами. Кроме

этого, также можно выделить лазерную съемку территории при повышенной влажности после выпадения атмосферных осадков [40]. Большинство ошибок внешних условий выполнения измерений можно исключить посредством планирования съёмочных работ. В противном случае применяются различные методы улучшения изображений и фильтрации данных.

Метрологические свойства объектов местности. Метрологические свойства объектов местности влияют на погрешность измерения расстояний системами ЛС.

Характеристика территории. Эта группа ошибок связана с особенностями территории съёмки: рельеф местности, уровень застроенности территории, площадь территории съёмки, количество растительности на территории.

Ошибки опознавания марок и определения их координат. Ошибки опознавания марок могут существенно снижать точность фотограмметрических измерений при обработке результатов фотосъёмки и точности взаимного и внешнего ориентирования данных ЛС [100].

Тип носителя съёмочной системы. Тип носителя съёмочной системы накладывает ограничения на получаемый результат сбора данных системами ДЗЗ, в частности на разрешение получаемых фотоснимков, на плотность массива ТЛО.

Результаты подготовительных работ. Результат формирования ПИМ зависит также от проектных действий, выполненных на этапе подготовительных работ при создании рабочей программы ПВО и геодезической съёмки [31, 66, 96].

Метод внешнего ориентирования данных ДЗЗ. Точность определения пространственных координат точек местности также зависит от метода внешнего ориентирования: прямая или обратная фотограмметрическая засечка.

Методические ошибки. Эта группа ошибок связана с применением различных методик и методов предварительной обработки данных ДЗЗ, реализованных в определенном ПО. Для каждого набора данных ДЗЗ требуется соблюдение подходящих технологических решений предварительной обработки, включающих оптимальные методы.

3.2 Создание пространственно-информационных моделей по данным МЛС

3.2.1 Технологическая схема создания пространственно-информационных моделей по данным МЛС

МЛС является одним из наиболее оптимальных методов сбора пространственных данных, позволяющим решить большинство метрических задач при съемке ОТИ. На рисунке 3.1 приведена разработанная технологическая схема сбора и предварительной обработки данных МЛС для создания ПИМ. В соответствии с принципом преемственности она учитывает предыдущий опыт применения метода МЛС при решении задач в сфере ТИ [87, 196].

Составляемая на этапе подготовительных работ рабочая программа ПВО является основой полевого сбора пространственных данных с помощью любого метода, включая МЛС. Пункты ПВО используются как базовые станции, на которых размещаются спутниковые приемники. Сбор ГНСС-данных на базовых станциях выполняется в процессе сканирования территории.

Согласно рекомендациям, приведенным в [253, 292], а также в соответствии с ГОСТ Р 70689-2023 [67] одиночная базовая станция, установленная на пункте ПВО, используется в случае, если длина базовой линии от нее до спутникового приемника, входящего в состав системы МЛС, не превышает 20 км для работ проектного технологического процесса и 60 км – общего. В противном случае следует размещать дополнительные базовые станции, при выборе расстояния между которыми руководствуются требованиями ГОСТ Р 53606-2009 [63]. Согласно этим требованиям при использовании двухчастотных ГНСС-приемников точность определения координат точек местности не должна быть ниже $20 + D \cdot 10^{-6}$ мм в плане и $20 + 2D \cdot 10^{-6}$ по высоте, где D – расстояние от базовой станции до определяемого объекта. Тогда в зависимости от характера территории, площадной или линейно-протяженный объект, выбирается одна из двух схем сканирования:

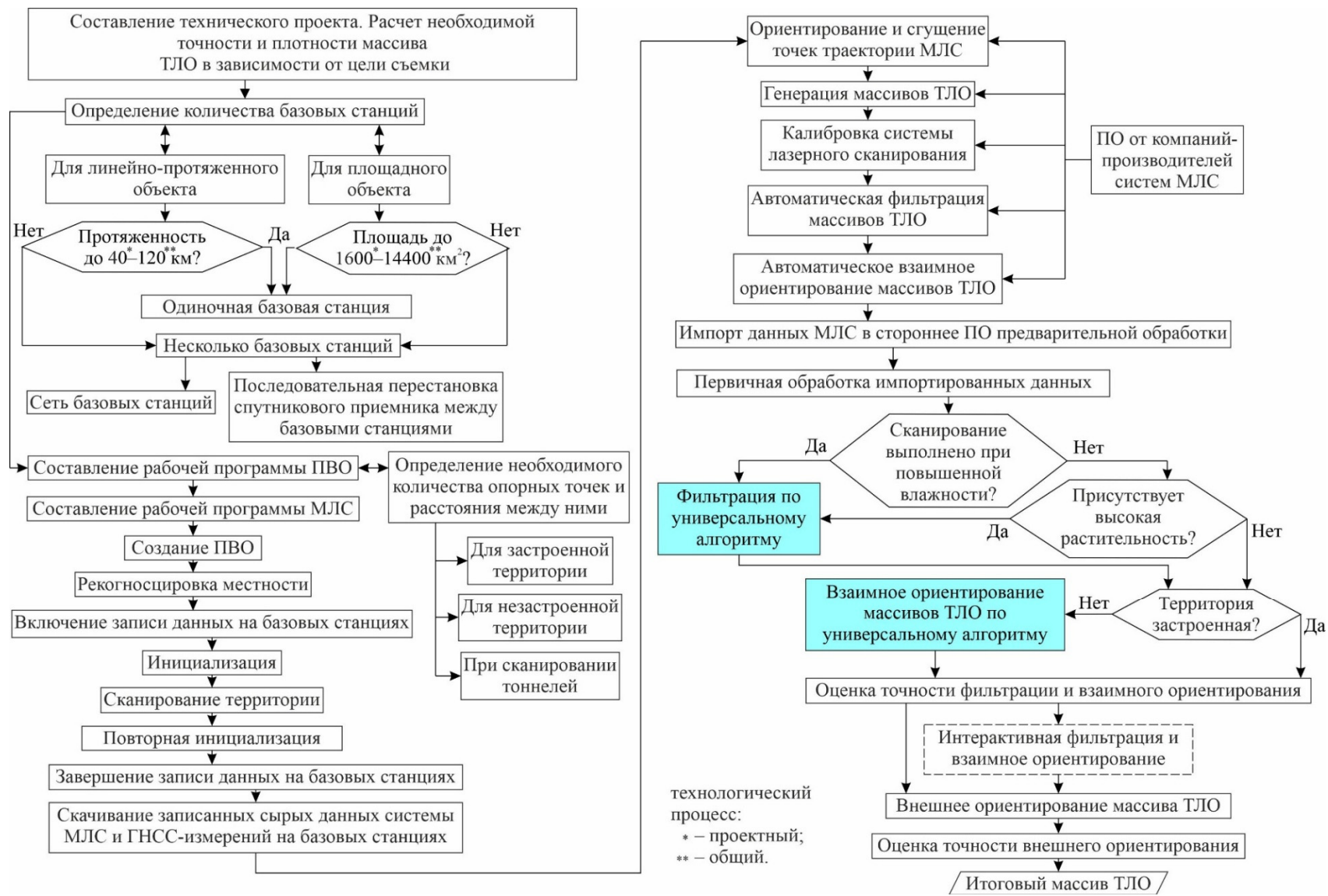


Рисунок 3.1 – Технологическая схема сбора и предварительной обработки данных МЛС

– применение сети базовых станций при сканировании площадных объектов. Базовые станции размещаются по периметру территории съемки с размещением как минимум одной из них в центре. Расстояние между смежными базовыми станциями не должно превышать 60 км. Сканирование каждого участка территории выполняется в прямом и обратном направлениях с одновременной записью ГНСС-данных на каждой станции;

– последовательное сканирование по участкам от одной базовой станции, когда после завершения съемки на первом участке спутниковый приемник переставляется на следующую базовую станцию, что оптимально при съемке линейно-протяженных объектов.

Сканирование в прямом и обратном направлениях, выполняемого при любой схеме МЛС, позволяет избавиться от теневых зон, добиться повышения плотности массивов ТЛО и повысить внешнюю точность данных.

Требования к созданию сети базовых станций зависят от ПО предварительной обработки данных МЛС. Для большого количества коммерческих систем МЛС применяется ПО POSpac MMS, в котором выполняется совместная обработка ГНСС-измерений и данных об угловой ориентации носителя, получаемых системой ИНС, с целью ориентирования и сгущения траектории МЛС. Система ИНС, чьи данные обрабатываются в этом ПО, разработана специалистами компании Arplanix. POSpac MMS предъявляет следующие требования к сети базовых станций [292]:

- количество базовых станций в сети допускается в диапазоне от 4 до 50;
- длины базовых линий не должны превышать 70 км, что превышает указанный в ГОСТ Р 70689-2023 допуск в 60 км;
- полевой сбор данных с помощью системы МЛС должен осуществляться в пределах образованного сетью базовых станций полигона.

Представленные допуски на допустимые длины базовых линий актуальны для идеальных условий съемки, когда обеспечивается уверенный спутниковый сигнал

при съемке незастроенных территорий без большого числа высотных объектов. Иначе длины базовых линий следует значительно уменьшать.

Проектирование мест расположения опознаков и их количества зависит от территории работ: застроенная городская территория с большим количеством высотных объектов, незастроенная территория за пределами городской высотной застройки, тоннели. Достичь заявленной производителем системы МЛС точности измерений, обычно составляющей порядка 3–5 см, без применения опорных точек возможно только на незастроенных территориях при условиях соблюдения требований к размещению базовых станций [201, 307]. С появлением высотных объектов качество ГНСС-сигнала резко падает, что приводит к снижению точности определения пространственных координат по данным МЛС. На таких территориях источником опорных точек могут быть данные АФС, полученные с БВС.

При съемке автомобильных дорог, городских улиц в качестве опорных точек могут выступать углы дорожной разметки [216] и различные точечные ОТИ [249], которые могут быть автоматически распознаны по разнородным данным и отождествлены с помощью методов привязки по способу взаимного ориентирования.

Недостатком всех методов автоматического уравнивания данных МЛС по АФС является их узкая специализация, так как на незастроенных территориях результаты МЛС имеют более высокую точность.

Наибольшую сложность представляет собой МЛС тоннелей. В тоннелях, ввиду отсутствия спутникового сигнала, привязка траектории МЛС выполняется к месту входа в тоннель и выхода из него. Массив ТЛЮ в тоннеле получается за счет работы ИНС. Точность определения пространственных координат в тоннеле зависит от его прямолинейности. В [290] показано, что если продолжительность потери спутникового сигнала превышает пол минуты, то точность данных МЛС понижается в несколько раз, особенно при скоростях движения выше 40 км/ч. Применение опорных точек позволяет компенсировать потерю спутникового сигнала на этапе внешнего ориентирования данных МЛС, когда вычисляются разности координат точек, измеренных по массиву ТЛЮ и с помощью другого более точного метода

сбора пространственных данных. Эти разности служат для вычисления поправок к ЭВнешО данных МЛС.

Измерение координат опорных точек по массиву ТЛО может быть осуществлено автоматически. Для этого опорные точки размещают на дорожном покрытии в соответствии с определенными шаблонами, которые затем определяются в ПО. Размещаемые по шаблонам опорные точки позволяют снизить время камеральной обработки, но значительно увеличивают время полевых работ.

За несколько минут до начала работы системы МЛС на базовых станциях должна быть запущена запись ГНСС-данных. Остановка их записи выполняется после завершения цикла сканирования. Также в процессе работы системы МЛС непосредственно перед запуском сбора данных со сканеров должна быть выполнена процедура инициализации, заключающаяся в проверке работоспособности основных блоков системы в ходе осуществления калибровочного кратковременного проезда. После выполнения съемки местности процедура инициализации повторяется.

Выполнив в соответствии с составленной рабочей программой МЛС съемку местности, переходят к скачиванию всех записанных сырых данных и их предварительной обработке. Сначала в ПО от компании-производителя использованной системы МЛС автоматически осуществляются следующие этапы предварительной обработки, подробно описанные в 2.5: ориентирование и сгущение точек траектории МЛС, генерация массивов ТЛО, калибровка системы лазерного сканирования, фильтрация и взаимное ориентирование массивов ТЛО [135].

Для повышения точности взаимного ориентирования массивов ТЛО дополнительно могут разрабатываться программные модули и методики обработки данных. Пример одной из таких разработок для систем МЛС от компании Riegl приведен в [145], где с помощью специального программного модуля к ПО RiProcess выполнялось предварительное разделение сырых массивов ТЛО и траекторий на короткие участки с продольными перекрытиями, в которых данные МЛС повторялись.

Это позволило выполнить более точное взаимное ориентирование данных МЛС в межмаршрутных перекрытиях.

Повышения точности взаимного ориентирования данных МЛС можно добиться также на основе дополнительного применения различных методов привязки, описанных в 2.6. Например, в [249] приведена методика взаимного ориентирования на основе идентификации объектов дорожной инфраструктуры, прерывистой дорожной разметки и опорных сооружений, которая была апробирована на данных сканирования городской территории. Согласно этой методике, в начале идентифицируются все мелкие объекты, которые далее разделяются на группы. Разделение на группы позволяет отделить растительность от объектов городской инфраструктуры. Но эта методика требует применения данных АФС для автоматической классификации мелких объектов.

Методы автоматической привязки также могут применяться при выполнении калибровки системы МЛС, включающей два сканера, что особенно актуально, когда эти сканеры закреплены не жестко.

При взаимном ориентировании данных МЛС часто применяются методы классификации с обучением, требующие формирования библиотеки эталонов. Недостатком таких методов является сильная зависимость от плотности массива ТЛО, количества маршрутов и того, с какой стороны распознаваемого объекта было выполнено сканирование. Также формирование библиотеки эталонов требует дополнительного времени [300].

В рамках предложенной в диссертационной работе технологической схемы сбора и предварительной обработки данных МЛС для повышения точности взаимного ориентирования, а также дополнительной фильтрации и внешнего ориентирования применяются программные модули, входящие в состав стороннего ПО – TerraSolid. На базе TerraSolid были разработаны универсальные алгоритмы фильтрации и взаимного ориентирования [8, 9].

Универсальные алгоритмы фильтрации и взаимного ориентирования данных МЛС были также протестированы для различных участков дорог, проходящих на

застроенных и незастроенных территориях. Они были реализованы с помощью отдельных макросов, представляющих собой список команд на языке программирования Microstation Development Language, где указан их порядок запуска.

В ПО TerraSolid импортируются данные МЛС, в котором сначала осуществляются следующие первичные этапы [300]:

- разделение траекторий на участки по ходу движения;
- присвоение номера участка траектории каждой ТЛО;
- удаление ТЛО, полученных во время остановки носителя системы МЛС;
- удаление ТЛО, полученных в момент резких поворотов.

В случае, если сканирование было выполнено при повышенной влажности, после выпадения осадков или на территории было большое количество растительности, то выполняется дополнительная фильтрация по разработанному универсальному алгоритму данных МЛС, показанному на рисунке 3.2.

Универсальный алгоритм фильтрации позволяет удалить большинство ложных ТЛО и выполнить распознавание точек физической поверхности земли. Этот алгоритм использует следующую информацию:

- пространственное положение каждой ТЛО в массиве;
- значение интенсивности отраженного сигнала;
- порядковый номер отражения.

Универсальный алгоритм фильтрации ТЛО включает следующие методы:

- метод классификации нижних точек;
- метод классификации воздушных точек;
- метод классификация точек, расположенных ниже поверхности;
- метод классификации изолированных точек;
- метод классификации точек физической поверхности земли Аксельсона.

Распознавание точек физической поверхности земли необходимо для применения методов поиска ложных точек: нижних, воздушных и расположенных ниже поверхности. Метод классификации точек физической поверхности земли Аксельсона является итерационным. Его суть состоит в том, что сначала выполняется по-

строение триангуляционной сети по результату поиска точек, у которых значение отметки минимально, в пределах ячеек указываемого размера, а затем добавляются новые точки в сеть при условии соблюдения критерия на дистанцию приближения и максимальное значение угла [219].



Рисунок 3.2 – Универсальный алгоритм фильтрации данных МЛС

Значения параметров, применяемые в универсальном алгоритме фильтрации, подбираются на основе анализа плотности массива ТЛО, которая зависит от скорости движения носителя, частоты зондирующих импульсов и частоты сканирования.

В таблице 3.1 приведены такие значения, подходящие для данных МЛС, полученных при частоте зондирующих импульсов 600 кГц, частоты сканирования 200 Гц и скорости движения носителя 40 км/ч. При других параметрах сканирования необходимо будет повторно рассчитать оптимальные значения применяемых параметров методов фильтрации.

Таблица 3.1 – Оптимальные значения параметров, применяемых в универсальном алгоритме фильтрации данных МЛС

№ этапа алгоритма	Метод	Значение параметров
1	–	Значение интенсивности менее 15 000 для ТЛЮ, полученных в результате одного отражения за импульс; Значения интенсивности менее 8 000 для всех ТЛЮ.
2	Метод Аксельсона	Размер ячейки – 10 м; дистанция приближения – 1 м; угол приближения – 8°
4	Метод классификации нижних точек	Первая итерация: Максимальное количество точек в группе – 99; радиус – 0,3 м, превышение – 0,03 м. Вторая итерация: Максимальное количество точек в группе – 10; радиус – 1 м; превышение – 0,3 м.
6	Метод классификации нижних точек	Первая итерация: Максимальное количество точек в группе – 10; радиус – 0,3 м, превышение – 0,03 м. Вторая итерация: Максимальное количество точек в группе – 30; радиус – 25 м ² ; превышение – 0,3 м. Третья итерация: Максимальное количество точек в группе – 30; радиус – 1 м ² ; превышение – 0,1 м.
7	Метод классификации точек, расположенных ниже поверхности	Среднее значение превышения – 0,05 м; коэффициент – 3.
9	Метод классификации воздушных точек	Радиус поиска – 30 м; коэффициент – 1; минимальное количество точек – 3.
11	Метод классификации воздушных точек	Радиус поиска – 10 м; коэффициент – 4; минимальное количество точек – 3.
12	Метод классификации изолированных точек	Радиус поиска – 0,1 м; число точек в группе – 10.

После фильтрации в зависимости от уровня застроенности территории принимается решение о необходимости применения разработанного универсального ал-

горитма взаимного ориентирования. Этот алгоритм оптимален при обработке данных незастроенных территорий, позволяет автоматически идентифицировать соответственные точки на небольших вертикальных объектах, таких как дорожные знаки, указатели, светофоры, опоры ЛЭП. В процессе идентификации этот алгоритм отфильтровывает ТЛО растительности, которые существенно влияют на достоверность этого процесса. К незастроенным территориям в первую очередь относятся автомобильные и железные дороги, где здания могут присутствовать только в минимальном количестве. Стены зданий лучше всего подходят для идентификации соответственных линий. При небольшом количестве стен точность взаимного ориентирования, выполняемого в ПО от компаний-производителей систем МЛС, существенно снижается.

Универсальный алгоритм взаимного ориентирования, приведенный на рисунке 3.3, улучшает результаты работы алгоритмов, применяемых в таких ПО, за счет поиска соответственных точек на небольших вертикальных объектах [8].

На территориях автомобильных и железных дорог для получения качественных результатов взаимного ориентирования важно выполнить размещение границ, используемых для поиска поправок в линейные ЭВзаимО сканерных линий. Внешние границы могут быть получены путем параллельного копирования линий траекторий движения системы МЛС. Расстояние копирования определяется на основе анализа расположения ОТИ и наличия растительности. Внешние границы далее могут быть отредактированы с учетом расположения отдельных небольших вертикальных объектов. Зона между внешними границами и траекториями МЛС прямого и обратного направлений применяется для вычисления поправок в плановое положение ТЛО и траекторий. Внутренняя зона между траекториями прямого и обратного направлений сканирования используется для вычисления поправок в их высотное положение. Внутренняя зона не используется для вычисления поправок в плановое положение по причине того, что оказавшиеся в этой зоне объекты сканируются с противоположных сторон. Массив ТЛО одних и тех же объектов отличается, что приводит к ошибкам идентификации соответственных точек.



Рисунок 3.3 – Универсальный алгоритм взаимного ориентирования данных
МЛС

Применяемый в алгоритме взаимного ориентирования фильтр Гаусса позволяет снизить влияние ошибочно найденных соответственных точек на результаты вычисления поправок в положение ТЛО и траекторий путем задания расстояния, в пределах которого применяется сглаживающий фильтр. Одномерный фильтр Гаусса вычисляется по формуле [188]

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.1)$$

где x – расстояние, в пределах которого выполняется сглаживание;

σ – стандартное отклонение распределения Гаусса.

В результате экспериментальных исследований были рассчитаны оптимальные значения x : 50 м в высотном положении и 100 м в плановом.

На этапе 8 вычисление нормалей реализуется с помощью метода главных компонент путем анализа взаимного расположения соседних точек [297]. Нормали используются при дальнейшей сегментации массива ТЛО на группы.

Метод классификации деревьев, применяемый на этапе алгоритма 10, выполняет анализ кроны деревьев путем указания следующих параметров: минимальный диаметр кроны и минимальная высота группы ТЛО над поверхностью земли [300].

Для вычисления на этапе алгоритма № 14 евклидовых расстояний применяется формула

$$\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \leq D, \quad (3.2)$$

где D – пороговое значение евклидова расстояния между точками классов растительности и вертикальных объектов;

$X_j Y_j$ – координаты точки класса растительности;

$X_i Y_i$ – координаты точки класса вертикальных объектов.

Все пороговые значения универсального алгоритма взаимного ориентирования представлены в таблице 3.2 и подобраны исходя из средней высоты дорожных знаков, столбов и опор ЛЭП. Ограничения по пороговым значениям позволяют свести к минимуму количество ошибок в идентификации соответственных точек, чтобы большинство этих точек находилось только на небольших вертикальных объектах правильной формы – округлой, квадратной или прямоугольной.

Таблица 3.2 – Оптимальные значения параметров, применяемых в универсальном алгоритме взаимного ориентирования

№ этапа алгоритма	Метод	Значение параметров
2	Метод Аксельсона	Размер ячейки – 10 м; дистанция приближения – 1 м; угол приближения – 8°.
4	–	Длина линии – 1 м; глубина сечения ТЛО – 0,1 м; максимальный угол наклона линии – 10°.
10	Метод классификации деревьев	Диаметр – 0,2 м. Минимальная высота – < 1 м.
12	–	Пороговое значение – 2,1 м.
13	–	Пороговое значение – 13 м.
14	–	Пороговое значение – 1 м.
15	–	Значение объема – 0,512 м ² .
16	–	Пороговое значение – 6 м.
17	–	Длина линии – 0,3 м; глубина сечения ТЛО – 0,1 м; максимальный угол наклона линии – 10°.

Универсальный алгоритм взаимного ориентирования на практике хорошо зарекомендовал для незастроенных и застроенных территорий, т. к. реализует комплексный подход, учитывающий особенности сканируемой территории при минимальном количестве дополнительных полевых наземных работ.

При сканировании городских территорий всегда идентифицируется большое количество соответственных линий и точек. Применение универсального алгоритма взаимного ориентирования на застроенных территориях рационально только в случае краткосрочного въезда на них, когда основная часть маршрута проходит по незастроенным участкам местности. Это обусловлено тем, что на застроенной территории большинство ПО от компаний-производителей систем МЛС выполня-

ется автоматическое взаимное ориентирование с высокой точностью за счет наличия большого количества вертикальных плоскостей, и применения дополнительных алгоритмов не требуется.

Применение разработанного алгоритма взаимного ориентирования при такой ситуации увеличит время обработки без существенного повышения точности. Поэтому при планировании маршрута передвижения важно выполнять сканирование по участкам:

- незастроенные территории, где количество вертикальных плоскостей минимально – загородные автомобильные и железные дороги;
- застроенные территории с большим количеством вертикальных плоскостей – городские и промышленные территории;
- незастроенные территорий с незначительным процентом застроенных участков – сканирование загородных дорог с краткосрочным въездом на застроенные территории, когда деление на дополнительные участки становится нерационально с позиции увеличения времени цикла сканирования из-за дополнительных остановок и времени предварительной обработки из-за создания лишних проектов в ПО, в котором первоначально уравнивание данных выполняется независимо. В дальнейшем независимо уравненные проекты требуется уравнивать между собой.

Завершающими этапами создания ПИМ являются внешнее ориентирование массива ТЛЮ по опорным точкам и оценка точности полученных результатов.

3.2.2 Исследования технологической схемы создания пространственно-информационных моделей по данным МЛС

3.2.2.1 Описание исходных данных МЛС

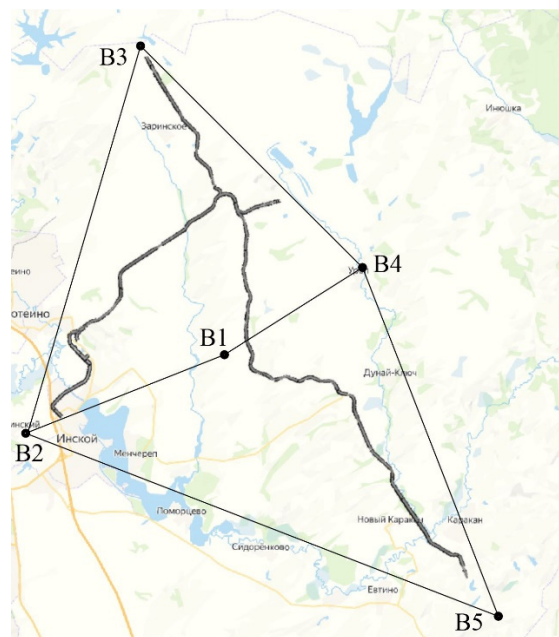
Апробация различных этапов предложенной технологической схемы выполнялась по данным МЛС, полученным на следующие объекты:

- автомобильные дороги Новосибирской области протяженностью около 980 км;

- улицы г. Новосибирска протяженностью около 290 км;
- автомобильная дорога ОАО «Сургутнефтегаз» Талакан – Витим протяженностью около 160 км;
- технологическая однопутная железная дорога «ст. Беловская ГРЭС – ст. Черемшанка» в Беловском районе Кемеровской области протяженностью 63 км.

МЛС автомобильных дорог Новосибирской области и г. Новосибирска выполнялось многократно в 2012–2020 гг. при схеме сканирования от одной базовой станции. Использовалась сеть постоянно действующих базовых станций Новосибирской области. В 2012–2014 гг. съемка производилась системой LYNX Mobile Mapper M1, а далее – Riegl VMX-250.

Железная дорога «ст. Беловская ГРЭС – ст. Черемшанка» сканировалась системой LYNX Mobile Mapper M1 в 2012 г. Всего было установлено пять базовых станций (рисунок 3.4). Объект съемки расположен внутри полигона, образованного базовыми станциями, что соответствует требованиям, указанным в главе 2. Средняя скорость движения носителя составила 40 км/ч на перегонах и 20 км/ч на станциях.



B1–B5 – базовые станции; **■** – данные МЛС

Рисунок 3.4 – Железная дорога «ст. Беловская ГРЭС – ст. Черемшанка»

МЛС автомобильной дороги Талакан – Витим было выполнено в августе 2018 г. с помощью системы Riegl VMX-250 при схеме сканирования от одной базовой станции. Съёмка выполнялась со средней скоростью движения носителя 40 км/ч, частотой зондирующих импульсов 600 кГц, частотой сканирования 200 Гц последовательно по участкам от базовой станции, размещаемой в центре каждого из них (рисунок 3.5). Максимальное удаление от базовой станции до носителя системы МЛС не превысило 15 км.



NGDU, DNS, D20, B1, B2, B3, – базовые станции

Рисунок 3.5 – Автомобильная дорога ОАО «Сургутнефтегаз»
Талакан – Витим

3.2.2.2 Исследование универсального алгоритма фильтрации

Для исследования алгоритма фильтрации данных МЛС был выбран участок автомобильной дороги Талакан – Витим. Полоса съёмки была ограничена значением в 200 м, основываясь на присутствии сплошного покрова растительности и цели съёмки – создании топографического плана масштаба 1: 500. Полезная дальность действия сканера составила 110 м.

Основой универсального алгоритма фильтрации является распознавание ТЛО физической поверхности Земли, относительно которых выполняется фильтрация ложных измерений, представляющих собой точки переотражений от зеркальных и влажных поверхностей.

Благодаря возможности учесть интенсивность отраженного сигнала, меньшую для ложных ТЛО, порядковый номер отражений и взаимное пространственное по-

ложение отдельных ТЛО, универсальный алгоритм взаимного ориентирования позволил автоматически отфильтровать большинство ложных измерений. Оценка точности фильтрации выполнялась на основе сравнения эталонной ЦМР с ЦМР, построенными после различных этапов работы универсального алгоритма. ЦМР строилась по ТЛО поверхности земли. В начале построение выполнялось по полностью автоматически распознанному ТЛО (рисунок 3.6, *а*). Эталонная ЦМР была получена в результате интерактивного исправления ошибок распознавания точек земли (рисунок 3.6, *б*). По эталонной ЦМР создавался набор контрольных точек по высоте, расположенных в узлах сетки, размер которой составил $1 \times 1 \text{ м}^2$.

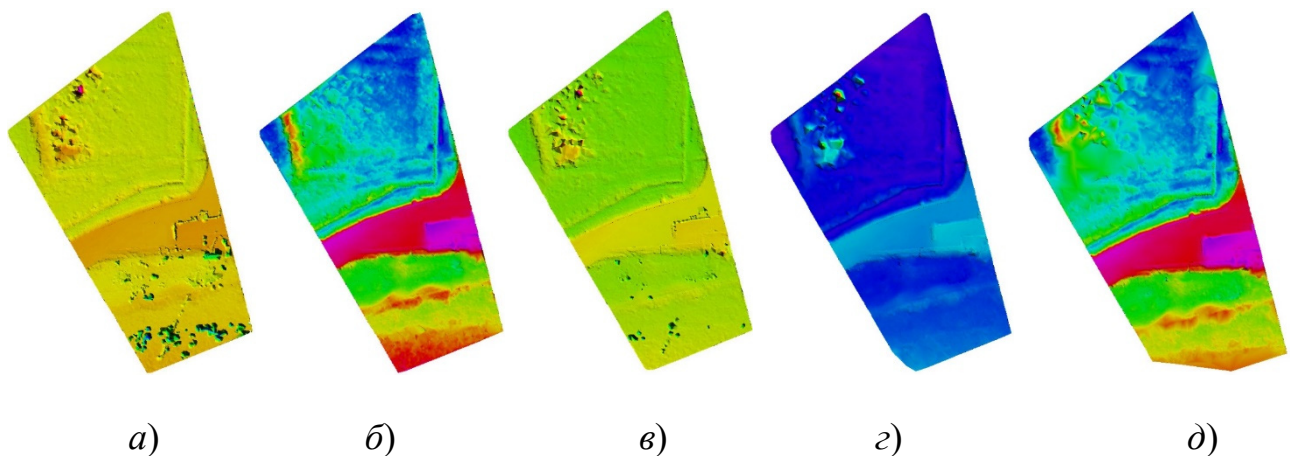


Рисунок 3.6 – ЦМР после этапов фильтрации: *а*) распознавание по алгоритму Аксельсона; *б*) распознавание по алгоритму Аксельсона и интерактивным исправлением результатов распознавания; *в*) после удаления ТЛО номеру отражения и интенсивности; *г*) после фильтрации по алгоритмам поиска нижних точек и расположенных ниже поверхности; *д*) после фильтрации по алгоритму поиска воздушных точек

В таблице 3.3 приведена оценка точности автоматически созданной ЦМР по набору контрольных точек. Большое значение минимальной ошибки показывает наличие ложных ТЛО под уровнем физической поверхности земли, а максимальной – в воздухе или на кронах деревьев. Результаты оценки показывают необходимость использования разработанного универсального алгоритма фильтрации.

Таблица 3.3 – Оценка точности построения ЦМР по автоматически распознанным ТЛО физической поверхности земли

ЦМР / Ошибка, м	Рисунок 3.6, а	Рисунок 3.6, в	Рисунок 3.6, з	Рисунок 3.6, д	Рисунок 3.6, д полоса 100 м
Средняя ошибка	0,260	0,114	0,113	0,064	0,027
СКО	1,300	0,453	0,429	0,140	0,058
Максимальное отрицательное отклонение	-18,670	-11,551	-0,533	-1,155	-0,153
Максимальное положительное отклонение	13,955	11,165	11,836	1,366	0,162

Результаты построения ЦМР после этапа алгоритма фильтрации № 1 приведены на рисунке 3.6, в. На рисунке 3.6, з показаны результаты построения ЦМР после этапа алгоритма фильтрации № 7, а на рисунке 3.6, д – окончательный результат фильтрации. Оценка точности создания всех промежуточных ЦМР показана в таблице 3.3.

Благодаря применению универсального алгоритма фильтрации точность автоматического построения ЦМР была повышена. Значение средней ошибки стало находиться в пределах допуска, указанного в инструкции по топографической съемке, проводимой с высотой сечения рельефа 0,25 м. Максимальные значения ошибок оказались на границах рассматриваемого участка, занятого лесными массивами. Количество точек со значениями ошибок, не удовлетворяющими требованиям топографической съемки с высотой сечения рельефа 0,25 м, составило 1,2 %. Это можно связать со снижением плотности данных МЛС при удалении от траектории МЛС и присутствием лесных массивов на границах полосы съемки.

В случае уменьшения полосы съемки до 100 м от траектории МЛС максимальные значения ошибок начинают удовлетворять требованиям инструкции по топографической съемке (таблица 3.3).

При тестировании алгоритма фильтрации по другим данным МЛС было определено, что при снижении частоты сканирования и частоты зондирующих импульсов при съемке территорий, покрытых большим количеством растительности, сле-

дует снизить скорость движения носителя системы МЛС с целью обеспечения такой же плотности массива ТЛО, как и для исследуемого участка.

3.2.2.3 Исследование универсального алгоритма взаимного ориентирования

Для исследований универсального алгоритма взаимного ориентирования данные МЛС, предварительно уравненные по каждому участку отдельно в ПО RiProcess, были импортированы в ПО TerraSolid. Выполнив первичную обработку и фильтрацию импортированных данных, было осуществлено автоматическое взаимное ориентирование по предложенному универсальному алгоритму.

На рисунке 3.7 показан пример результата поиска соответственных точек

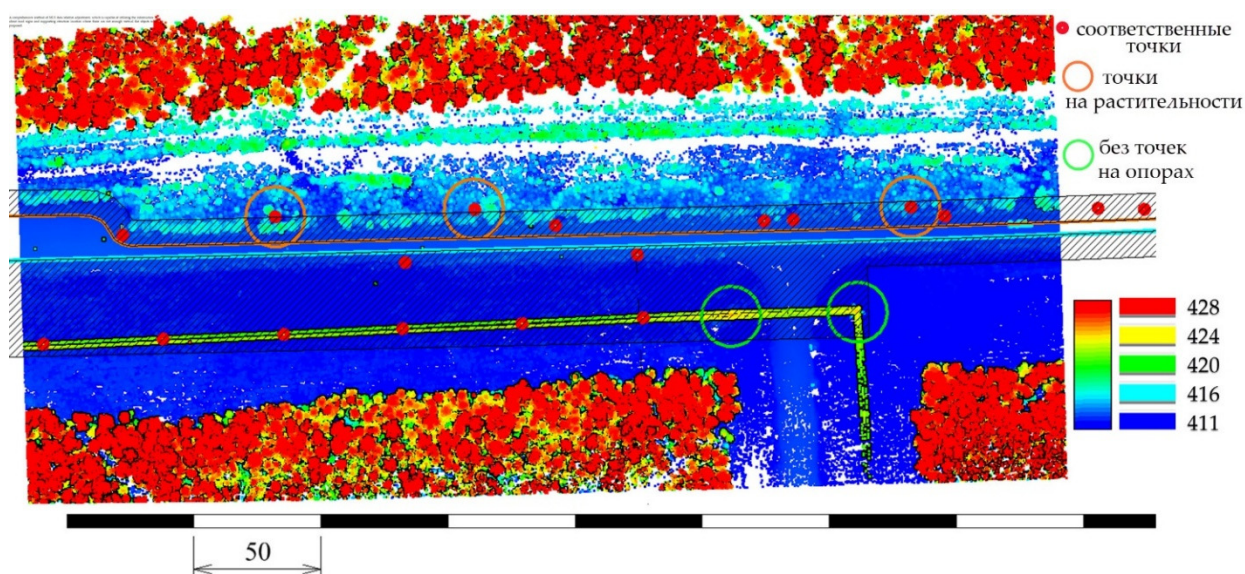


Рисунок 3.7 – Пример результатов поиска соответственных точек

Универсальный алгоритм взаимного ориентирования позволяет большинство соответственных точек идентифицировать на опорных сооружениях, объектах дорожной инфраструктуры. Тем не менее, на растительности и других объектах также идентифицируется часть соответственных точек, что влияет на точность взаимного ориентирования. В таблице 3.4 приведена оценка точности данных МЛС до взаимного ориентирования для всей автомобильной дороги.

Таблица 3.4 – Оценка точности данных МЛС до взаимного ориентирования

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,038	0,049	0,023
Средняя квадратическая ошибка	0,046	0,056	0,048
Максимальная ошибка	0,068	0,084	0,297

В таблице 3.5 приведена оценка точности взаимного ориентирования данных МЛС после применения поправок в плановое и высотное положение.

Таблица 3.5 – Оценка точности взаимного ориентирования данных МЛС

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,009	0,005	0,003
Средняя квадратическая ошибка	0,013	0,008	0,010
Максимальная ошибка	0,033	0,025	0,046

На рисунке 3.8 приведен результат идентификации соответственных точек на участке дороги, окруженным травянистой и кустарниковой растительностью, с небольшим количеством объектов дорожной инфраструктуры. Древесная растительность находится за пределами границ анализируемой области в 10 м. В этой области находится только два дорожных знака. Алгоритм обнаружил оба знака, но одна из соответственных точек была идентифицирована на вершине кустарника. Из-за значительных расстояний между соответственными точками на таких участках следует интерактивно удалять неверно идентифицированные.

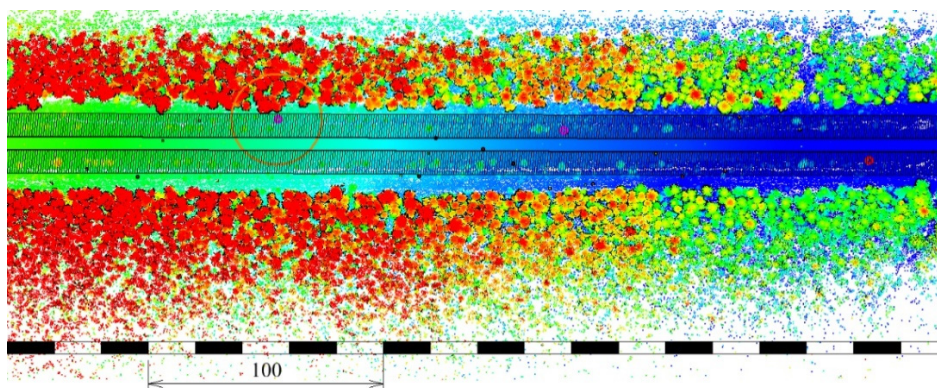


Рисунок 3.8 – Второй пример результатов поиска соответственных точек

Для обоснования выбора оптимального значения переменной x одномерного фильтра Гаусса было выполнено исследование степени его влияния на точность взаимного ориентирования. На рисунке 3.9 приведен третий пример идентификации соответственных точек. Они были найдены на всех вертикально расположенных объектах и на кустарниках. На кустарниках многие из соответственных точек были идентифицированы недостоверно. Выполнив анализ результатов идентификации соответственных точек на других участках территории, в [86] было определено, что оптимальным значением переменной x является 100.

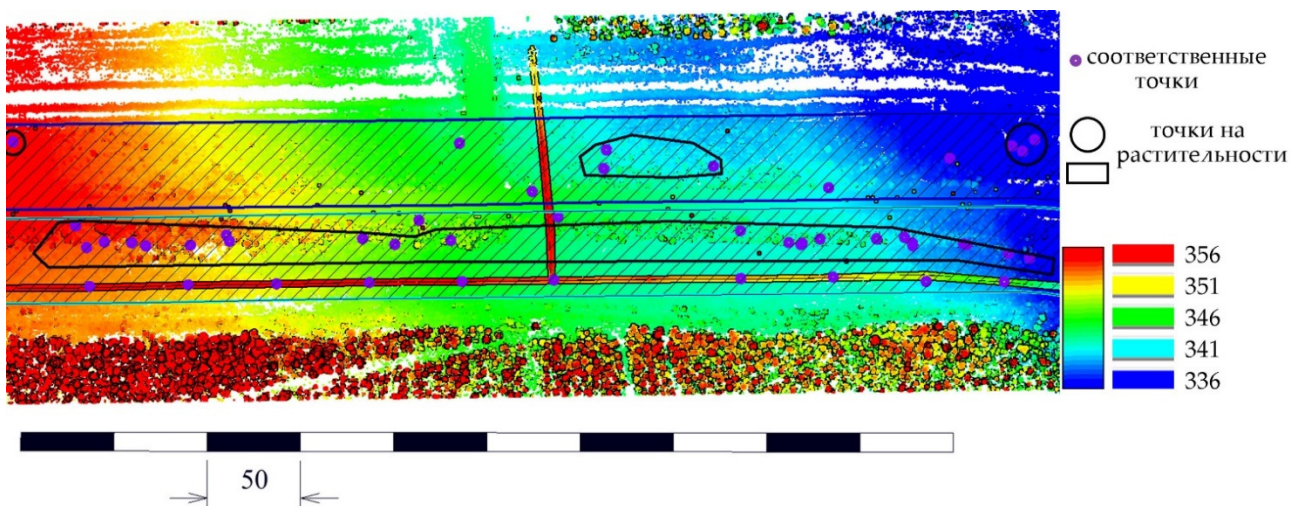


Рисунок 3.9 – Третий пример результатов поиска соответственных точек

При идентификации соответственных точек на растительности необходимо удалять их интерактивно только при ситуациях, когда полоса поиска ограничена расстоянием 10 м от траектории МЛС. Такое значение полосы необходимо выбирать из-за отсутствия других небольших вертикальных объектов, за исключением дорожных знаков, на расстоянии от дороги, превышающем 10 м. При наличии других линейно-протяженных объектов на расстоянии, не превышающем 45 м, полосу поиска соответственных точек следует увеличивать, и ошибочно идентифицированные точки на растительности удалять не нужно.

Алгоритм взаимного ориентирования также тестировался на данных МЛС железных дорог. Достоверность идентификации точек с помощью универсального

алгоритма взаимного ориентирования на железной дороге оказалась выше, что связано с меньшим количеством растительности в пределах расположения опор.

При применении универсального алгоритма взаимного ориентирования данных МЛС, полученных для городских территорий, идентифицируется избыточное число соответственных точек. Но так как на застроенных территориях присутствует большое количество вертикальных плоскостей, в большинстве случаев достаточно осуществлять идентификацию соответственных линий по всему объему данных МЛС и соответственных точек в пределах узкой полосы съемки. На рисунке 3.10, *а* показан пример данных МЛС, полученных системой VMX-250, на улице Проспект Дзержинского г. Новосибирска, где черным цветом отмечена зона поиска соответственных точек, а на рисунке 3.10, *б* – поперечное сечение в месте расположения угла здания. Ошибки взаимного ориентирования в плане на этом участке не превысили 0,01 м.

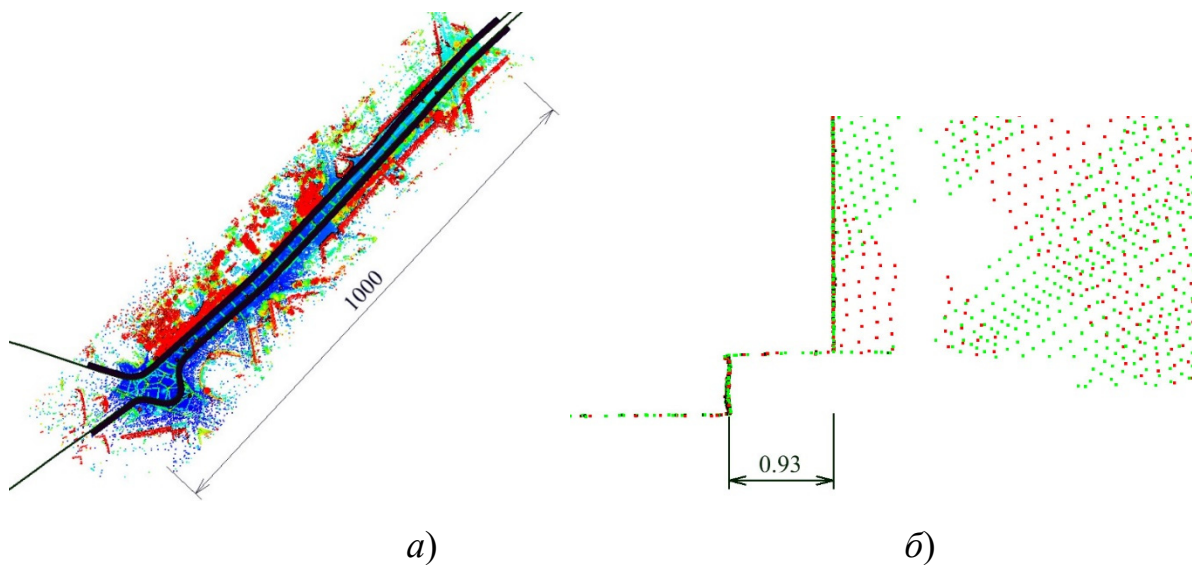


Рисунок 3.10 – Участок улицы: *а*) вид сверху с зоной поиска соответственных точек; *б*) поперечное сечение стены здания

При МЛС городских территорий также следует учитывать, что из-за особенностей планирования маршрута съемки возможен многократный проезд по одному и тому же участку. В этом случае требования к точности результатов идентификации соответственных точек и линий возрастают. Необходимо, чтобы они

были идентифицированы на ТЛО всех маршрутов [151].

Универсальный алгоритм взаимного ориентирования был протестирован для данных МЛС, полученных системой Lynx Mobile Mapper Mapper Mapper M1 на участок улицы Станционная г. Новосибирска. Особенностью этого участка является отсутствие зданий и других крупных сооружений (рисунок 3.11).

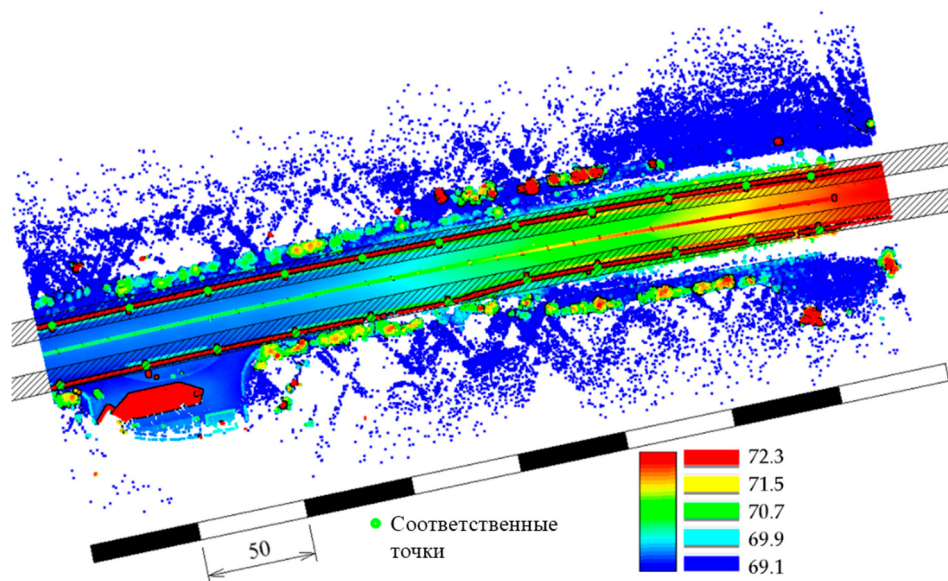


Рисунок 3.11 – Пример идентификации соответственных точек на небольших вертикальных объектах, расположенных вдоль улицы

Соответственные точки идентифицировались безошибочно на столбах. Предложенный алгоритм, разработанный на основе данных VMX-250, позволил выполнить взаимное ориентирование данных МЛС, полученных с помощью Lynx Mobile Mapper Mapper Mapper M1, без изменения значений параметров алгоритма. Это стало возможным благодаря тому, что плотность массива ТЛО системы Lynx была не ниже плотности массива VMX-250 [207].

Для того, чтобы оценить уровень влияния ошибочно идентифицированных соответственных точек на точность взаимного ориентирования данных МЛС, использовалась формула полной вероятности [291]. Оценка достоверности идентификации соответственных точек выполнялась по данным автомобильной дороги Талакан – Витим, участков улиц Станционная и Проспект Дзержинского г. Но-

восибирска. Все идентифицированные соответственные точки были интерактивно проверены. Сначала выполнялась оценка того, сколько соответственных точек было выявлено на небольших вертикальных объектах дорожной инфраструктуры и сколько из них было обнаружено в других местах, преимущественно на растительности. Поскольку территория дороги Талакан – Витим содержала преимущественно дорожные знаки, столбы и растительность, было принято решение разделить эту загородную незастроенную территорию на три зоны в соответствии с изменением плотности расположения объектов и количества растительности. Данные МЛС городских территорий соответствовали еще двум зонам. В результате были выделены пять следующих зон для расчета общей вероятности обнаружения небольших вертикальных объектов.

1 Загородные территории с высокой плотностью расположения небольших вертикальных объектов и небольшим количеством растительности в зоне поиска соответственных точек (как на рисунке 3.7).

2 Загородные территории с высокой плотностью расположения небольших вертикальных объектов и большим количеством растительности (как на рисунке 3.8).

3 Загородные территории с низкой плотностью расположения небольших вертикальных объектов и небольшим количеством растительности (как на рисунке 3.9).

4 Городские территории со зданиями и небольшими вертикальными объектами (как на рисунке 3.10).

5 Городские территории без зданий, но с небольшими вертикальными объектами (как на рисунке 3.11).

Полная вероятность идентификации соответственных точек на небольших вертикальных объектах может быть рассчитана следующим образом

$$P(A) = P(A | B_1) \cdot P(B_1) + P(A | B_2) \cdot P(B_2) + \\ + P(A | B_3) \cdot P(B_3) + P(A | B_4) \cdot P(B_4) + P(A | B_5) \cdot P(B_5) \quad (3.3)$$

где $P(A)$ – полная вероятность идентификации соответственных точек на небольших вертикальных объектах;

$P(B_1) = P(B_2) = P(B_3) = P(B_4) = P(B_5) = 20\%$ – вероятность, что будет просканирована определенная зона;

$P(A|B_1), P(A|B_2), P(A|B_3), P(A|B_4), P(A|B_5)$ – вероятности идентификации соответственных точек в определенной зоне.

В таблице 3.6 показаны результаты расчета полной вероятности идентификации соответственных точек на небольших вертикальных объектах. Видно, что много соответственных точек было выявлено на других объектах. Больше всего таких точек было идентифицировано на растительности.

Таблица 3.6 – Результаты расчета полной вероятности идентификации соответственных точек на небольших вертикальных объектах

№ зоны	Количество соответственных точек, идентифицированных на вертикальных объектах	Количество соответственных точек, идентифицированных на других объектах	$P(B_n)$	$P(A B)$	$P(A)$
1	1450	136	20%	91,4%	79,3%
2	1268	964	20%	56,8%	
3	826	564	20%	59,4%	
4	121	13	20%	90,2%	
5	68	1	20%	98,6%	

Чтобы оценить отрицательное влияние соответственных точек, идентифицированных на других объектах, на общую достоверность результатов взаимного ориентирования, были интерактивно измерены ошибки взаимного ориентирования в местах расположения небольших вертикальных объектов. Максимальное значение ошибки в 2 см было решено принять в качестве критерия того, что массив ТЛО был правильно уравнен в местах расположения небольших вертикальных объектов. Если расхождения между ТЛО объектов, полученных с различных маршрутов, превышало значение критерия, массив ТЛО считался уравненным неверно. В таблице 3.7 представлены результаты расчета достоверности осуществления взаимного ориентирования. Эта таблица показывает, как неправильно идентифицированные соответственные точки, обычно обнаруживаемые

на растительности, влияют на истинное расхождение межмаршрутных массивов ТЛО в местах расположения небольших вертикальных объектов.

Таблица 3.7 – Результаты расчета достоверности взаимного ориентирования данных МЛС на основе вероятности идентификации соответственных точек на небольших вертикальных объектах

№ зоны	Количество соответственных точек, идентифицированных на вертикальных объектах	Количество соответственных точек, идентифицированных на других объектах	$P(B_n)$	$P(A B)$	$P(A)$
1	1450	136	20%	91,4%	79,3%
2	1268	964	20%	56,8%	
3	826	564	20%	59,4%	
4	121	13	20%	90,2%	
5	68	1	20%	98,6%	

Таким образом, универсальный алгоритм взаимного ориентирования позволил автоматизировать процесс поиска локальных поправок в линейные элементы взаимного ориентирования сканерных линий массива ТЛО в межмаршрутных перекрытиях путем фильтрации большинства ТЛО от растительности. В случае, если точность взаимного ориентирования оказывается недостаточной, следует дополнительно осуществлять интерактивное взаимное ориентирование путем набора соответственных точек на различных объектах.

3.2.2.4 Исследование точности внешнего ориентирования данных МЛС

Внешнее ориентирование данных МЛС и его оценка точности являются последними этапами технологической схемы сбора и предварительной обработки. Внешнее ориентирование выполняется с целью преобразования данных в местную систему координат и повышения их абсолютной точности. Для автомобильной дороги Талакан – Витим преобразование выполнялось из системы координат WGS-84 в местную на основе известных координат шести пунктов, использованных в качестве базовых станций [210].

С целью повышения точности внешнего ориентирования данных МЛС выполняется измерение большего числа опорных точек. Согласно ГОСТ Р 70689-2023 [67], опорные точки вдоль дорог должны размещаться с шагом в диапазоне от 50 до 400 м. Наибольшее расстояние между опорными точками выбирается при сканировании прямых участков дорог, а наименьшее – в местах потенциальной потери ГНСС-сигнала. Однако, также следует ориентироваться на особенности решаемой задачи и характер застроенности территории.

К настоящему времени было выполнено большое количество исследований, посвященных точности внешнего ориентирования данных МЛС. Но результаты этих исследований сильно отличаются друг от друга, что в первую очередь связано с характеристиками сканируемой территории, оказывающей основное влияние на качество приема ГНСС-сигнала. Если на незастроенных территориях его качество близко к идеальному, на застроенных городских территориях оно существенно снижается, то при сканировании тоннелей ГНСС-сигнал блокируется полностью.

Рассмотрим результаты исследований точности внешнего ориентирования для незастроенной территории дороги Талакан – Витим. Целью сканирования стало построение топографического плана масштаба 1: 500 с высотой сечения рельефа 0,5 м. Так как точность метода МЛС при следовании требованиям точности ГОСТ Р 70689-2023 на шаг размещения опорных точек выше точности построения необходимого топографического плана, то необходимо выполнять дополнительные исследования с целью увеличения рекомендованного шага размещения опорных точек, что снижает объем выполнения полевых работ. Для этого вдоль дороги с шагом 1 км выполнялось измерение координат опознаков спутниковым методом Stop&Go. СКО определения координат составила 3 см в плане и по высоте. Опорные точки размещались на границе дорожного покрытия напротив километровых столбов.

Для определения оптимального расстояния между опорными точками при создании топографического плана масштаба 1: 500 с высотой сечения рельефа 0,25 м обработка данных МЛС с применением координат наземных опознаков выполнялась 4 раза.

1 Уравнивание массива ТЛО по опорным точкам не выполнялось. Все опознаки, размещенные через 1 км, использовались в качестве контрольных точек.

2 Уравнивание массива ТЛО по опорным точкам, размещенным через 2 км. Остальные точки – контрольные.

3 Уравнивание массива ТЛО по опорным точкам, размещенным через 4 км. Остальные точки – контрольные.

4 Уравнивание массива ТЛО по опорным точкам, размещенным через 8 км. Остальные точки – контрольные.

В таблице 3.8 приведены результаты оценки абсолютной точности массива ТЛО для каждого из вариантов обработки. Точность, полученная по первому варианту обработки, подходит для создания топографических планов масштаба 1: 500 и мельче с высотой сечения рельефа 0,5 м.

Таблица 3.8 – Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам

№ варианта обработки	Средняя ошибка, м			Средняя квадратическая ошибка, м			Максимальная ошибка, м		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
1	0,020	0,018	0,041	0,031	0,026	0,056	0,170	0,228	0,218
2	0,014	0,012	0,020	0,019	0,021	0,030	0,085	0,064	0,110
3	0,014	0,013	0,020	0,020	0,022	0,032	0,123	0,098	0,117
4	0,018	0,016	0,028	0,028	0,024	0,033	0,170	0,110	0,170

Анализ результатов распределения ошибок показал, что при удалении от базовых станций точность снижается (рисунок 3.12). Для соответствия допуску при высоте сечения рельефа 0,25 м требуется выполнять дополнительное уравнивание данных МЛС, используя координаты опорных точек. При втором варианте обработки данных МЛС максимальная ошибка высотного положения уменьшилась в 2 раза. Данные МЛС стали удовлетворять допуску для высоты сечения рельефа 0,25 м. При третьем варианте обработки значения ошибок изменились незначительно. При четвертом варианте значение максимальной ошибки стало немного превышать допуск для создания топографических планов с высотой сечения рельефа

ефа 0,25 м [165]. Также видно, что опорные точки следует размещать по самым краям территории съемки.

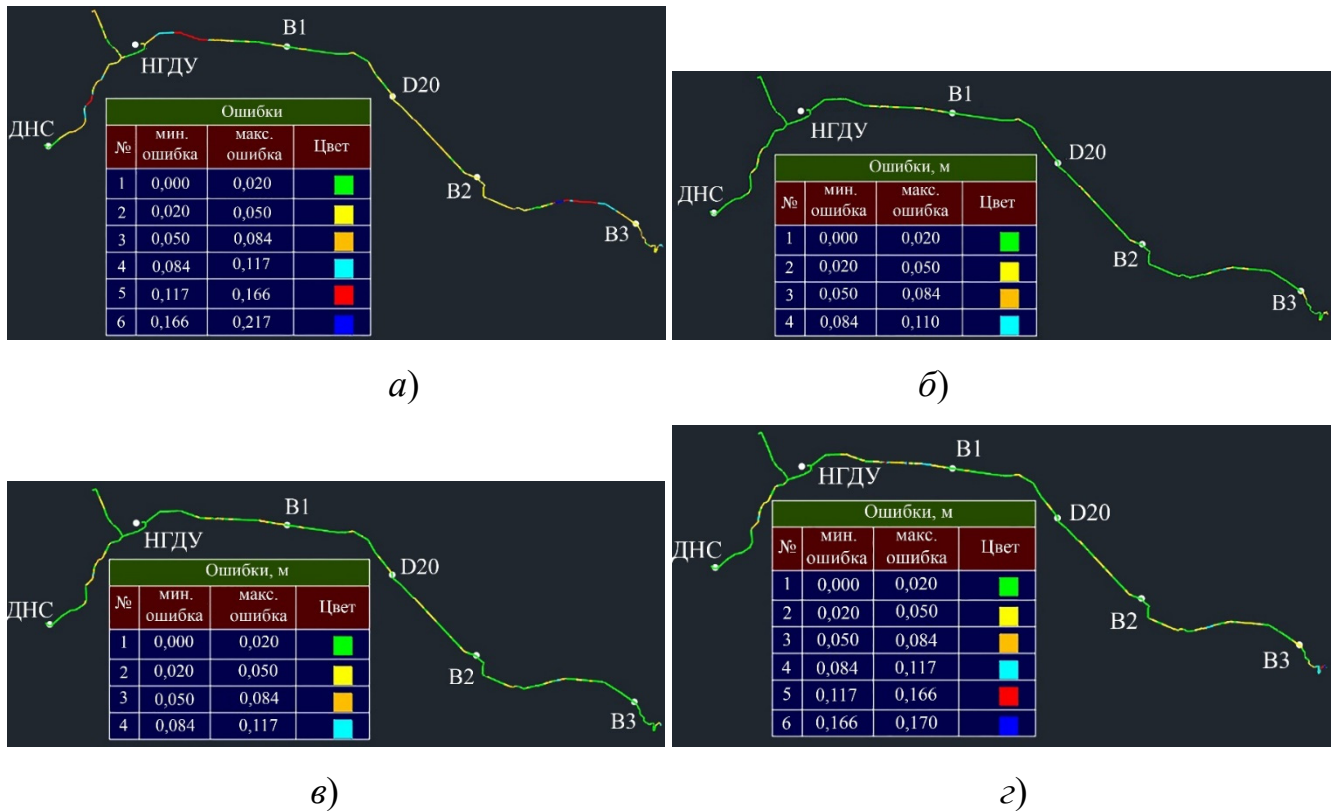


Рисунок 3.12 – Распределение ошибок внешнего ориентирования данных МЛС по контрольным точкам варианта: а) № 1; б) № 2; в) № 3; з) № 4

Таким образом, на незастроенных территориях для задачи составления топографических планов масштаба 1: 500 с высотой сечения рельефа 0,5 м при хорошем качестве приема ГНСС-сигнала применение опорных точек необязательно, если выполнять удаление от базовой станции не более, чем на 15 км. Для топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м применение опорных точек на незастроенных территориях необязательно, если не удаляться от базовой станции более, чем на 13 км. В противном случае опорные точки необходимо будет располагать через 8 км, включая границы сканируемой территории.

На застроенных территориях точность внешнего ориентирования данных МЛС может значительно отличаться в зависимости от плотности расположения высотных зданий и сооружений и присутствия вокруг них высокой растительности.

ГНСС-сигнал на таких территориях нестабилен. В настоящее время было выполнено большое количество исследований точности внешнего ориентирования по определению необходимого расстояния между опорными точками в условиях плотной городской застройки, согласно которым рекомендованные расстояния между опорными точками в среднем варьируются в диапазоне от 100 до 200 м [226, 239, 251]. При съемке территорий, когда ГНСС-сигнал полностью блокируется, для компенсации его потери требуется большее число опорных точек. Чтобы оценить влияние потери ГНСС-сигнала на точность данных МЛС автором было выполнено исследование на примере участка автомобильной дороги Новосибирской области протяженностью 1 км около села Красноглинное. Результаты исследования приведены в [208]. Они показали, что метод МЛС может применяться на таких участках, как тоннели, где отсутствует ГНСС-сигнал.

3.3 Создание пространственно-информационных моделей по данным ВЛС

3.3.1 Технологическая схема создания пространственно-информационных моделей по данным ВЛС

Этап подготовительных работ и полевого сбора данных при ВЛС технологически схож с аналогичными этапами схемы создания пространственно-информационных моделей по данным МЛС. Отличия заключаются в задаче определения необходимого количества опорных точек и расстояния между ними. При ВЛС из-за съемки в воздухе качество приема ГНСС-сигнала более стабильно, чем при МЛС, где существенное влияние на него оказывает характер застроенности территории. На рисунке 3.13 приведена разработанная технологическая схема сбора и предварительной обработки данных ВЛС для создания ПИМ.

Эта схема опирается на применение в составе съемочного комплекса цифровой фотокамеры. Сочетание АФС и ВЛС с БВС на низкой высоте полета позволяет одновременно получать аэрофотоснимки и массив ТЛО высокого пространственного разрешения и большой плотности [197].

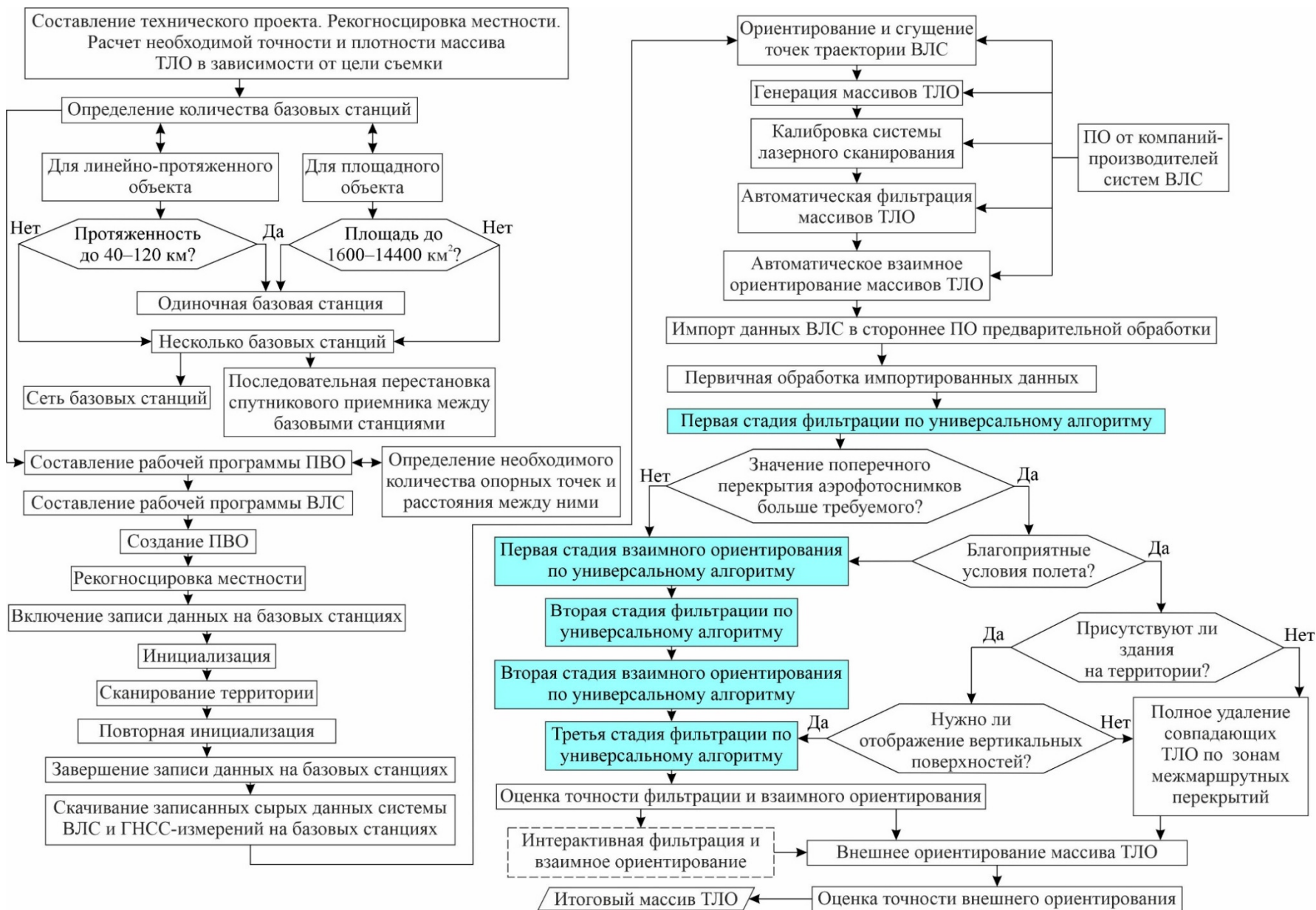


Рисунок 3.13 – Технологическая схема сбора и предварительной обработки данных ВЛС

В рамках предложенной технологической схемы были разработаны два универсальных алгоритма: фильтрации и взаимного ориентирования. Они подходят для данных ВЛС, полученных в сочетании с АФС. Отличаться будут значения параметров применяемых методов. Такие значения зависят от плотности получаемых массивов ТЛО и их шума [161].

Универсальный алгоритм фильтрации данных ВЛС учитывает характер застроенности территории, оказывающий влияние на расчет параметров АФС, в частности на выбор значения поперечного перекрытия аэрофотоснимков.

При съемке застроенных территорий наличие большого количества зданий и сооружений значительно повышает требования к обработке данных ВЛС в плане. Данные ВЛС, уравненные в плане с низкой точностью, приводят к появлению раздвоений вертикальных плоскостей объектов, что снижает их достоверность дешифрирования и вызывает ошибки распознавания их отдельных элементов.

Чтобы повысить достоверность дешифрирования объектов, часто выполняют удаление ТЛО в зонах межмаршрутных перекрытий. Негативным последствием полного такого удаления может быть отсутствие отдельных стен зданий, над которыми выполняется полет [2].

В зависимости от значения поперечного перекрытия и цели ВЛС операция удаления ТЛО в зонах межмаршрутных перекрытий выполняется при применении одного из четырех подходов [12].

1 Полное удаление ТЛО в зонах межмаршрутных перекрытий, представление итогового массива данных только из ТЛО, полученных под осью маршрута залета. Этап взаимного ориентирования не выполняется.

2 Частичное удаление ТЛО в зонах межмаршрутных перекрытий, представление итогового массива данных только из ТЛО, полученных под осью маршрута залета и из нескольких примыкающих к нему маршрутов. Этап взаимного ориентирования не выполняется.

3 Точное взаимное ориентирование данных ВЛС по зонам межмаршрутных перекрытий. Полное удаление совпадающих ТЛО в зонах перекрытия.

4 Точное взаимное ориентирование данных ВЛС по зонам межмаршрутных перекрытий. Частичное удаление ТЛО в зонах перекрытия, представление итогового массива из ТЛО, полученных под осью маршрута залета и из нескольких примыкающих к нему маршрутов.

Преимущество первых двух подходов состоит в отсутствии необходимости применения универсального алгоритма взаимного ориентирования данных ВЛС. Для выбора оптимального подхода необходимо осуществлять анализ данных по вертикальным сечениям после применения универсального алгоритма фильтрации. До взаимного ориентирования фильтрацию массивов ТЛО следует выполнять независимо для каждого маршрута залета.

Алгоритм фильтрации данных ВЛС включает универсальные методы, позволяющие распознать ложные ТЛО, ТЛО поверхности земли, гладких поверхностей, временных объектов, а также с целью уменьшения влияния шума выполнить сглаживание поверхностей [196]. Для распознавания ложных ТЛО использованы методы классификации: нижних точек; воздушных точек; точек, расположенных ниже поверхности; изолированных точек.

Для повышения точности распознавания ложных ТЛО, ТЛО поверхности земли и других горизонтальных и наклонных поверхностей применен метод поиска точек поверхности, распознающий слой ТЛО в пределах задаваемой пользователем толщины, который описывает гладкую поверхность наилучшим образом. Такой метод распознает точки твердых поверхностей, представленных плотным массивом ТЛО. При снижении плотности и повышении значения среднего квадратического отклонения анализируемой точки от средней поверхности, вписываемой в массив ТЛО, эта точка не будет относиться к классу поверхности.

Точки временных объектов распознаются посредством сравнения информации о GPS-времени групп соседних точек. Если в зонах перекрытий группа точек распознавалась только по ТЛО одного маршрута, то такая группа относится к временным объектам.

Сглаживание выполняется посредством построения поверхностей второго порядка по массиву ТЛО. Условием, при котором выполняется сглаживание положе-

ния точки в пространстве, является ее ближайшее расстояние от построенной поверхности, которое не превышает задаваемый допуск, подбираемый в результате предварительного анализа точности взаимного ориентирования и шума данных.

Универсальный алгоритм взаимного ориентирования данных ВЛС позволяет рассчитать параметры калибровки съемочной системы, случайные и систематические ошибки в траекториях полета. Это выполняется на основе поиска соответственных точек, линий и контуров в зонах межмаршрутных перекрытий массивов ТЛО. Параметры калибровки, т. е. ЭВзаимО сканерного блока относительного ИНС или антенны ГНСС, для большинства моделей ВЛС известны. При низкой точности определения параметров калибровки поиск соответствий между траекториями позволяет их уточнить. Вычисление систематических ошибок позволяет для каждой траектории полета найти линейные и угловые смещения, которые используются для расчета общих поправок в ЭВнешО данных ВЛС. Вычисление случайных ошибок позволяет для каждой точки траектории определить локальные поправки. При расчете значений локальных поправок и их сглаживании в целях исключения случайных ошибок применяют различные методы фильтрации. Как и для данных МЛС, разработанный универсальный алгоритм взаимного ориентирования применяет одномерный фильтр Гаусса.

Сочетание алгоритмов фильтрации и взаимного ориентирования данных ВЛС (рисунок 3.14) формирует универсальную методику предварительной обработки.

На выбор этапов предварительной обработки влияет задаваемое поперечное перекрытие, зависящее от требований к точности создания ЦММ. Если задаваемое поперечное перекрытие больше определенного значения, то взаимное ориентирование можно не выполнять. Для целей топографической съемки с высотой сечения рельефа 0,25 м минимальное значение поперечного перекрытия составляет 76 %. Если высота сечения рельефа равна 50 см или выполняется АФС территорий с многоэтажной застройкой, то выбор значения поперечного перекрытия определяется требованиями ГОСТ Р 59328-2021 [66]. При неизвестном требуемом перекрытии аэрофотоснимков, когда исходные данные удовлетворяют необходимой точности, следует применить полный цикл обработки по предложенным алгоритмам.

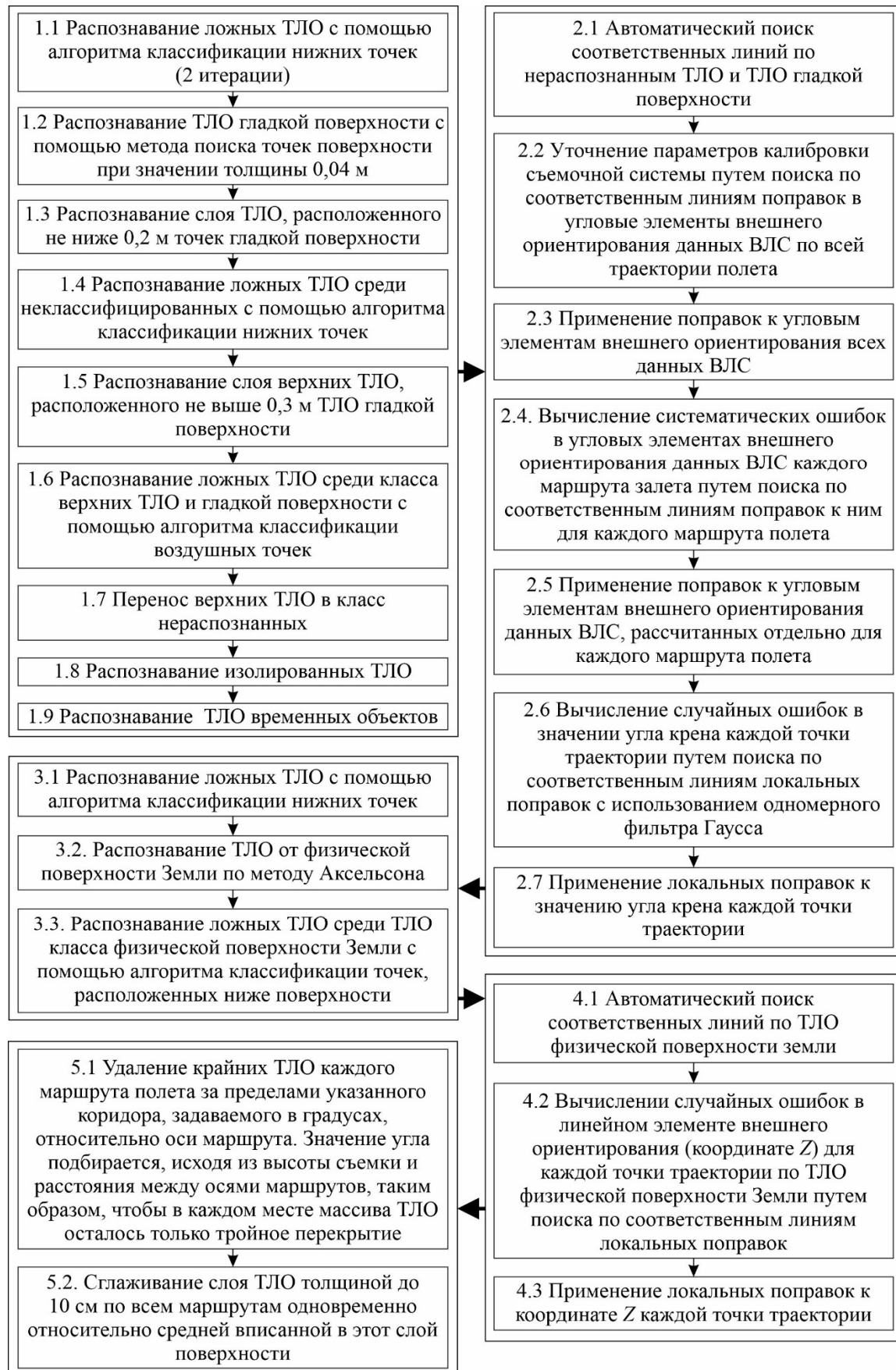


Рисунок 3.14 – Универсальные алгоритмы фильтрации и взаимного ориентирования данных ВЛС

Значения параметров, применяемых в универсальных алгоритмах фильтрации и взаимного ориентирования данных ВЛС, подбираются по такому же принципу, как и для данных МЛС (таблица 3.9)

Таблица 3.9 – Оптимальные значения параметров для данных ВЛС

№ этапа	Метод	Значение параметров
1.1	Метод классификации нижних точек	Первая итерация: Максимальное количество точек в группе – 10; радиус – 5 м, превышение – 0,1 м. Вторая итерация: Максимальное количество точек в группе – 1; радиус – 0,3 м; превышение – 0,05 м.
1.4	Метод классификации нижних точек	Максимальное количество точек в группе – 10; радиус – 0,3 м, превышение – 0,02 м.
1.6	Метод классификации воздушных точек	Радиус поиска – 0,5 м; коэффициент – 1; минимальное количество точек – 5.
1.8	Метод классификации изолированных точек	Радиус поиска – 1 м; максимальное количество точек в группе – 20.
2.1	–	Длина линии – 1 м; глубина сечения ТЛО – 0,1 м; максимальный угол наклона линии – 10°.
3.1	Метод классификации нижних точек	Максимальное количество точек в группе – 10; радиус – 0,3 м, превышение – 0,02 м.
3.2	Метод Аксельсона	Размер ячейки – 60 м; дистанция приближения – 0,5 м; угол приближения – 6°
3.3	Метод классификации точек, расположенных ниже поверхности	Среднее значение превышения – 0,02 м; коэффициент – 1.
4.1	–	Длина линии – 1 м; глубина сечения ТЛО – 0,1 м; максимальный угол наклона линии – 10°.

Приведенные значения параметров подходят для данных ВЛС, полученных при частоте зондирующих импульсов 640 кГц, частоты сканирования 20 Гц и скорости полета 36 км/ч.

Заключительными этапами технологической схемы является внешнее ориентирование и оценка точности. Преимущество схемы заключается в возможности принятия решения о выполнении ее этапов в зависимости от уровня застроенности территории, внешних условий измерений и задаваемых параметров ВЛС.

3.3.2 Исследования технологической схемы создания пространственно-информационных моделей по данным ВЛС

Описание исходных данных ВЛС. Для апробации результатов разработки тех-

нологической схемы создания ПИМ по данным ВЛС применялись материалы съемки с высоты 125 м территории студенческого городка СГУГиТ, выполненного с помощью лазерного сканера АГМ-МСЗ, установленным на БВС «Геоскан-401». Базовая станция, применяемая для обработки данных ВЛС, устанавливалась на крыше лабораторного корпуса СГУГиТ. Полет состоял из восьми маршрутов, поперечное перекрытие которых составило 90 %, что позволило выполнить доскональное исследование точности данных ВЛС и разработанной технологической схемы. Среднее продольное перекрытие аэрофотоснимков составило 76 %.

Совместная обработка сырых ГНСС-измерений, измерений ИНС и выполненных на базовой станции выполнялось в ПО AGM PosWorks Web. Рассчитанная траектория использовалась в ПО AGM ScanWorks для генерации массивов ТЛО, которые затем были импортированы в TerraSolid, где в ходе первичной обработки ему был присвоен истинный цвет по аэрофотоснимкам, а также выполнено разделение по маршрутам (рисунок 3.15).

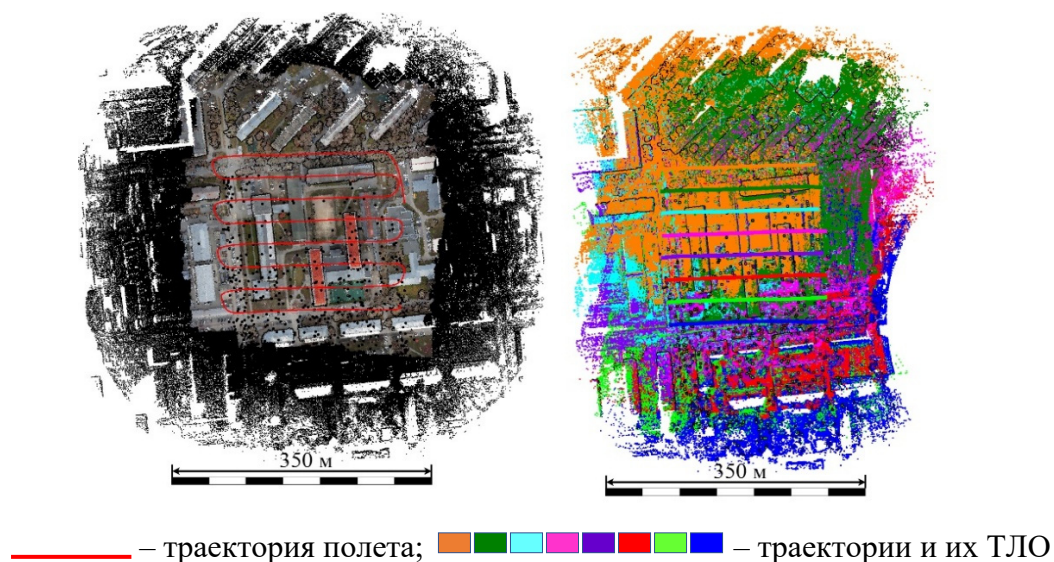


Рисунок 3.15 – Результат ВЛС

Из-за значительного поперечного перекрытия маршрутов на центральном участке образовалась зона перекрытия массивов ТЛО всех маршрутов (рисунок 3.16). Значение шума данных в пределах сечения глубиной 30 см составило 12 см.

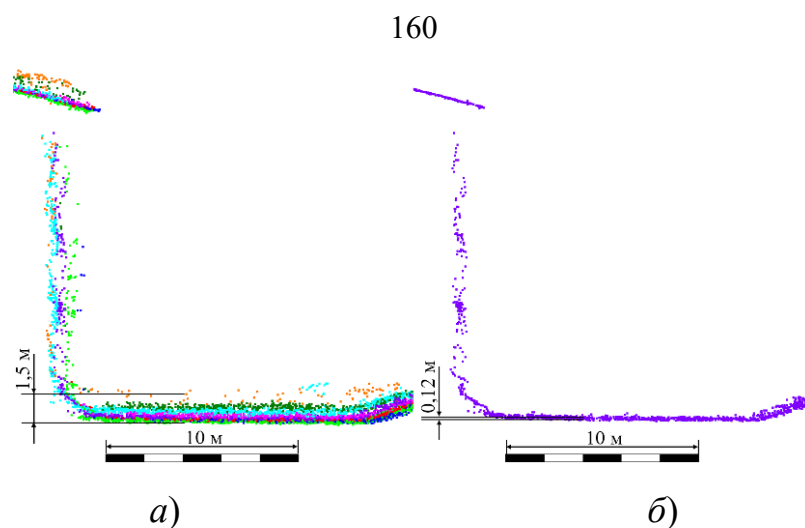


Рисунок 3.16 – Поперечное сечение массива ТЛО глубиной 30 см:

а) вид сверху; б) вид сбоку

Исследование универсальных алгоритмов фильтрации и взаимного ориентирования данных ВЛС. Предложенные универсальные алгоритмы обработки данных ВЛС были применены к данным сканера АГМ-МСЗ. На рисунке 3.17 приведен пример результата обработки для одного маршрута полета по первой стадии алгоритма фильтрации.

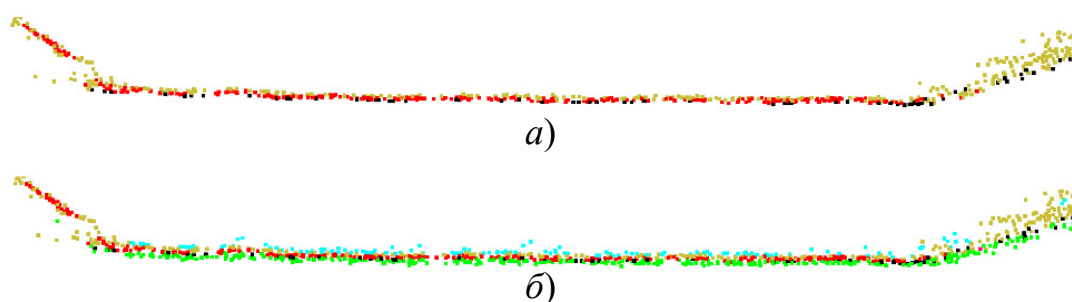


Рисунок 3.17 – Поперечное сечение массива ТЛО глубиной 30 см одного маршрута после первой стадии универсального алгоритма фильтрации:

а) без ложных точек; б) с ложными точками; ■ – ТЛО поверхности земли; ■ – ТЛО гладкой поверхности; ■ – ложные ТЛО ниже земли; ■ – ложные ТЛО выше земли; ■ – неклассифицированные ТЛО

Результат поиска соответственных линий на горизонтальных и наклонных поверхностях позволил рассчитывать поправки в координату Z и угловые ЭВзаимо.

По этим линиям после каждого этапа алгоритма выполнялась оценка точности в высотном положении (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Оценка точности по этапам алгоритма взаимного ориентирования данных ВЛС

Этап алгоритма	Средняя ошибка, м			СКО, м			Максимальная ошибка, м		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
2.1	0,043	0,077	0,139	0,086	0,122	0,207	0,689	0,527	1,356
2.3	–	–	0,126	–	–	0,173	–	–	0,847
2.5	–	–	0,046	–	–	0,062	–	–	0,333
2.7	–	–	0,044	–	–	0,059	–	–	0,324
4.1	–	–	0,035	–	–	0,044	–	–	0,214
4.3	0,007	0,026	0,020	0,013	0,038	0,026	0,106	0,135	0,128

С целью оценки точности в плановом положении до взаимного ориентирования был осуществлен поиск соответственных линий по вертикальным поверхностям, которыми служили стены зданий. Эти линии не были использованы для вычисления поправок в плановом положении, так как из-за острых углов падения лазерного луча шум был значителен на вертикальных поверхностях, а плотность массива ТЛО – ниже. Это стало следствием того, что между крайними перекрытиями маршрутов полета на стенах не определялись соответственные линии. Это привело бы к недостоверному вычислению поправок. Соответственные линии на вертикальных поверхностях были найдены повторно после последнего этапа универсального алгоритма взаимного ориентирования с целью оценки точности в плане.

Результаты оценки точности показывают, что данные ВЛС должны удовлетворять допуску на построение топографических планов масштаба 1: 500 с высотой сечения рельефа 0,25 м, учитывая тот факт, что производителем системы ВЛС заявлена абсолютная точность определения координат точек местности на уровне 3–5 см. Итоговый вывод об абсолютной точности данных можно сделать после измерения по массиву ТЛО координат контрольных точек более точными методами.

При больших значениях поперечного перекрытия массивов ТЛО независимо от результатов их взаимного ориентирования достоверность распознавания объектов снижается. Поэтому в зонах межмаршрутных перекрытий рекомендуется

оставлять ТЛО только одного маршрута полета. Если в состав ЦММ необходимо включить отображение вертикальных поверхностей, то следует удалять ТЛО в зонах перекрытия только частично. Минимальное количество перекрытий маршрутов в этом случае составляет три. Например, стены здания, над которыми проходил маршрут полета, могут быть получены по двум соседним. Тогда взаимное ориентирование данных ВЛС следует осуществлять при любых значениях перекрытий, а далее проводить сглаживание поверхностей (рисунок 3.18).

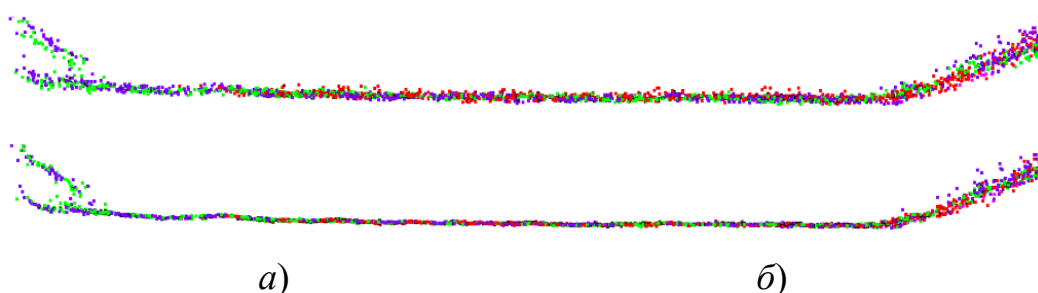


Рисунок 3.18 – Итоговый результат взаимного ориентирования:

а) до сглаживания; *б)* после сглаживания

Разработанная схема сбора и предварительной обработки данных ВЛС может быть использована для различных моделей сканирующих систем и БВС. При применении каждой новой модели оборудования необходимо подбирать заново оптимальные значения параметров алгоритмов, указанных в таблице 3.9.

3.4 Создание пространственно-информационных моделей по данным НЛС

3.4.1 Технологическая схема создания пространственно-информационных моделей по данным НЛС

Создание ПИМ по данным НЛС принципиально отличается тем, что съемка выполняется из статического положения и результат может быть получен как с привязкой во внешней системе координат, так и без привязки. Привязка данных НЛС выполняется в случае, если целью работ является создание итоговой продукции в определенной системе координат. В остальных случаях, когда необходимо

определение только геометрических параметров объектов, привязка не осуществляется. Это ключевое отличие оказывает влияние на этапы создания рабочей программы ПВО и полевого сбора данных. Этапы технологической схемы сбора и обработки данных НЛС рассмотрены в [98], но отдельные из них требуют определенного уточнения и пояснения, применительно к конкретным ситуациям съемки. На рисунке 3.19 приведена такая усовершенствованная технологическая схема.

При НЛС съемочное обоснование разделяется на основное и рабочее. Основное ПВО необходимо для решения задач в определенной системе координат. Оно создается от пунктов государственной геодезической сети (ГГС) или государственных сетей сгущения (ГСС) с целью внешнего ориентирования данных НЛС путем приложения теодолитных ходов или с помощью ГНСС-измерений. Рабочее ПВО применяется для взаимного ориентирования сканов – массивов ТЛО, полученных методом НЛС с каждой сканерной позиции. Точками рабочего ПВО выступают специальные марки, равномерно размещаемые вокруг каждой сканерной позиции, или однозначно идентифицируемые характерные точки местности [150].

На этапе предварительной обработки взаимное и внешнее ориентирование сканов выполняется одним из следующих способом:

- определение координат всех точек рабочего ПВО с помощью методов тахеометрической съемки или съемки с помощью ГНСС-приемников. Каждый одиночный скан ориентируется от точек рабочего ПВО;
- отдельные точки рабочего ПВО, размещенные равномерно в пределах территории сканирования, совмещаются с точками основного. Выполняется последовательное подсоединение каждого скана путем их взаимного ориентирования по точкам рабочего ПВО, расположенных в зонах перекрытия сканов. Получается единый массив ТЛО, ориентированный в системе координат одного из сканов, и который затем по точкам основного ПВО внешне ориентируется;
- выполняется внешнее ориентирование первого скана от точек основного ПВО по опорным маркам. Выполняется последовательное подсоединение сканов, начиная от первого, по маркам рабочего ПВО.

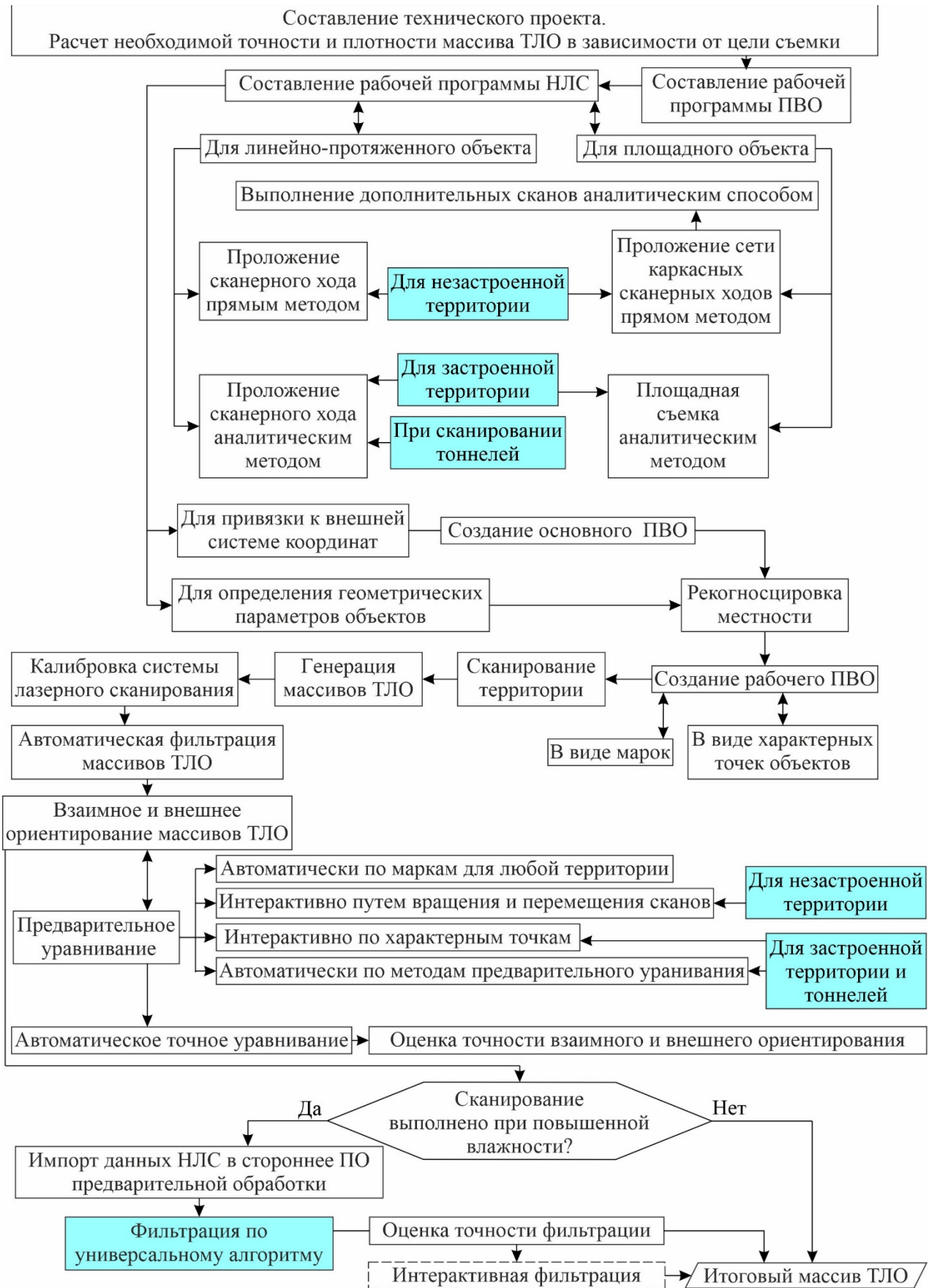


Рисунок 3.19 – Технологическая схема сбора и предварительной обработки данных НЛС

При обработке данных, полученных последними двумя способами, используются методы уравнивания сетей скантриангуляции [98].

При составлении рабочей программы НЛС учитывается, площадной или линейно-протяженный характер имеет объект, а также какая территория съемки: застроенная или незастроенная, тоннель. От этого зависит выбор метода определения ЭВнешО сканов: прямой или аналитический. При прямом методе определение ЭВнешО применяется прямая фотограмметрическая засечка, а при аналитическом – двойная обратная. Сканирование может выполняться площадным способом, способом проложения сканерных ходов или их комбинацией. Проложение сканерных ходов выполняется прямым или аналитическим методом. Вне зависимости от территории и характера объекта сканирования может применяться любой способ и метод измерений, но с целью повышения производительности и достижения высоких точностей их рекомендуется выбирать при таких ситуациях:

- для застроенной территории при линейно-протяженном характере объекта и тоннелей оптимально выполнять проложение сканерных ходов аналитическим методом;
- для незастроенной территории при линейно-протяженном характере объекта оптимально выполнять проложение сканерных ходов прямым методом;
- для застроенной территории при площадном характере объекта оптимально выполнять площадную съемку аналитическим методом;
- для незастроенной территории при площадном характере объекта оптимально сначала прокладывать сеть каркасных сканерных ходов прямым методом, а затем сканировать теневые зоны прямым методом от пунктов каркасной сети.

Основное преимущество применения аналитического метода на застроенных территориях обусловлено наличием большого количества вертикальных поверхностей объектов, на которых дополнительно можно размещать марки, и возможностью идентификации характерных точек среди элементов таких объектов.

Для повышения точности взаимного и внешнего ориентирования сканов на этапе предварительной обработки также, как и для других методов ЛС, выполня-

ется автоматическая фильтрация данных в ПО от компаний-производителей наземных лазерных сканеров. В таком ПО в соответствии с применяемой методикой полевого сбора данных, зависящей от метода определения ЭВнешО сканов, схемы развития рабочего ПВО и территории объекта съемки, выполняется взаимное и внешнее ориентирование.

Взаимное и внешнее ориентирования данных НЛС может выполняться автоматически или интерактивно. В первом случае применяются марки или методы привязки на основе трехмерного подхода, а во втором – интерактивно размещаемые характерные точки или способ вращения и перемещения сканов.

Автоматическая привязка по маркам выполняется в случае, если все они детально сканировались с каждой сканерной позиции и каждой марке назначался соответствующий идентификатор, что позволяет добиться высокой точности уравнивания при минимальном объеме камеральных работ. Для автоматической привязки без использования марок необходима реализация в специализированном ПО одного из методов предварительного уравнивания, описанных в 2.6.3. Точность таких методов повышается, если присутствует большое количество вертикальных объектов. Поэтому их применение оптимально на застроенных территориях.

Если сканирование выполнялось при неблагоприятных погодных условиях, при наличии влаги на поверхностях объектов, в специализированном ПО дополнительно может применяться универсальный алгоритм фильтрации данных НЛС (рисунок 3.20), отдельные этапы которого схожи с этапами для данных МЛС и ВЛС.

Значения параметров, применяемых в универсальном алгоритме фильтрации данных НЛС, менее устойчивы, чем для соответствующих алгоритмов данных МЛС и ВЛС. Это связано с менее равномерной плотностью массива ТЛО, полученного методом НЛС: плотность массива ТЛО падает с увеличением расстояния от сканерной станции, расстояние между сканерными станциями непостоянно. Поэтому перед применением этого алгоритма к определенному набору данных требуется уточнять параметры, взяв за основу такие, что указаны в таблице 3.11.



Рисунок 3.20 – Универсальный алгоритм фильтрации данных НЛС

Таблица 3.11 – Оптимальные значения параметров, применяемых в универсальном алгоритме фильтрации данных НЛС

№ этапа алгоритма	Метод	Значение параметров
1.	–	Значение интенсивности менее 8 000 для ТЛО
2	Метод классификации нижних точек	Первая итерация: Максимальное количество точек в группе – 10; радиус – 0,1 м, превышение – 0,5 м. Вторая итерация: Максимальное количество точек в группе – 99; радиус – 0,3 м; превышение – 0,5 м.
3	Метод Аксельсона	Размер ячейки – 10 м; дистанция приближения – 1 м; угол приближения – 8°.
4	Метод классификации нижних точек	Максимальное количество точек в группе – 10; радиус – 0,3 м, превышение – 0,3 м.
5	Метод классификации точек, расположенных ниже поверхности	Среднее значение превышения – 0,02 м; коэффициент – 1.
6	Метод классификации воздушных точек	Радиус поиска – 10 м; коэффициент – 4; минимальное количество точек – 3.
7	Метод классификации изолированных точек	Радиус поиска – 5 м; максимальное количество точек в группе – 5.

3.4.2 Исследования технологической схемы создания пространственно-информационных моделей по данным ВЛС

Для апробации результатов разработки технологической схемы создания ПИМ по данным НЛС применялись результаты съемок производственных объектов ОАО «Сургутнефтегаз» (2017 г.), включающие базу производственно-технического обслуживания, центральный пункт сбора нефти и дожимную насосную станцию. Для этого применялся сканер Leica ScanStation 2. ЛС выполнялось по способу проложения каркасных сканерных ходов прямым методом с последующим выполнением дополнительных сканов аналитическим. Ориентирование дополнительных сканов выполнялось от каркасных. Этот способ был выбран согласно рекомендациям технологической схемы сбора и предварительной обработки данных НЛС для съемки площадного объекта (рисунок 3.19).

Рассмотрим результаты НЛС одного из объектов – дожимной насосной станции (ДНС) Талаканского месторождения площадью 6 Га (рисунок 3.21).

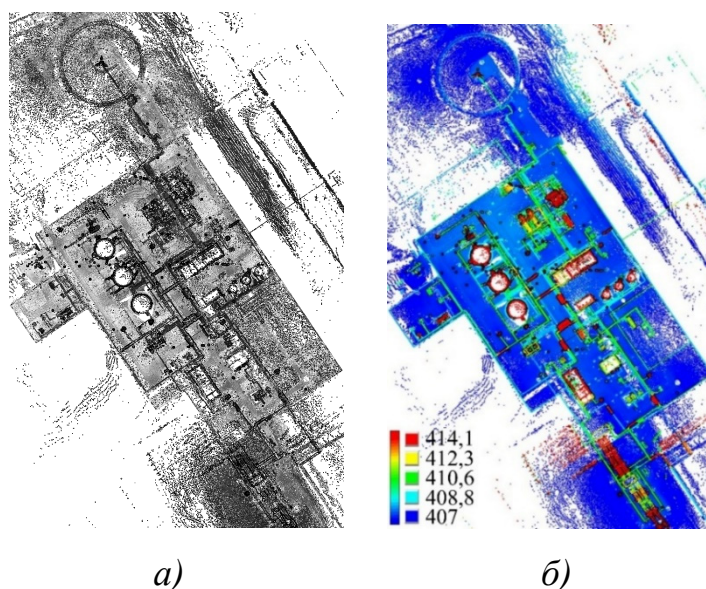


Рисунок 3.21 – Результат уравнивания сканов в режиме отображения:

a) по интенсивности; *б)* по высоте

Координаты точек основного ПВО, используемых для внешнего ориентирования массива ТЛО, были определены спутниковым методом в статическом режиме

от постоянно действующей базовой станции, расположенной в пределах 1 км от ДНС. СКО определения координат точек основного ПВО не превысила 9 мм. Сеть сканерных ходов была автоматически уравнена в ПО Leica Cyclone (таблица 3.12). Всего на объекте были выполнено четыре дополнительных скана, ориентирование которых выполнялось относительно только двух точек сканерного хода аналитическим методом. Поэтому то для оценки точности их уравнивания выполнялись контрольные измерения по зонам перекрытиям массивов ТЛО (таблица 3.13).

Таблица 3.12 – Оценка точности уравнивания сети сканерных ходов

Вид ошибки	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,005	0,008	0,002
Средняя квадратическая ошибка	0,005	0,006	0,003
Максимальная ошибка	0,027	0,028	0,018

Таблица 3.13 – Оценка точности уравнивания дополнительных сканов

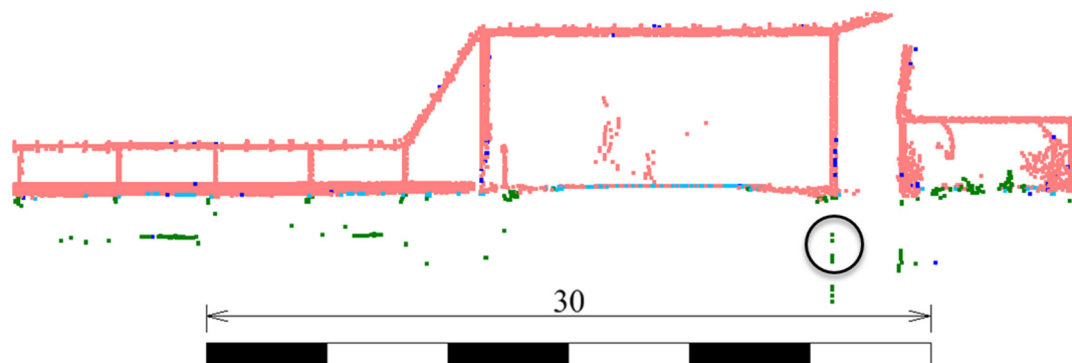
Вид ошибки	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,008	0,012	0,004
Средняя квадратическая ошибка	0,010	0,014	0,005
Максимальная ошибка	0,018	0,024	0,006

Результат уравнивания приведен на рисунке 3.21.

Для удаления ложных ТЛО был применен универсальный алгоритм фильтрации данных НЛС. Информация об интенсивности позволила выделить многие ложные ТЛО, полученные в результате переотражения лазерного луча от влажных поверхностей. Далее применялись методы, позволившие выделить все ложные ТЛО и ТЛО поверхности земли. На рисунке 3.22 показан итоговый результат классификации ТЛО, где применялись оптимальные параметры, указанные в таблице 3.11.

Подобранные параметры могут быть использованы в качестве начальных при подборе оптимальных для других данных. Применяемые параметры, приведенные в таблице 3.19, подобраны для данных НЛС, полученных при угловом разрешении

0,06° по горизонтали и вертикали при среднем расстоянии между сканерными станциями 30 м.



- – нераспознанные ТЛО; ● – отфильтрованные ТЛО по значению интенсивности;
- – отфильтрованные ложные ТЛО после этапа алгоритма № 9; ● – ТЛО поверхности земли;
- – месторасположение переклассифицированных точек

Рисунок 3.22 – Итоговый результат классификации ТЛО

3.5 Создание пространственно-информационных моделей железных дорог по данным наземных измерительных комплексов и АФС с БВС

3.5.1 Технологическая схема создания пространственно-информационных моделей по данным наземных измерительных комплексов и АФС с БВС

Независимо от рассчитанных параметров АФС, не все из моделей БВС способны обеспечить получение данных с абсолютной точностью, достаточной для решения задач железнодорожного транспорта без размещения большого количества опорных точек в рамках этапа создания ПВО. Размещение опорных точек должно быть равномерным, а цифровая камера калибрована. Кроме этого, опорные точки обязательно должны располагаться по краям зоны съемки [213]. Согласно ГОСТ Р 58854 [65] для каждого блока фототриангуляции необходимо размещать не менее пяти опознаков. Такие требования предъявляются к БВС, которые не определяют ЭВзаимО в полете или их точность является низкой, порядка нескольких метров.

Определение точных ЭВзаимО в полете является наиболее предпочтительным вариантом, применяемым только в БВС высокой стоимости. Определение центров фотографирования выполняется с помощью бортового ГНСС-приемника в режиме кинематики. Также с помощью бортовой системы ИНС могут определяются углы наклона БВС. Значения точных ЭвнешО для каждого снимка определяются в результате совместной обработки полученных данных. По итогам приведенных в [298] исследований, выполненных по данным БВС DJI Phantom 4 RTK, было выявлено, что одной опорной точки, расположенная в центре съемочного участка, достаточно для построения фотограмметрического массива точек с высокой точностью, но также допустимо не применять опорные точки совсем.

DJI Phantom 4 RTK – это дорогостоящий БВС. По этой причине часто применяется множество недорогих моделей БВС, не поддерживающие режим кинематики, что предъявляет повышенные требования к созданию ПВО. Одним из таких БВС является DJI Phantom 4 Pro. Применение такого БВС и подобных моделей требует размещения большого количества опорных точек по участку [232].

При создании ПВО актуальной задачей является сокращение времени измерения координат опорных точек и их количества. Для ускорения этого процесса на железных дорогах применяют путеизмерительные тележки. Основное их назначение – это сбор всех необходимых данных о геометрических параметрах путей, определять их абсолютное положение [194, 198].

Одной из путеизмерительных тележек является аппаратно-программный комплекс (АПК) «Профиль-М», который не требует создания ПВО в отличие от других тележек [198]. При перемещении тележки оператором записывается траектория, следовательно измеряются координаты оси железной дороги и головок рельсов, по которым рассчитываются геометрические параметры рельсовых путей.

Как правило, АПК «Профиль-М» также используется для создания масштабных планов железнодорожных станций и перегонов. Эти планы могут иметь различные масштабные коэффициенты вдоль осей X и Y [182]. Основная суть создания масштабных планов с АПК «Профиль-М» заключается в том, что оператор дает

конкретные названия осевым точкам рельсовых путей, которые расположены напротив объектов железной дороги. Сохранение координат этих точек происходит в моменты остановок.

Точки оси пути, сохраненные напротив объектов железной дороги, могут быть использованы и для географической привязки поперечных профилей. Применение БВС позволяет заменить трудоемкие наземные методы, могут быть использованы для измерения габаритов. На рисунке 3.23 приведена технологическая схема сбора и предварительной обработки данных АФС с БВС для создания ПИМ.

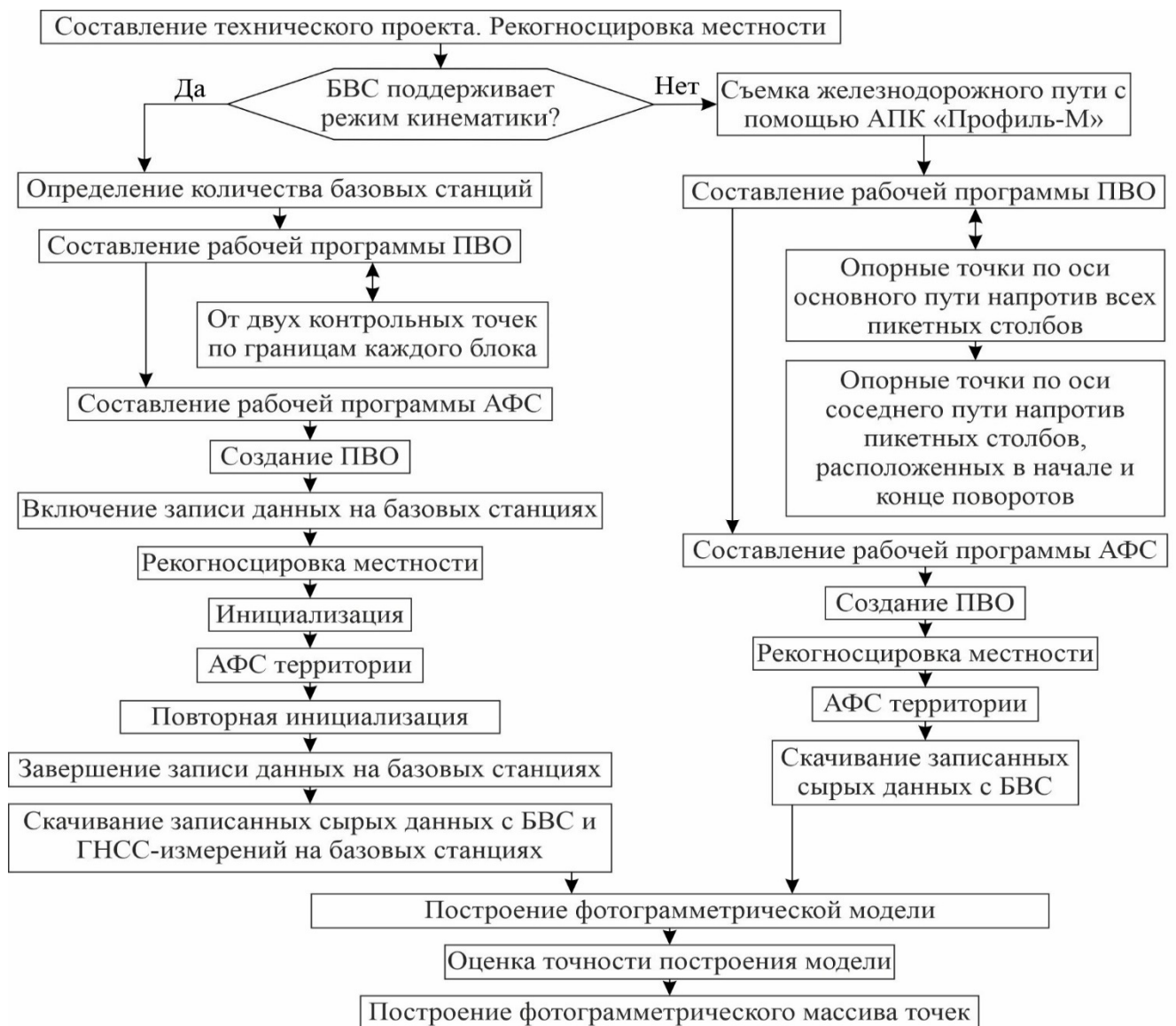


Рисунок 3.23 – Технологическая схема сбора и предварительной обработки данных АФС с БВС для объектов железнодорожного транспорта

Сочетание полученных с АПК «Профиль-М» результатов измерений и данных с БВС позволяет решить все задачи исполнительной съемки железных дорог. Поскольку «Профиль-М» измеряет координаты оси пути, их можно применять для географической привязки фотограмметрических массивов точек, полученных недорогами БВС без поддержки режима кинематики. В этом случае необходимо учитывать особенности распределения опорных точек. Полученные на оси рельсового пути опорные точки не соответствуют правилу их размещения по краям полосы съемки, когда ремонтируется только один железнодорожный путь. Когда тележка используется для измерения двух соседних железнодорожных путей, описанная проблема не возникает. В этом случае распределение опорных точек является равномерным и парным [202].

Особенностью разработанной схемы является применение наземных измерительных средств в качестве основы для создания ПВО при применении БВС без поддержки режима кинематики в реальном времени.

3.5.2 Исследование точности создания пространственно-информационных моделей по данным наземных измерительных комплексов и АФС с БВС

Совместное применение БВС и АПК «Профиль-М» позволяет не использовать другие геодезические приборы на всех этапах исполнительной съемки железных дорог. Чтобы обосновать предложенный в технологической схеме вариант размещения опорных точек, было выполнено исследование, заключающееся в многократном построении фотограмметрических моделей при их различном количестве. Для выполнения исследований были использованы данные тележки для двух соседних железнодорожных путей между станциями Тутальская и Литвиново в Кемеровской области. АФС протяженностью 22 км выполнялась с высоты 30 м в два маршрута с помощью DJI Phantom 4 Pro. Для исследования был выбран фрагмент длиной 4 400 м, состоящий из одного прямого участка и двух поворотов. Параметры камеры рассчитывались в результате самокалибровки [295].

Для обработки данных БВС было выбрано ПО Agisoft Metashape [180]. Чтобы оценить, как количество опорных точек и их распределение влияют на точность построения фотограмметрических моделей, последние создавались несколько раз. Обработка выполнялась для всего участка и отдельно для его прямой части длиной 2 000 м.

Каждая фотограмметрическая модель строилась по одной из схем распределения опорных и контрольных точек, располагаемых напротив пикетных столбов:

- по оси одного пути каждые 100 м размещались опорные точки;
- по оси одного пути каждые 200 м размещались опорные точки, между ними размещались контрольные точки;
- по оси обоих путей каждые 100 м размещались опорные точки;
- по оси обоих путей каждые 200 м размещались опорные точки, между ними размещались контрольные точки;
- по оси одного пути каждые 100 м размещались опорные точки, по оси второго пути несколько отдельных опорных точек (одна, две или семь). Все остальные точки были контрольными.

Необходимо также было решить вопрос определения точного положения опорных точек, измеряемых «Профиль-М» по оси пути. Их вертикальное положение вычисляется как средняя высота между головками правого и левого рельсов. При формировании фотограмметрических моделей опорные точки размещаются на поверхности земли. Для точного внешнего ориентирования фотограмметрических моделей высота головок рельсов над землей должна быть известна в каждом положении. АПК «Профиль-М» не измеряет эту высоту. Тем не менее, возможно более точно рассчитать высоты в случае размещения опорных точек на центре шпал рельсов в поперечном направлении. В продольном направлении опорные точки размещались как можно ближе к перпендикуляру от железнодорожных объектов к оси рельсового пути. Также должен быть известен тип рельсов и шпал. На исследуемом участке среднее превышение между головками рельсов и центром шпал составляла 24 см. Это значение вычиталось из высотных отметок опорных точек.

Чтобы определить, как распределение опорных точек влияет на точность обработки данных АФС, было создано 22 фотограмметрические модели. Исходные наборы данных, используемые для создания фотограмметрических моделей, показаны в таблице 3.14, в которой индекс первого рельсового пути обозначается через «а», тогда как второго – через «t». Первый путь расположен севернее. Фотограмметрические модели с номерами 1–4 и 13–16 были получены с использованием опорных точек с одного рельсового пути. Другие модели были созданы с использованием опорных точек с обоих путей. Например, в таблице 3.14 указано, что для модели № 11 использовались 44 опорные точки на оси рельса «а» и 7 – на оси рельса «t». Количество опорных точек для этой модели составляет 37, размещенных из оси рельса «t». Примеры размещения опорных точек показаны на рисунке 3.24.

Таблица 3.14 – Варианты размещения опорных и контрольных точек

	№	Количество опорных точек	Количество контрольных точек	Расстояние между парами опорных точек, м	Расстояние между парами контрольных точек
Весь участок	1	22а	22а	200	200
	2	44а	0	100	–
	3	22t	22t	200	200
	4	44t	0	100	–
	5	22а+22t	22а+22t	200	200
	6	44а+44t	0	100	–
	7	44а+1t	43t	100	–
	8	44t + 1а	43а	100	–
	9	44а+2t	42t	100	–
	10	44t+2а	42а	100	–
	11	44а+7t	37t	100	–
	12	44t+7а	37а	100	–
Прямой участок	13	11а	10а	200	200
	14	21а	0	100	–
	15	11t	10t	200	200
	16	21t	0	100	–
	17	11а+10t	10а+11t	200	200
	18	21а+21t	0	100	–
	19	21а + 1t	20t	100	–
	20	21t + 1а	20а	100	–
	21	21а + 2t	19t	100	–
	22	21t + 2а	19а	100	–

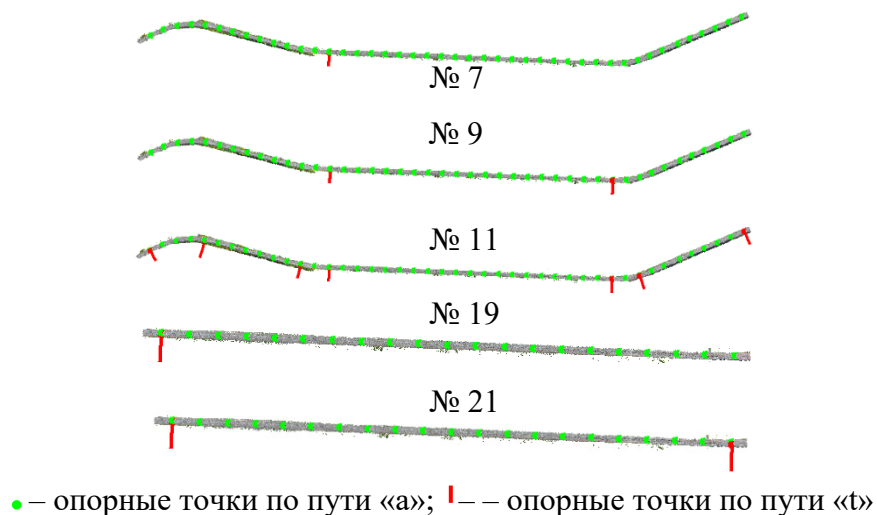


Рисунок 3.24 – Схемы размещения опорных точек

Оценка точности построения моделей представлена в таблицах 3.15 и 3.16.

Таблица 3.15 – Оценка точности построения фотограмметрических моделей по опорным точкам

№ модели	Средняя ошибка, м			Средняя квадратическая ошибка, м			Максимальная ошибка, м		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
1	0,006	0,006	0,006	0,009	0,008	0,007	0,023	0,015	0,016
2	0,022	0,015	0,007	0,032	0,020	0,010	0,104	0,061	0,031
3	0,004	0,006	0,006	0,006	0,007	0,008	0,015	0,015	0,018
4	0,012	0,011	0,007	0,023	0,017	0,009	0,079	0,055	0,022
5	0,038	0,019	0,018	0,047	0,026	0,022	0,112	0,059	0,046
6	0,049	0,022	0,019	0,062	0,030	0,023	0,189	0,077	0,068
7	0,021	0,014	0,007	0,030	0,019	0,010	0,084	0,050	0,029
8	0,016	0,018	0,011	0,033	0,049	0,028	0,160	0,310	0,174
9	0,022	0,014	0,008	0,032	0,019	0,011	0,084	0,050	0,032
10	0,017	0,018	0,011	0,034	0,048	0,027	0,160	0,301	0,168
11	0,031	0,016	0,012	0,045	0,022	0,018	0,147	0,053	0,053
12	0,024	0,014	0,012	0,038	0,020	0,018	0,127	0,058	0,059
13	0,002	0,005	0,002	0,003	0,006	0,002	0,006	0,013	0,005
14	0,009	0,009	0,005	0,014	0,012	0,007	0,048	0,023	0,023
15	0,005	0,006	0,002	0,005	0,007	0,003	0,011	0,011	0,007
16	0,005	0,007	0,007	0,006	0,010	0,008	0,018	0,030	0,017
17	0,034	0,014	0,011	0,039	0,021	0,014	0,075	0,054	0,031
18	0,044	0,014	0,016	0,052	0,020	0,018	0,097	0,058	0,037
19	0,009	0,009	0,005	0,013	0,011	0,007	0,041	0,027	0,019
20	0,005	0,006	0,004	0,007	0,009	0,005	0,015	0,024	0,010
21	0,014	0,009	0,004	0,021	0,011	0,005	0,050	0,027	0,011
22	0,010	0,007	0,004	0,018	0,009	0,005	0,050	0,023	0,010

Таблица 3.16 – Оценка точности построения фотограмметрических моделей по контрольным точкам

№ модели	Средняя ошибка, м			Средняя квадратическая ошибка, м			Максимальная ошибка, м		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
1	0,060	0,040	0,068	0,086	0,052	0,091	0,231	0,120	0,212
3	0,041	0,032	0,063	0,066	0,043	0,078	0,205	0,102	0,154
5	0,067	0,036	0,057	0,095	0,048	0,074	0,268	0,138	0,234
7	0,099	0,040	0,077	0,117	0,051	0,102	0,251	0,125	0,248
8	0,097	0,041	0,080	0,123	0,056	0,111	0,334	0,121	0,302
9	0,098	0,041	0,071	0,116	0,052	0,093	0,243	0,125	0,226
10	0,099	0,042	0,071	0,122	0,056	0,094	0,321	0,121	0,268
11	0,093	0,041	0,045	0,108	0,051	0,055	0,214	0,127	0,127
12	0,095	0,040	0,047	0,119	0,054	0,058	0,293	0,121	0,183
13	0,036	0,035	0,052	0,048	0,043	0,074	0,109	0,093	0,186
15	0,025	0,020	0,073	0,032	0,029	0,084	0,068	0,071	0,135
17	0,065	0,027	0,063	0,078	0,033	0,070	0,147	0,064	0,137
19	0,100	0,030	0,035	0,108	0,039	0,042	0,165	0,097	0,070
20	0,103	0,027	0,055	0,112	0,038	0,066	0,172	0,106	0,112
21	0,100	0,031	0,049	0,109	0,040	0,061	0,164	0,096	0,095
22	0,103	0,028	0,062	0,113	0,040	0,071	0,173	0,106	0,116

При анализе всего участка наименьшие ошибки были получены по модели № 3. При анализе прямолинейной части они были получены для модели № 13. Это можно объяснить тем, что опорные точки располагались только вдоль оси одного пути, а расстояние между ними было увеличено до 200 м. Ошибки на контрольных точках по этим моделям также невелики. Однако распределение опорных точек является плохим из-за их размещения вдоль одной линии. Необходимо выполнить дополнительную оценку точности построения моделей на некотором расстоянии в поперечном направлении от оси пути. Для этого создавался ряд поперечных сечений.

На рисунке 3.25 показаны поперечные сечения, на которых одновременно отображены модели № 4, 6 и 15. Модели № 4 и 15 имеют наклон относительно оси рельса «t» из-за применения опорных точек только вдоль этой оси. Модель № 6 была построена с использованием всех опорных точек для обоих железнодорожных путей каждые 100 м, поэтому ее можно считать за эталонную. Наклон модели № 4 меньше, чем наклон модели № 15, потому что четвертая модель была построена

для всего участка съемки, где было три кривых. Распределение опорных точек немного отличается от прямой линии. Для оценки величины наклона дополнительные контрольные точки размещались в стороне от оси пути «а» на расстоянии 8 м. Количество дополнительных контрольных точек составляло 44, а расстояние между ними – 100 м. Измерялась только точность вертикального положения относительно модели № 6, принятой за эталон (таблица 3.17).

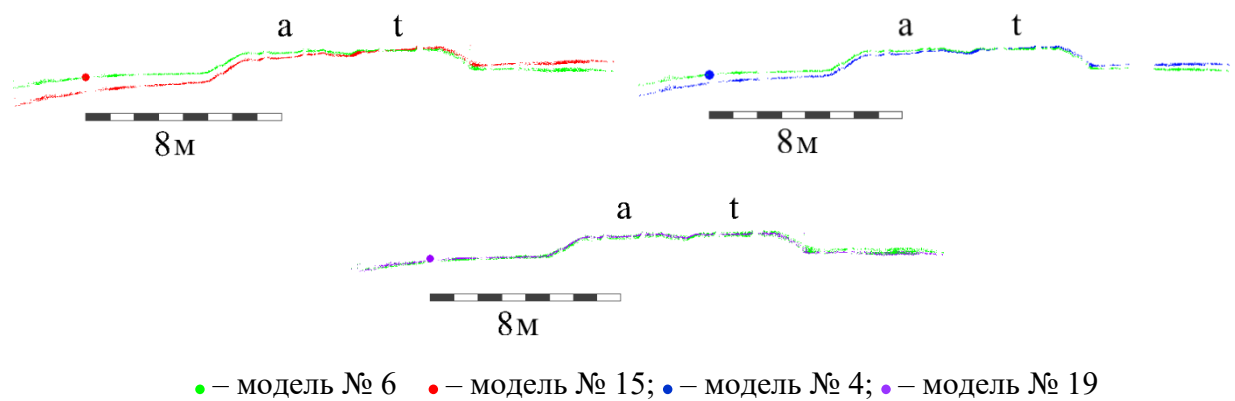


Рисунок 3.25 – Поперечные сечения фотограмметрических моделей

Далее необходимо было определить, сколько опорных точек требуется располагать на оси соседнего железнодорожного пути. Чем меньше количество опорных точек, тем быстрее может быть выполнено создание ПВО. Из таблиц 3.15–3.17 видно, что наименьшие ошибки при анализе всей площади были рассчитаны для моделей № 11, 12. Это означает, что опорные точки должны использоваться на оси соседнего пути до начала и после конца кривой. При анализе прямой части анализируемого участка похожие значения ошибок были получены для моделей № 17, 19–22. Можно сделать вывод, что одной опорной точки на соседнем пути достаточно для построения точной фотограмметрической модели, если направление железнодорожного пути близко к прямой линии. Максимальная ошибка 0,302 см по высоте, полученная на опорной точке модели № 8, связана с недостаточным количеством этих точек на соседнем пути и тем, что она расположена на кривой.

Таблица 3.17 – Оценка точности построения фотограмметрических моделей по высоте с использованием контрольных точек, расположенных на расстоянии 8 м от оси пути «а»

№ модели	Средняя ошибка, м	Средняя квадратическая ошибка, м	Максимальная ошибка, м
1	0,125	0,153	0,322
2	0,103	0,129	0,206
3	0,234	0,291	0,529
4	0,228	0,295	0,504
5	0,026	0,035	0,083
7	0,123	0,150	0,233
8	0,239	0,303	0,477
9	0,085	0,105	0,165
10	0,166	0,217	0,371
11	0,031	0,039	0,067
12	0,033	0,039	0,059
13	0,174	0,196	0,216
14	0,171	0,186	0,203
15	0,596	0,610	0,622
16	0,409	0,417	0,419
17	0,010	0,014	0,020
19	0,022	0,026	0,033
20	0,019	0,024	0,030
21	0,017	0,022	0,025
22	0,020	0,022	0,023

Таким образом, записанная с помощью АПК «Профиль-М» траектория позволяет отказаться от этапа создания ПВО при АФС с БВС. Результаты оценки точности построения фотограмметрических моделей показали, что эта тележка должна перемещаться по двум соседним железнодорожным путям. Если по первому пути необходимо останавливаться напротив всех пикетных столбов для измерения координат опорных точек, то по второму пути остановки необходимы только до начала кривых и после их окончания. Перемещение тележки по двум путям актуально в случае ремонта обоих. В противном случае возможно комбинирование способов создания ПВО. Тогда опорные точки по ремонтному пути измеряются с помощью АПК «Профиль-М», а по соседним – методом отдельных измерений с помощью ГНСС-приемников до и после кривой.

3.6 Выводы по третьему разделу

Технология геопространственного моделирования включает разработанную систему технологических решений сбора и обработки данных ДЗЗ. Итогом каждого технологического решения является ПИМ, которую уже можно применять для выполнения отдельных измерений в рамках определенных задач сферы ТИ. Созданием ПИМ заканчивается этап предварительной обработки данных ДЗЗ.

Разработанная система технологических решений включает четыре технологические схемы, каждая из которых адаптирует первые три из четырех этапов технологии геопространственного моделирования под определенный вид данных: МЛС, ВЛС, НЛС и АФС с БВС. Для различных видов данных ЛС технологические схемы предусматривают всесторонне применение для инфраструктуры автомобильного и железнодорожного транспорта. Для АФС с БВС схема создана для территории железных дорог, когда применяются различные наземные измерительные комплексы. Но она также может быть адаптирована и для автомобильных дорог.

Предложенные технологические решения обладают высоким уровнем автоматизации, что необходимо для оперативного решения требуемых отдельных задач. Чтобы построенные ПИМ соответствовали критерию нормативной точности в ходе сбора и обработки данных ДЗЗ дополнительно необходимо учитывать различные факторы. В результате теоретического анализа такие факторы были разделены на такие группы, как инструментальные ошибки измерений, внешние условия выполнения измерений, метрологические свойства объектов местности, характеристика территории и уровень ее застроенности, ошибки опознавания марок и определения их координат, тип носителя съемочной системы, результаты подготовительных работ, метод внешнего ориентирования данных ДЗЗ, методические ошибки.

Каждое разработанное технологическое решение было апробировано по данным автомобильных и железных дорог Новосибирской, Кемеровской и Якутской и Омской областей. Результаты исследований показали, что точность автоматизировано построенных ПИМ соответствует требованиям нормативной документации.

4 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ МЕТОДИК ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

4.1 Задача разработки методик интеграции данных ДЗЗ

Большинство существующих в настоящее время методик интеграции данных ДЗЗ основано на их взаимном и внешнем ориентировании, а также представлении итогового результата в едином виде. В наиболее общем виде методика интеграции с целью создания ГПМ представлена в [250]. Она разработана для данных МЛС и АФС городских территорий и включает следующие этапы: фототриангуляция аэрофотоснимков, привязка данных МЛС к результатам АФС, моделирование крыш зданий по аэрофотоснимкам, создание ЦМР по данным АФС, моделирование фасадов зданий по данным МЛС и наземным снимкам, создание ЦМР по данным МЛС, совмещение результатов моделирования фасадов и крыш зданий для построения цельных твердотельных моделей, текстурирование твердотельных моделей по АФС и наземным снимкам.

Недостатком такой методики является низкий уровень автоматизации и неполная согласованность между результатами трехмерного моделирования фасадов и крыш зданий, так как этот процесс осуществляется независимо по разным данным ДЗЗ. Большинство этапов этой методики осуществляется интерактивно. Не упоминается то, каким образом выполняется согласование результатов построения ЦМР по данным, полученным различными методами. Также отдельные небольшие объекты не отображаются в итоговой ГПМ.

При разработке методик интеграции данных ДЗЗ необходимо преодолеть указанные недостатки посредством внедрения ряда автоматически инструментов, составления единой ГПМ и возможности отображения всех небольших объектов, что особенно важно при решении задач в сфере ТИ. Каждая новая методика должна разрабатываться в соответствии с методологическими принципами интеграции дан-

ных ДЗЗ, приведенными в 2.1, и методологией интеграции, описанной в 2.4, а также опираться на разработанную технологию геопространственного моделирования, представленную в 2.5.

Если сбор данных ДЗЗ различного вида выполнялся с большим временным промежутком, то тогда дополнительно при разработке методик интеграции следует учитывать временной фактор, отражающий произошедшие изменения на местности. При формировании актуальной ГПМ, в ее состав должны быть включены все последние изменения. Для этого должна быть известна точная дата получения всех данных, включаемых в итоговую модуль [19]. Например, исключение неактуальных данных из точечной ГПМ может быть выполнено при совпадении положения отдельных точек в пределах определенного радиуса поиска относительно точек, представляющих собой более актуальную информацию. Это уменьшает объем базы данных и позволяет получить актуальную ГПМ.

Большинство современного ПО, включающего автоматические методы обработки, заточено на работу только с данными одного вида. При совместной обработке данных различных видов, вне зависимости от того однородные они или нет, автоматические методы взаимного ориентирования перестают работать полностью, либо их точность не позволяет достичь необходимого результата. Тогда существенно увеличивается трудоемкость за счет необходимости применения интерактивных инструментов. Поэтому в современных условиях необходимости применения нескольких наборов данных различных видов особую актуальность приобретают любые разработки, позволяющие ускорить совместную обработку.

Основными способами повышения эффективности совместной обработки данных ДЗЗ различных видов могут быть следующие:

- разделение данных на участки в зависимости от уровня застроенности территории и количества растительности;
- выбор основного метода ДЗЗ для съемки каждого из участков;
- оценка целесообразности применения на участке дополнительного метода ДЗЗ для повышения детальности создаваемой ЦММ и заполнения теневых зон;

- применения на участке дополнительного метода ДЗЗ вместо традиционных методов наземной геодезической съемки с целью снижения трудоемкости работ по созданию ПВО на застроенных территориях;
- применение на участке традиционных методов наземной геодезической съемки и ГНСС-измерений для создания ПВО на незастроенных территориях при условии низкой плотности размещения опорных точек;
- учет временного фактора при применении нескольких методов сбора пространственных данных;
- разработка алгоритмов и методов фильтрации данных ДЗЗ;
- разработка алгоритмов и методов распознавания соответственных точек, линий и контуров;
- разработка алгоритмов и методов сегментации, классификации и выявления изменений;
- разработка методик интеграции данных ДЗЗ.

4.2 Создание геопространственных моделей объектов в результате интеграции данных НФС и МЛС

4.2.1 Методика интеграции данных НФС и МЛС

При съемке территорий методом МЛС возникает большое количество теневых зон, связанных с невозможностью перемещения носителя съемочной системы по определенному участку объекта съемки. При ситуациях, когда данных МЛС оказывается недостаточно для создания трехмерных моделей отдельных объектов небольшой площади, может быть применен метод НФС. Выполняется фотосъемка теневых зон и результат фотограмметрической обработки полученных данных заполняет теневые зоны массива ТЛЮ, полученного методом МЛС. Такая методика актуальна прежде всего при решении задачи создания обмерных чертежей объектов на этапе подготовки проектной документации их ремонта и реконструкции, что от-

мечено в таблице 1.7. На рисунке 4.1 приведена методика интеграции данных НФС и МЛС.



Рисунок 4.1 – Методика интеграции данных НФС и МЛС

Согласно методике, при фотограмметрической обработке фотографий, на которых фрагменты объектов имеют зеркальные или глянцевые поверхности, следует выполнять их маскирование. Чтобы построение модели по фотографиям, полученным неметрическими камерами и без известных центров фотографирования, было выполнено в истинных размерах объектов, применяются опорные точки, координаты которых могут быть определены по массиву ТЛЮ. Для этого массив ТЛЮ дол-

жен иметь общие зоны перекрытия с фотограмметрической моделью. По результатам измерения опорных точек по фотографиям выполняется внешнее ориентирование модели.

Результат создания фотограмметрической модели является основой для построения плотного фотограмметрического массива точек, к которому можно применять такие же методы фильтрации, как и для данных ЛС.

На последнем этапе выполняется распознавание и удаление отдельных точек фотограмметрического массива, расположенных вблизи с точками массива ТЛО. Полученная гибридная векторная точечная ГПМ полностью описывает объект.

4.2.2 Исследования методики интеграции данных НФС и МЛС

Для исследования методики интеграции данных НФС и МЛС была выбрана территория улицы Станиславского г. Новосибирска [22]. МЛС улицы, выполненное системой Riegl VMX-250 в прямом и обратном направлениях, позволило получить массив ТЛО для всех объектов, включая фасады зданий, видимых с траектории носителя. При необходимости построении детальных трехмерных моделей зданий, расположенных вдоль улицы, возникает задача досъемки невидимых участков. На рисунке 4.2 показано одно из таких зданий, особенностью которого является большая площадь остекления. С целью досъемки боковых стен зданий была выполнена наземная фотосъемка камерой SONY DSC-H50.



Рисунок 4.2 – Здание по адресу Станиславского 3/1: а) фотография; б) массив ТЛО

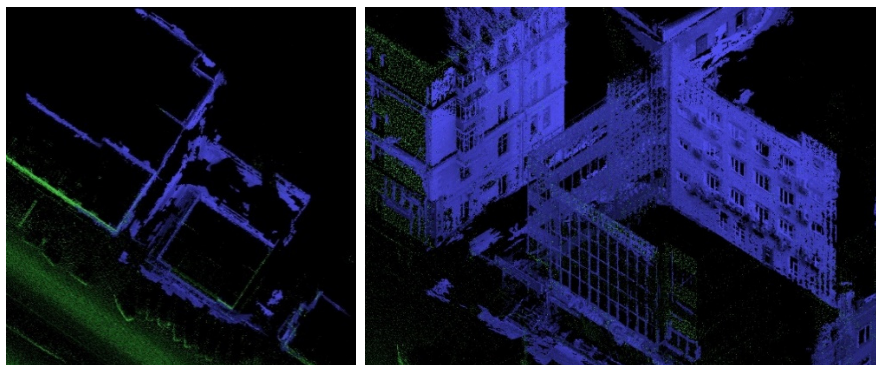
Построение фотограмметрического массива точек было выполнено в ПО Metashape. Предварительно по встроенному в данное ПО шаблону была выполнена калибровка применяемой камеры.

При построении сети ПФТ на этапе взаимного ориентирования снимков выполнялись операции маскирования, измерения координат центров фотографирования и соответственных точек в зонах взаимного перекрытия фотоснимков.

Для внешнего ориентирования фотограмметрического массива точек и массива ТЛО по последнему были измерены координаты семи опорных точек. Средняя ошибка внешнего ориентирования составила 3,8 см по опорным точкам.

Особенностью фотограмметрического массива точек является наличие шума. Этот шум и ложные точки были частично отфильтрованы с помощью описанных в 2.5 методов фильтрации, Оценка точности построения массива точек также была выполнена по пяти контрольным точкам, координаты которых измерялись по массиву ТЛО. Средняя ошибка внешнего ориентирования модели составила 4,2 см.

Таким образом, была построена векторная точечная модель по фотографиям участков, примыкающих к данным МЛС. Построенный фотограмметрический массив точек был объединен с массивом ТЛО. В ходе объединения были распознаны и удалены точки фотограмметрического массива по значению расстояния в 30 см от точек массива ТЛО. На рисунке 4.3 представлен результат объединения – гибридная векторная точечная ГПМ.



■ – данные НЛС; ■ – данные МЛС

Рисунок 4.3 – Гибридная векторная точечная ГПМ

4.3 Создание геопространственных моделей объектов в результате интеграции данных АФС и МЛС

4.3.1 Методика интеграции данных АФС и МЛС

Согласно разработанной методологии интеграции разнородных данных ДЗЗ, результаты АФС и МЛС могут совместно обработаны по двум стратегиям: результаты фотосъемки могут быть использованы как опорные для привязки данных ЛС или наоборот. Первый случай применяется при наличии большого количества сплошной высокой растительности и для городских с многоэтажной застройкой территорий, когда ГНСС-сигнал нестабилен и может прерываться. На незастроенных территориях при стабильном ГНСС-сигнале данные ЛС используются как опорные для привязки результатов АФС. На рисунке 4.4 представлена разработанная методика интеграции данных АФС и МЛС для застроенных или территорий с растительностью [11].

Интеграция данных АФС и МЛС вне зависимости от выбранной стратегии начинается с их независимого сбора и предварительной обработки. Сбор и предварительная обработка данных МЛС выполняется в соответствии с технологической схемой, представленной в 3.2.1. Технологической схема сбора данных АФС зависит от применяемого оборудования, выполнении съемки с ПЛА или с БВС. Пример такой схемы рассмотрен в 3.5.1.

Маркировка опознаков и измерение их координат выполняется в следующих ситуациях:

- внешнее ориентирование данных АФС, если на борту не установлен ГНСС-приемник;
- контроль точности данных АФС, если на борту установлен ГНСС-приемник геодезического класса и координаты центров фотографирования определяются в полете с точность порядка первых значений сантиметров;
- повышение точности данных АФС, если координаты центров фотографирования определяются в полете с точностью порядка нескольких метров.

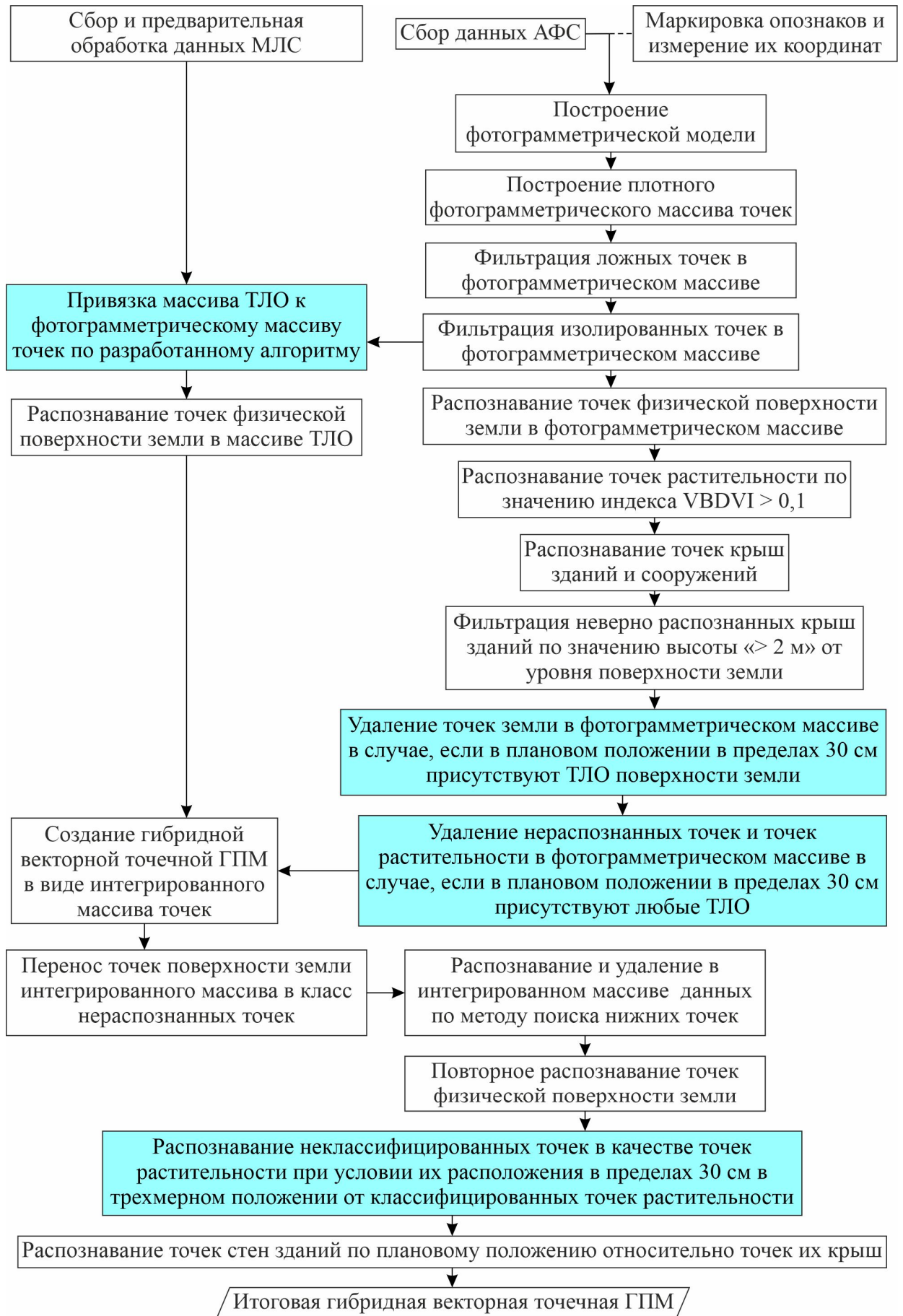


Рисунок 4.4 – Методика интеграции данных АФС и МЛС

Количество опознаков при АФС любой ситуации по сравнению с требуемым их количеством для привязки данных МЛС застроенных территорий требуется значительно ниже, что позволяет снизить объем полевых работ по созданию ПВО или в определенных случаях полностью от них отказаться.

В ходе предварительной обработки данных АФС выполняется построение фотограмметрической модели, фильтрации ложных и изолированных точек.

Далее выполняется привязка массива ТЛО и фотограмметрического массива точек по алгоритму, приведенному на рисунке 4.5. Этот алгоритм основан на трехмерном подходе и описан для незастроенных территорий, когда фотограмметрический массив точек привязывается к массиву ТЛО.

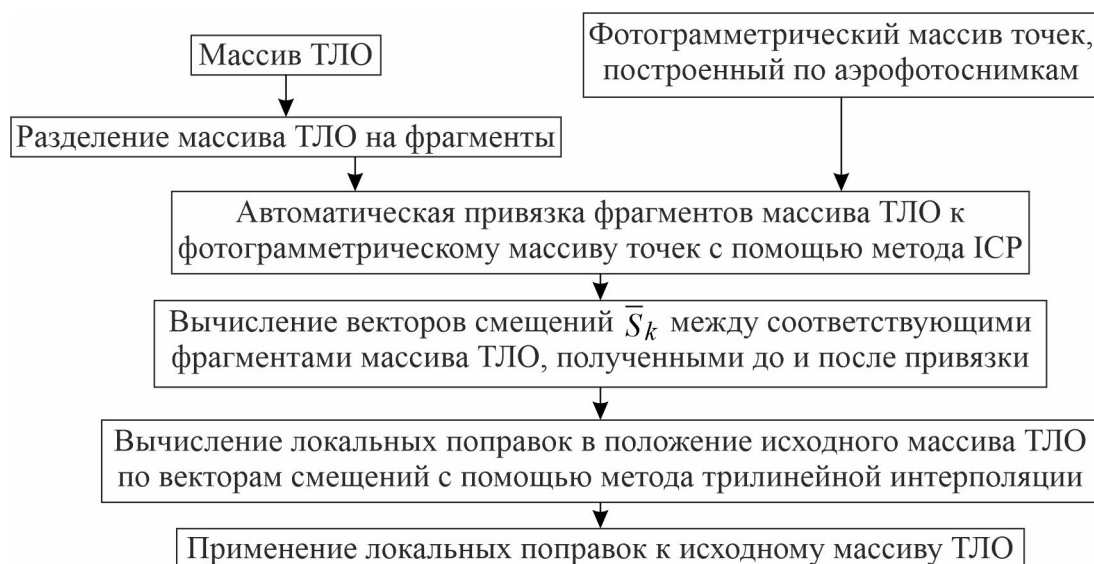


Рисунок 4.5 – Алгоритм привязки данных МЛС к результатам АФС на основе трехмерного подхода

Разработанный алгоритм учитывает особенность получения данных МЛС при съемке в движении, отличается от способов привязки, применяемых для данных НЛС. Применение автоматических методов уравнивания сканов, разработанных для данных НЛС, можно реализовать посредством деления этих данных на фрагменты определенного размера. При применении метода ИСР условием высокой точности привязки в этом случае является наличие вертикальных и горизонтальных плоскостей. Поэтому этот метод наиболее оптимален для данных застроенных го-

родских территорий. На незастроенных территориях, где количество вертикальных плоскостей объектов минимально, привязка может выполнена только по высоте.

После привязки каждого отдельного фрагмента массива ТЛО контуры объектов на границах соседних фрагментов не совпадают. Чтобы устранить несовпадение контуров, далее необходимо выполнить расчет индивидуальных значений поправок к каждой сканерной линии всего исходного массива ТЛО. Так как массив ТЛО по результатам предварительной обработки данных МЛС и фотограмметрический массив точек находятся в горизонтальном положении и сориентированы одинаково друг относительно друга при съемке в единой системе координат, то можно рассчитать вектора смещений между геометрическими центрами фрагментов массива ТЛО до и после привязки по методу ИСР

$$\bar{S}_k = \begin{vmatrix} \bar{X}_{дп} - \bar{X}_{пп} \\ \bar{Y}_{дп} - \bar{Y}_{пп} \\ \bar{Z}_{дп} - \bar{Z}_{пп} \end{vmatrix} = \frac{1}{n} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n X_{дпi} - \sum_{i=1}^n X_{ппi} \\ \sum_{i=1}^n Y_{дпi} - \sum_{i=1}^n Y_{ппi} \\ \sum_{i=1}^n Z_{дпi} - \sum_{i=1}^n Z_{ппi} \end{vmatrix}, \quad (4.1)$$

где \bar{S}_k – вектор смещения;

k – номер фрагмента;

n – количество ТЛО в фрагменте массива;

$\bar{X}_{дп}, \bar{Y}_{дп}, \bar{Z}_{дп}$ – средние значения X, Y, Z точек фрагмента до привязки;

$\bar{X}_{пп}, \bar{Y}_{пп}, \bar{Z}_{пп}$ – средние значения X, Y, Z точек фрагмента после привязки.

На основе рассчитанных векторов смещения с помощью метода трилинейной интерполяции выполняется вычисление локальных поправок в линейные элементы сканерных линий исходного массива ТЛО. По значениям локальных поправок осуществляется уравнивание координат исходного массива ТЛО. В итоге получается сплошной массив ТЛО с совпадающими контурами на стыке фрагментов.

Для незастроенных территорий алгоритм будет отличаться тем, что фотограмметрический массив точек будет привязываться к массиву ТЛЮ.

На следующем этапе выполняется распознавание точек физической поверхности земли независимо в обоих массивах с помощью метода Аксельсона [219], что необходимо для распознавания крыш зданий и удалении лишних точек земли в фотограмметрическом массиве при сравнении с распознанными ТЛЮ земли.

Для распознавания крыш зданий в фотограмметрическом массиве предварительно выполняется поиск точек растительности по значению вегетационного индекса в видимом диапазоне (Visual Band Difference Vegetation Index) $VBDVI > 0,1$. Отфильтрованные точки растительности позволяют повысить точность распознавания контуров крыш, особенно при ситуациях, когда растительность к ним вплотную примыкает. Этот индекс позволяет выполнить распознавание точек на основе информации о цвете, полученного с фотографий. Индекс $VBDVI \in [-1, 1]$ и применяется для выделения растительности вместо индекса $NDVI$ при отсутствии инфракрасного канала у изображений цифровой камеры, установленной на аэрофотосъемочный носитель [300]

$$VBDVI = \frac{2G - R - B}{2G + R + B}, \quad (4.2)$$

где G – значение яркости в зеленом канале;

R – значение яркости в красном канале;

B – значение яркости в синем канале.

Распознавание крыш зданий выполняется посредством поиска расположенных в пределах одной плоскости точек с помощью метода классификации зданий [300]. Пользователем задается ограничение на минимальную площадь крыши здания и допуск на отклонение точек от плоскости по высоте. Чем выше высота полета, тем большее значение допуска следует задавать.

В результате применения метода классификации зданий часть не принадлежащих им точек может быть также распознана как крыши. Для устранения этой

ошибки классификации выполняется фильтрация неверно распознанных точек крыш зданий по значению высоты «> 2 м» от уровня поверхности земли.

Затем выполняется сравнение точек физической поверхности земли фотограмметрического массива и массива ТЛО, в результате которого удаляются точки земли фотограмметрического массива при условии, если в плановом положении в пределах $D = 30$ см отсутствуют ТЛО поверхности земли

$$\sqrt{(X_{АФС} - X_{МЛС})^2 + (Y_{АФС} - Y_{МЛС})^2} \leq D, \quad (4.3)$$

где D – пороговое значение расстояния между точками фотограмметрического массива и точками массива МЛС;

$X_{АФС} Y_{АФС}$ – координаты точки фотограмметрического массива;

$X_{МЛС} Y_{МЛС}$ – координаты точки массива МЛС.

Аналогично выполняется сравнение групп нераспознанных точек и точек растительности разнородных массивов, в результате чего удаляются точки этих групп фотограмметрического массива при том же условии (4.3).

Результатом описанных этапов является гибридная точечная ГПМ в виде интегрированного массива точек. Но так как позиция одних и тех же классов точек, полученных разными методами геодезической съемки, будет не совпадать на величину ошибки привязки одних данных к другим, требуется выполнить дополнительную фильтрацию по методу поиска нижних точек и снова распознать точки поверхности земли.

Также в интегрированном массиве вблизи с распознанными, полученными из АФС точками растительности может находиться ряд нераспознанных точек ЛС, перенос которых в класс растительности выполняется при условии

$$\sqrt{(X_{раст} - X_{нерасп})^2 + (Y_{раст} - Y_{нерасп})^2 + (Z_{раст} - Z_{нерасп})^2} \leq S \quad (4.4)$$

где $S = 30$ см – пороговое значение расстояния между нераспознанными точками и точками растительности;

$X_{раст} Y_{раст} Z_{раст}$ – координаты точки растительности;

$X_{нерасп} Y_{нерасп} Z_{нерасп}$ – координаты нераспознанной точки.

Далее выполняется распознавание точек стен зданий среди нераспознанных точек по плановому положению относительно точек их крыш по условию (4.3), где используются координаты точек этих классов.

Итогом описанных этапов является гибридная векторная точечная ГПМ, разбитая на классы: земля, растительность, крыши, стены, нераспознанные точки.

4.3.2 Исследования методики интеграции данных АФС и МЛС

Для исследования методики интеграции данных АФС и МЛС были выбраны материалы съемок системы Riegl VMX-250 и BVC Supercam S350, выполненных в 2020 г. – улицы Бориса Богаткова и Доватора г. Новосибирска (рисунок 4.6).

Обработка результатов МЛС выполнялась от базовой станции, расположенной на расстоянии 10,5 км от места съемки. Опорные точки не использовались.

BVC Supercam S350 был укомплектован ГНСС-приемниками и камерой Sony Alpha ILCE-6000 с объективом, имеющим фокусное расстояние 20 мм. Высота аэрофотосъемки составила 250 м. Это позволило получить аэрофотоснимки, имеющих размер пикселя 5 см. Каждые 500 м вдоль траектории полета использовались опорные точки. Обработка результатов АФС выполнялась в ПО Agisoft Metashape, взаимное ориентирование данных МЛС – в ПО RiProcess.

Для каждого вида данных была выполнена предварительная обработка, а затем – привязка. Привязка данных МЛС к результатам АФС требует подбора оптимального размера фрагментов, на которые, согласно описанной методике, делятся эти данные. С целью выбора размера фрагментов деление массивов ТЛО было выполнено трижды: на фрагменты протяженностью 50, 100 и 150 м. Для каждого набора данных была выполнена обработка по алгоритму привязки (рисунок 4.5).

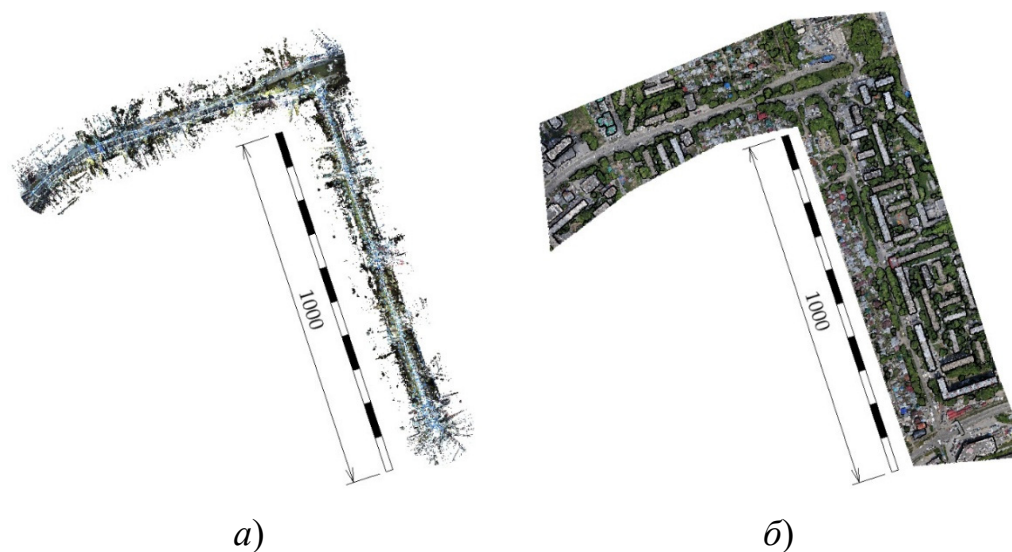


Рисунок 4.6 – Массив точек в истинных цветах: а) МЛС; б) БВС

Чтобы оценить точность привязки данных МЛС к АФС на основе трехмерного подхода на оси дороги и на углах зданий по фотограмметрическому массиву точек измерялись координаты контрольных точек. В таблице 4.1 приведены результаты оценки точности данных МЛС до выполнения привязки. Значительные значения ошибок обосновываются большим расстоянием участка съемки от базовой станции и низким качеством ГНСС-сигнала из-за наличия деревьев и зданий.

Таблица 4.1 – Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам до привязки

Вид ошибки	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,087	0,571	0,234
Средняя квадратическая ошибка	0,200	0,655	0,290
Максимальная ошибка	0,680	1,132	0,707

В таблице 4.2 показаны результаты оценки точности привязки данных МЛС к АФС при делении массива ТЛО на фрагменты. Точность привязки по высоте при меньшей протяженности фрагмента увеличивается, а в плане имеет более высокое значение для фрагментов протяженностью 100 м. Причина более высокой точности привязки в плане при применении фрагментов большей протяженностью является

повышение вероятности встретить большее количество вертикальных плоскостей объектов.

Таблица 4.2 – Оценка точности привязки данных МЛС

Вид ошибки	Протяженность фрагмента								
	50 м			100 м			150 м		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
Средняя	0,041	0,059	0,050	0,020	0,032	0,082	0,039	0,063	0,113
Средняя квадратическая	0,062	0,089	0,062	0,051	0,071	0,107	0,053	0,092	0,138
Максимальная	0,171	0,263	0,160	0,167	0,198	0,296	0,176	0,223	0,498

На рисунке 4.7 показано распределение ошибок по высоте, а на рисунке 4.8 – в плане. На рисунке 4.8, б отмечен участок территории с максимальной ошибкой, где точность данных МЛС при использовании фрагментов длиной 50 м оказалась ниже, чем при применении фрагментов длиной 150 м, что связано с попаданием дополнительного здания на фрагмент большей длины. Это здание позволило методу ИСР обнаружить большее число вертикальных плоскостей.

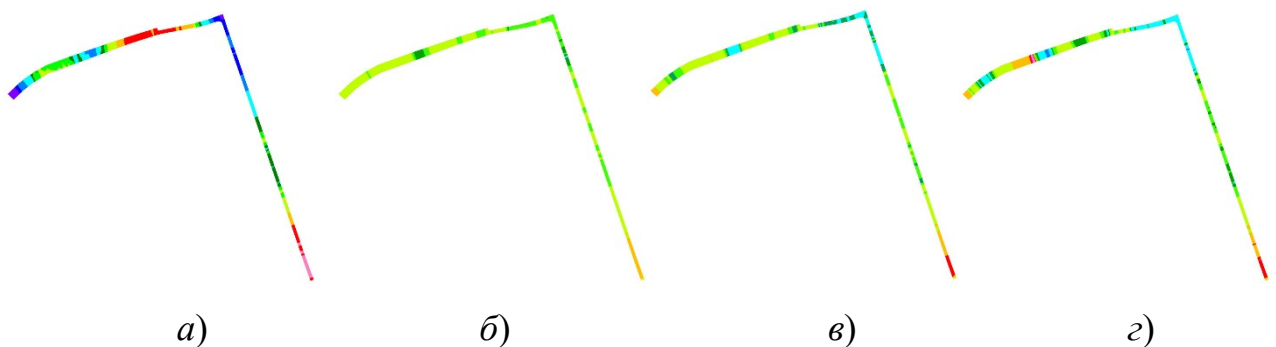


Рисунок 4.7 – Распределение ошибок данных МЛС по высоте:

а) до привязки к массиву точек БПЛА; б) после привязки по фрагментам протяженностью 50 м; в) после привязки по фрагментам протяженностью 100 м; з) после привязки по фрагментам протяженностью 150 м; ■ минус 0,50 – минус 0,30 м; ■ минус 0,30 – минус 0,15 м; ■ минус 0,15 – минус 0,05 м; ■ минус 0,05 – 0,05 м; ■ 0,05 – 0,10 м; ■ 0,10 – 0,15 м; ■ 0,15 – 0,30 м; ■ 0,30 – 0,45 м; ■ 0,45 – 0,60 м; ■ 0,60 – 0,72 м

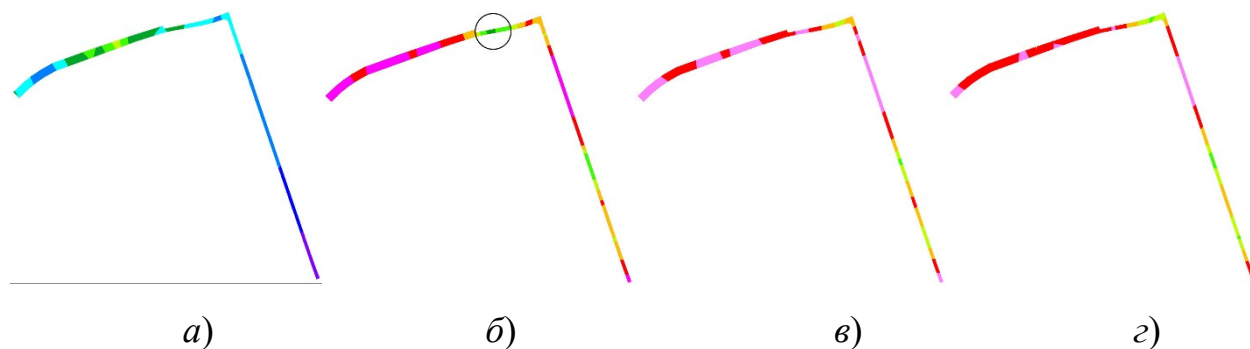


Рисунок 4.8 – Распределение ошибок данных МЛС в плане:

- а) до привязки к массиву точек БПЛА; б) после привязки по фрагментам протяженностью 50 м; в) после привязки по фрагментам протяженностью 100 м; з) после привязки по фрагментам протяженностью 150 м; ○ – участок территории с максимальной ошибкой после привязки; ■ 0,16 – 0,20 м; ■ 0,20 – 0,30 м; ■ 0,20 – 0,30 м; ■ 0,40 – 0,50 м; ■ 0,50 – 0,60 м; ■ 0,60 – 0,70 м; ■ 0,70 – 0,80 м; ■ 0,80 – 0,90 м; ■ 0,90 – 1,00 м; ■ 1,00 – 1,14 м

Результаты исследований показывают, что метод ИСР в рамках трехмерного подхода позволяет выполнить привязку данных МЛС и БВС, что является полезным для повышения точности данных МЛС в условиях городской застройки и при создании гибридной ГПМ. При выборе размера фрагмента следует учитывать то, что чрезмерное его уменьшение приводит к обратному эффекту – ухудшению точности в плане за счет отсутствия вертикальных плоскостей зданий и сооружений. Поэтому следует применять два варианта деления на фрагменты: меньшего размера для привязки по высоте и большего – для привязки в плане. Тогда вычисление и применение локальных поправок сначала выполняется для коррекции планового положения, а затем высотного.

После привязки сначала выполняется распознавание точек земли отдельно в каждом массиве данных. Рассмотрим некоторые результаты в ходе осуществления дальнейших этапов методики интеграции данных МЛС и АФС.

Применение индекса VBDVI позволяет распознать все точки растительности и тем самым снизить объем вычислений на следующем этапе, заключающегося в распознавании крыш зданий по неклассифицированным точкам. В результате ана-

лиза данных были подобраны оптимальные параметры метода распознавания точек крыш: минимальная площадь 40 м^2 , а допуск на отклонение от плоскости – 5 см.

Фильтрация по высоте позволила исключить неверно распознанные точки, относящиеся к объектам, расположенных около земли рядом со зданиями.

Цель следующих этапов интеграции – получение интегрированного массива данных, в котором точки фотограмметрического массива описывают участки объектов, где отсутствуют ТЛЮ. Поиск перекрывающихся разнородных массивов точек может быть выполнен в плане или по высоте с использованием формул (4.3) или (4.4) среди точек всех классов или определенных из них. Применение формулы (4.3) для поиска перекрытий в плане более предпочтительно. Но это приводит к удалению точек одного массива данных, расположенных под точками другого. На рисунке 4.9, *а* показан пример ситуации, где точки поверхности земли массива ТЛЮ расположены под точками фотограмметрического массива. При удалении точек в перекрытиях теряется информация о рельефе под деревом (рисунк 4.9, *б*).

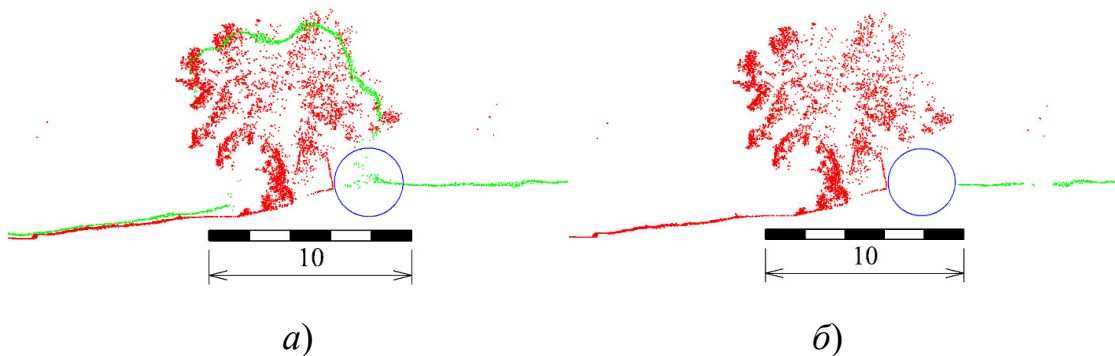
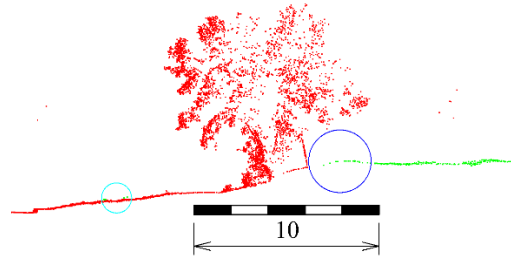


Рисунок 4.9 – Пример удаления точек в перекрытиях разнородных массивов при анализе только планового их положения: *а*) до удаления; *б*) после удаления;

■ – точки фотограмметрического массива; ■ – ТЛЮ; ○ – расположение анализируемой области под деревом

Чтобы сохранить информацию о рельефе, анализ перекрытий следует выполнять отдельно по распознанным точкам поверхности земли. Отдельно выпол-

ненный анализ перекрытий по точкам поверхности земли позволил сохранить всю полезную информацию (рисунок 4.10).



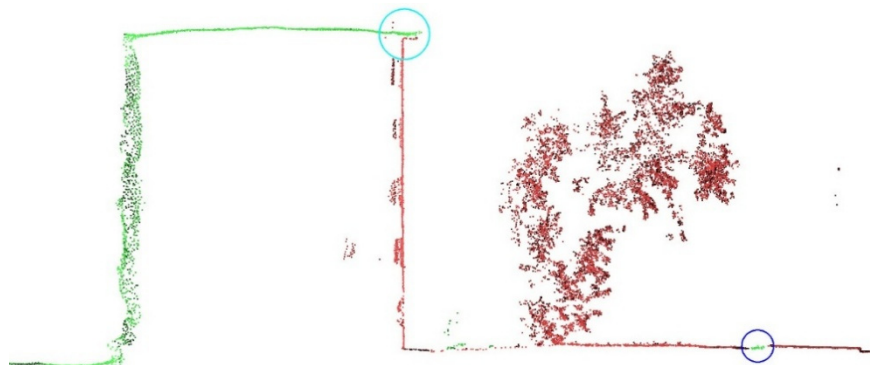
■ – точки фотограмметрического массива; ■ – ТЛЮ;

○ – расположение анализируемой области под деревом

Рисунок 4.10 – Результат удаления точек в перекрытиях

Еще один пример интегрированного массива точек показан на рисунке 4.11, где отображено поперечное сечение здания. Анализ перекрытий по точкам различных классов позволил сохранить геометрическую форму карниза здания и заполнить промежутки в массиве ТЛЮ точками фотограмметрического массива.

Далее выполняется фильтрация гибридного массива точек. Поверхность земли, построенная по фотограмметрическому массиву точек, может не совпадать с поверхностью, построенной по массиву ТЛЮ. Удалить группы ошибочных точек помогает метод поиска нижних точек.



■ – точки фотограмметрического массива; ■ – ТЛЮ; ○ – расположение точек поверхности земли фотограмметрического массива; ○ – точки карниза здания;

Рисунок 4.11 – Поперечное сечение здания по точкам интегрированного массива

На рисунке 4.12 с видом сверху показаны результаты создания векторной ГПМ без удаления точек в зонах перекрытия и с удалением.

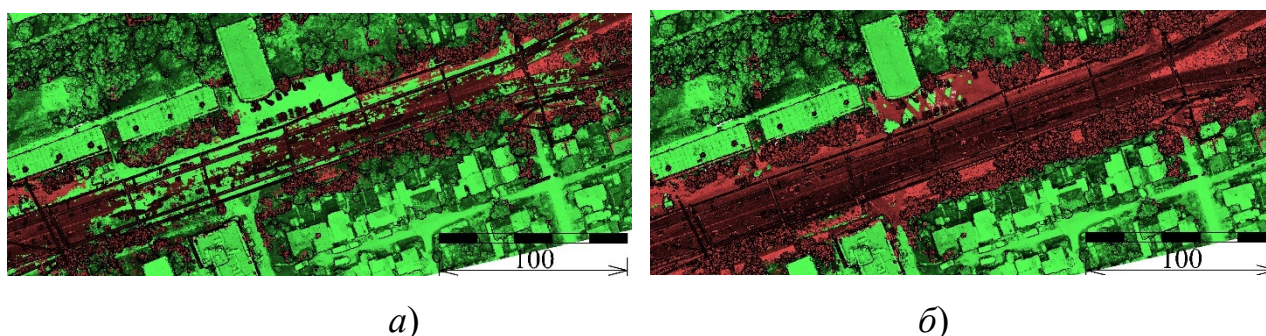


Рисунок 4.12 – Результаты создания векторной ГПМ в виде интегрированного массива точек: *а)* без удаления точек в зонах перекрытия; *б)* с удалением точек в зонах перекрытия; ■ – точки фотограмметрического массива; ■ – ТЛО

Последние этапы методики относятся к дальнейшей классификации данных, которая позволяет упростить решение задачи создания твердотельных ЦММ.

Таким образом, разработанная методика интеграции данных АФС и МЛС позволила извлечь необходимую информацию и удалить лишнюю, предварительно повысив точность данных МЛС до точности АФС в условиях городской застройки.

4.4 Создание геопространственных моделей объектов в результате интеграции данных ВЛС и НЛС

4.4.1 Методика интеграции данных ВЛС и НЛС

Совместное применение методов ВЛС и НЛС является одним из вариантов интеграции однородных данных ДЗЗ, когда в качестве основного источника получения информации о местности используется ВЛС, а НЛС его дополняет, позволяя получить более точную информацию об отдельных интересующих вертикальных плоскостях зданий и сооружений и невидимых с воздуха объектов. В соответствии с принципом преемственности основой разработки методики интеграции данных ВЛС и НЛС послужила методика, описанная в 4.3 для данных АФС и МЛС [270].

Основные изменения содержатся на этапе привязки, а также этапах распознавания точек земли и растительности в интегрированном массиве (рисунок 4.13) [10].

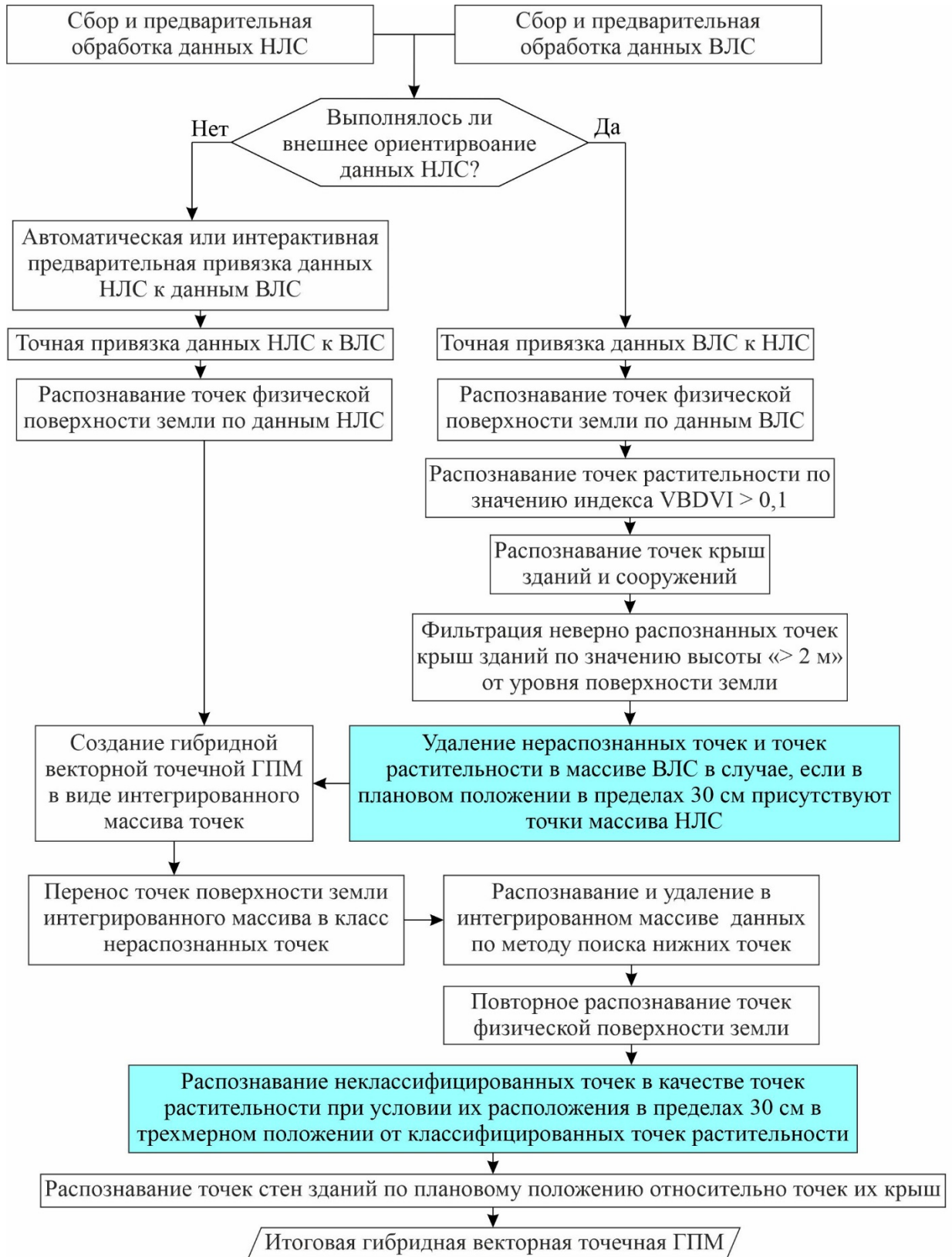


Рисунок 4.13 – Методика интеграции данных ВЛС и НЛС

До объединения массивов ТЛЮ, полученных различными методами ЛС, в единую точечную модель необходимо выполнить их предварительную обработку по методикам, представленным в 3.3 и 3.4. При привязке данных НЛС и ВЛС в качестве фиксированного следует выбрать тот массив данных, который обладает более высокой внешней точностью. Таким будет массив НЛС, если на этапе предварительной обработки выполнялось его внешнее ориентирование по маркам. В противном случае к массиву ВЛС привязывается массив НЛС.

Привязка данных НЛС к ВЛС может быть выполнена в две стадии, описанных в 2.6.3. На первой стадии проводится предварительная привязка, а на второй – точная с помощью одного из автоматических методов. Первая стадия выполняется, если ЭВнешО хотя бы одного из массивов данных неизвестны, а вторая – для их уточнения, если они известны или рассчитаны приближенно. В случае известных ЭВнешО массива НЛС достаточно применить только метод точной привязки.

Далее выполняется независимое распознавание точек земли в массивах ВЛС и НЛС. Затем в массиве ВЛС выполняется распознавание точек растительности и крыш зданий. Для распознавания точек растительности также, как и в методике привязки данных АФС и МЛС, применяется индекс VBDVI. Это повышает точность распознавания крыш зданий, когда к ним примыкают кроны деревьев. Для устранения ошибок такого распознавания применяется фильтрация по значению высоты, не превышающему двух метров от уровня поверхности земли.

На следующем этапе массивы ВЛС и НЛС сравниваются по классу нераспознанных точек и точек растительности по аналогичному (4.3) условию. Точка ВЛС удаляется, если расстояния от нее до ближайшей точки НЛС не превышает задаваемого пользователем порогового значения.

По сравнению с методикой интеграции данных МЛС и АФС, в этой методике пропущен похожий этап удаления точек земли одного массива данных в случае, если в плановом положении в пределах 30 см отсутствуют точки поверхности земли другого массива. Это связано с тем, что оба метода относятся к ЛС, которое

обеспечивает точное построение ЦМР благодаря проникновению лазерного луча сквозь слой растительности.

Следующей задачей интеграции данных ВЛС и НЛС является повторное распознавание точек земли по интегрированному массиву после переноса классифицированных по различным массивам точек в класс нераспознанных, что необходимо из-за возможных отличий в высотном положении точек земли различных массивов в зонах перекрытия. Перед повторным распознаванием точек земли выполняется фильтрация нижних точек по аналогии с первым этапом методики.

Интегрированный массив ТЛО включает точки растительности, распознанные по массиву ВЛС среди нераспознанных точек этого же класса, полученных методом НЛС. Чтобы назначать точкам НЛС, расположенным рядом с точками растительности массива ВЛС, такой же класс рассчитываются пространственные расстояния между точками по формуле, аналогичной (4.4).

Для распознавания точек стен зданий среди нераспознанных ранее точек выполняется сравнение их расстояния до точек крыш по плановому положению согласно формуле (4.3). В итоге получается гибридная векторная точечная ГПМ, где выполнено распознавание отдельных классов объектов.

4.4.2 Исследования методики интеграции данных ВЛС и НЛС

Исследования методики интеграции данных ВЛС и НЛС были проведены на примере результатов серии съемок территории студенческого городка СГУГиТ.

НЛС выполнялось в сентябре 2020 г. с помощью лазерного сканера ScanStation 2 с применением марок, что позволило автоматически выполнить взаимное ориентирование сканов с СКО 2 мм. Привязка полученного массива к внешней системе координат не выполнялась.

ВЛС было выполнено с БВС Геоскан 401, на который устанавливался лазерный сканер АГС-МС3. Съемка осуществлялась в октябре 2021 года. В состав системы ВЛС входила камера Sony Alpha ILCE-6000 с объективом 20 мм. Определение координат точек фотографирования и траектории полета выполнялось с помо-

щью установленного на борту ГНСС-приемника. Наземные опознаки не закладывались. Для получения высокоплотного массива ТЛО с высокой точностью расчета пространственных координат при формировании полетного задания задавалось большое поперечное перекрытие, более 80%, при высоте полета 125 м. Размер пикселя полученных фотографий составил 2,5 см. Расчет точных координат траектории выполнялся от базовой станции, установленной на крыше лабораторного корпуса СГУГиТ. Результатом предварительной обработки стал уравненный, отфильтрованный от ложных измерений массив ТЛО (рисунок 4.14).

Так как внешнее ориентирование массива НЛС предварительно не выполнялось, то осуществлялась его предварительная автоматическая привязка в ПО X-PAD Office Fusion, а затем точная с помощью метода ICP [16].

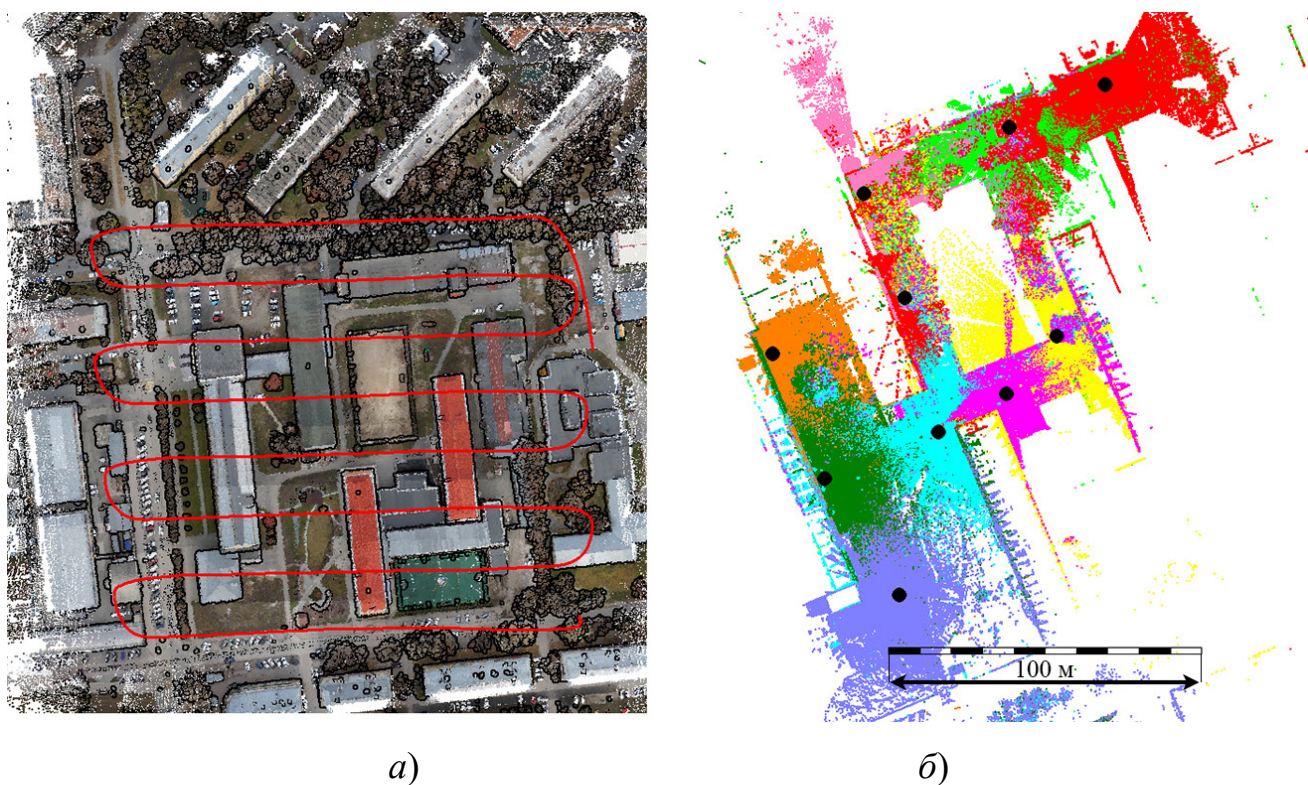
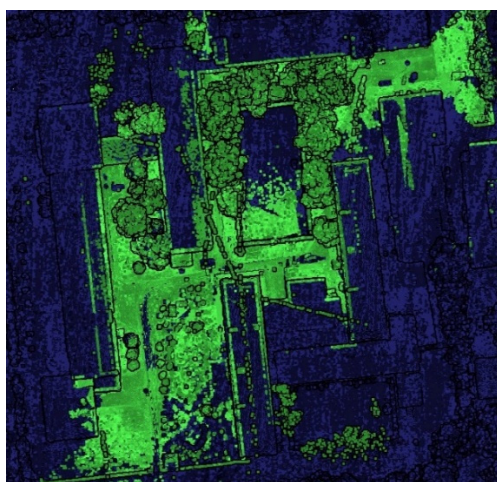


Рисунок 4.14 – Результат предварительной обработки данных:

а) ВЛС; *б)* НЛС; — траектория ВЛС;

— ТЛО отдельных сканов; ● – сканпозиции

Результат автоматической привязки данных ЛС различных видов показан на рисунке 4.15. Оценка точности по высоте была выполнена по асфальтовому покрытию, а в плане – по углам зданий и сооружений (таблица 4.3). Точность привязки по высоте оказалась в пределах заявленных технических характеристик воздушного лазерного сканера АГС-МСЗ, а в плане получилась ниже, что можно связать с особенностями выполненной предварительной обработки данных ВЛС из-за сильно различающихся углов падения лазерного луча на стены зданий.



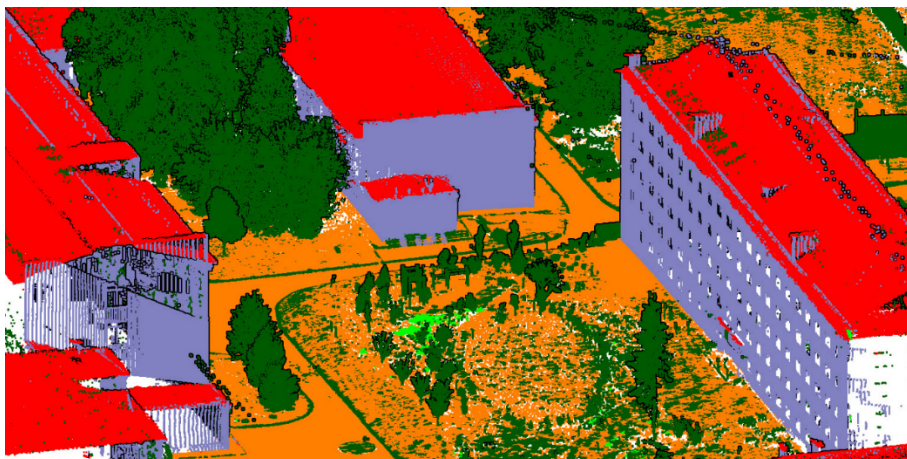
■ – данные ВЛС; ■ – данные НЛС

Рисунок 4.15 – Результат автоматической привязки данных НЛС к данным ВЛС

Таблица 4.3 – Оценка точности привязки данных НЛС и ВЛС

Вид ошибки	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,068	0,073	0,020
Средняя квадратическая ошибка	0,103	0,124	0,054
Максимальная ошибка	0,228	0,281	0,150

Фрагмент итогового результата классификации интегрированного массива ТЛО показан на рисунке 4.16. По плановому положению точек крыш зданий, полученных из ВЛС, были выделены их стены, точки которых представляют данные НЛС. Полученный результат интеграции для территории студенческого городка свидетельствует о работоспособности предложенной методики, разработанной в результате усовершенствования методики интеграции данных МЛС и АФС. Была учтена специфика выполнения измерений с помощью методов НЛС и ВЛС.



■ – крыши зданий; ■ – растительность; ■ – неклассифицированные точки;
■ – земля; ■ – стены зданий

Рисунок 4.16 – Результаты создания векторной ГПМ в виде интегрированного классифицированного массива точек

Таким образом, разработанная методика интеграции данных НЛС и ВЛС позволяет автоматически выполнить привязку однородных данных ДЗЗ, полученных различными методами, и проанализировать области их перекрытия для формирования итоговой гибридной векторной точечной ГПМ без теневых зон и двойных контуров объектов. Дальнейшее усовершенствование методики заключается в учете временного фактора – интервала между съемками. Аналогично возможно усовершенствовать все другие предложенные в диссертации методики интеграции.

4.5 Построение ортофотопланов и цифровых моделей рельефа по данным АФС и МЛС

4.5.1 Методика построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа по данным АФС и МЛС

Ортофотоплан является растровой моделью, которая может быть получена с применением нескольких методов. Основным источником данных является метод АФС, а другие методы применяются для повышения точности ортофотоплана.

Повышение точности построения ортофотоплана может быть выполнено путем построения более точной ЦМР и применения большего количества опознаков. Обычно в качестве источника данных для построения такой ЦМР применяют массив ТЛО, полученный методом ВЛС.

В свою очередь, источником построения ЦМР могут быть методы МЛС и НЛС. Вблизи с точкой или траекторией съемки они обеспечивают получение точной информации о рельефе в зонах с растительностью. В свою очередь, АФС предоставляет информацию о рельефе в теневых для данных МЛС зонах. В качестве источника данных для построения точной ЦМР становится оптимальным использовать точки земли, распознанные по гибридной векторной ГПМ, созданной по описанной в 4.3 методике. На незастроенных территориях привязка позволяет повысить точность измерения координат по ортофотоплану – МЛС будет являться источником опорных точек для привязки данных АФС. Полученный ортофотоплан будет являться формой растровой гибридной ГПМ. На рисунке 4.17 приведена методика построения ортофотоплана по данным АФС и МЛС.

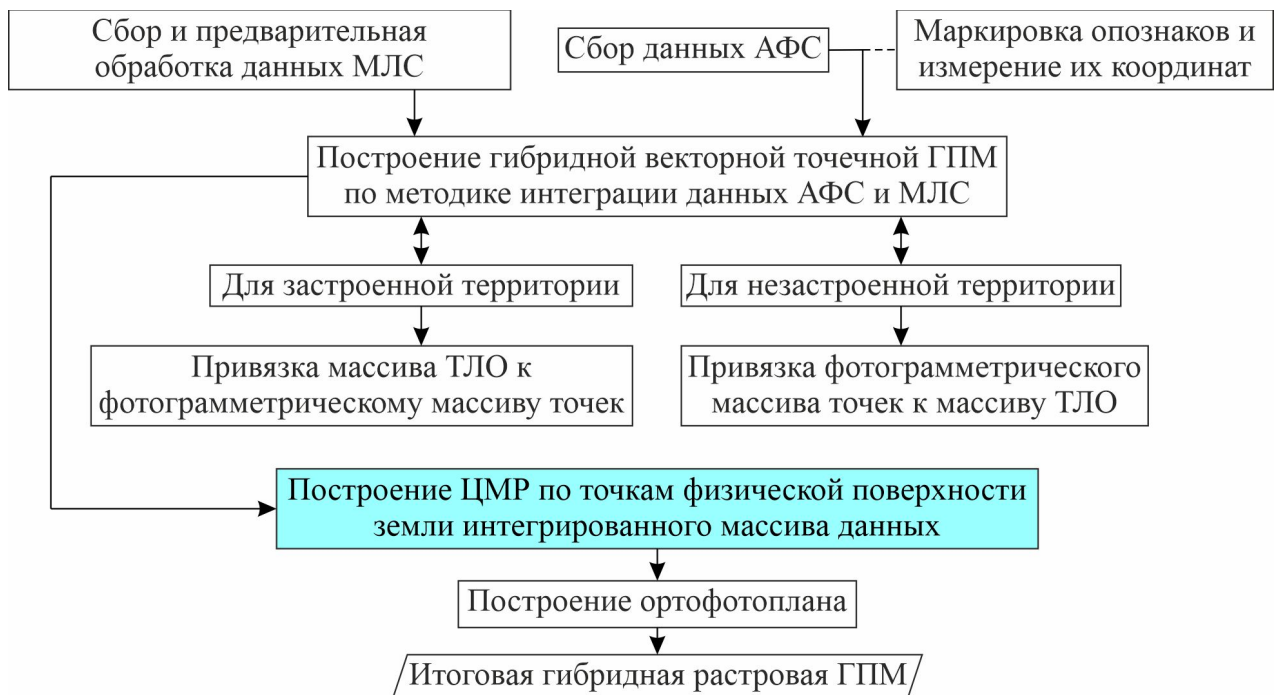


Рисунок 4.17 – Методика построения ортофотопланов и ЦМР по данным АФС и МЛС

4.5.2 Исследование точности построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа по данным АФС и МЛС для незастроенных территорий

Исследование было проведено на основе данных АФС, предоставленных компанией ООО «Беспилотные технологии», и МЛС, полученных в результате съемки СГУГиТ совместно с ООО «ЦТТ». Территорией съемки послужил участок Советского шоссе Новосибирской области протяженностью 4 800 м [133, 303].

Задачами исследования стали следующие:

- определение оптимальных параметров АФС и расстояние между опорными точками для построения ЦМР и ортофотопланов;
- оценка возможности применения данных МЛС для привязки результатов АФС на незастроенных территориях;
- оценка точности построения ортофотопланов и ЦМР в форме ГПМ.

АФС выполнялась в 3 полета с помощью БВС Supercam S250 с высоты 150, 200 и 250 м соответственно. Продольное перекрытие составило 80%, а поперечное – 60%. На борту были размещены ГНСС-приемник и камера Sony Alpha ILCE-6000.

МЛС исследуемого участка выполнялось системой Riegl VMX-250.

Для каждого из трех полетов было построено пять фотограмметрических моделей с различными наборами исходных данных для планово-высотной привязки результатов АФС (таблица 4.4). Координаты опознаков измерялись с помощью ГНСС-приемников.

Таблица 4.4 – Наборы исходных данных для построения фотограмметрических моделей

Доступность координат центров фотографирования	Количество опорных точек	Расстояние между парами опорных точек, м
Да	30	250
Да	16	500
Да	12	1000
Да	6	2300
Да	0	0

Таблица 4.5 – Оценка точности взаимного ориентирования данных МЛС

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,002	0,002	0,002
Средняя квадратическая ошибка	0,006	0,007	0,003
Максимальная ошибка	0,037	0,041	0,028

Для оценки абсолютной точности данных МЛС с помощью ГНСС-приемников были измерены координаты семи равномерно размещенных в пределах съёмочного участка контрольных точек, располагающихся на углах бордюров и дорожной разметки (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам

Вид ошибки	Контрольные точки		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,009	0,030	0,029
Средняя квадратическая ошибка	0,021	0,053	0,034
Максимальная ошибка	0,044	0,131	0,051

Сравнивая результаты оценки точности данных МЛС по контрольным точкам с точностью построения фотограмметрических моделей, можно сделать вывод, что точность метода МЛС на незастроенных территориях близка к точности АФС при выполнении полета на высоте 200 м и применении небольшого числа опорных точек. Без применения опорных точек точность метода МЛС превосходит точность АФС. Это свидетельствует о выборе метода МЛС в качестве основного при взаимном ориентировании его данных и данных АФС. Для того, чтобы данные МЛС можно было бы полностью использовать в качестве источника опорных и контрольных точек для привязки данных АФС, чтобы они удовлетворяли требованиям п 6.2.6 ГОСТ Р 58854 [65] по средней погрешности определения положения центров опознаков относительно базовых станций, требуется меньшее число опорных точек, измеренных с помощью наземных ГНСС-приемников.

Для дополнительного исследования точности ортофотоплана использовались точки, расположенные на четких контурах объектов местности. Выполнялось сравнение координат точек, измеренных на ортофотоплане с координатами соответствующих на данных МЛС точек. Всего было использовано 100 точек (таблица 4.7)

Таблица 4.7 – Оценка точности положения точек ортофотоплана

Вид ошибки	Соответственные точки	
	X, м	Y, м
Средняя ошибка	0,047	0,074
Средняя квадратическая ошибка	0,068	0,095
Максимальная ошибка	0,214	0,226

Оценка точности данных АФС по высоте выполнялась по фотограмметрическому массиву точек в области твердого покрытия дороги. Строились сечения через каждые 100 м и измерялось по три точки. Измерение координат контрольных точек на дорожном покрытии позволяет с более высокой достоверностью оценить точность данных МЛС и АФС. Это утверждение подтверждается статистической информацией, представленной в таблице 4.8, рассчитанной по сечениям глубиной 1 м, примеры которых показаны на рисунках 4.19 и 4.20.

Таблица 4.8 – Статистическая информация по высотным отметкам точек

Тип объекта	Минимальная отметка, м	Максимальная отметка, м	Средняя отметка, м	Среднее квадратическое отклонение, м
Дорога, МЛС	127,684	127,708	127,692	0,004
Трава, МЛС	125,587	127,028	125,968	0,28
Дорога, БВС	127,58	127,7	127,641	0,027
Трава, БВС	125,26	125,44	125,33	0,044

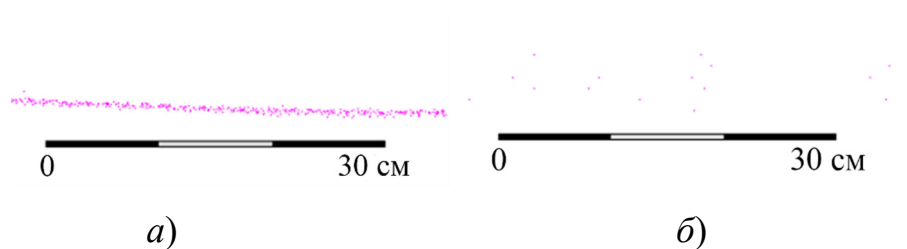


Рисунок 4.19 – Сечение участка дорожного полотна: а) МЛС; б) БВС

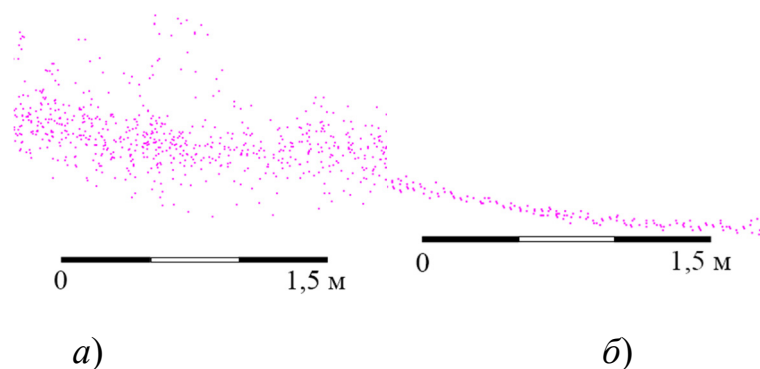


Рисунок 4.20 – Сечение участка травы: а) МЛС; б) БВС

Дорожное покрытие имеет наименьшее среднее квадратическое отклонение. Средние отметки сечений дорожного покрытия близки друг к другу для разнородных массивов точек. Для травы значения отметок различаются сильнее. В таблице 4.9 приведена оценка точности данных АФС по высоте по точкам дорожного полотна.

Таблица 4.9 – Оценка точности данных АФС по высоте по дорожному полотну

Вид ошибки	Z, м
Средняя ошибка	0,048
Средняя квадратическая ошибка	0,082
Максимальная ошибка	0,384

На основе результатов оценки точности по высоте можно сделать вывод, что по твердому покрытию фотограмметрическая модель соответствует требованиям топографической съемки с высотой сечения рельефа 50 см. При топографической съемке участков растительности точность снижается по сравнению с методом МЛС. Интеграция данных МЛС и АФС позволяет использовать преимущества обоих методов с возможностью обеспечения точность топографической съемки масштаба 1: 500 с высотой сечения рельефа 50 см и лучше для любых территорий.

4.6 Выводы по четвертому разделу

Все представленные методики интеграции данных ДЗЗ основаны на разрабо-

танной методологии и включены в технологию геопространственного моделирования. Итогом каждой методики являются гибридные точечные ПИМ и ГПМ, позволяющие создать цифровую продукцию на территорию ТИ и решить отдельные задачи этой сферы. С создания гибридных ПИМ и ГПМ начинается последний этап технологии геопространственного моделирования – тематическая обработка.

В рамках такой системы были разработаны методики интеграции между следующими видами данных: НФС и МЛС, АФС и МЛС, ВЛС и НЛС. Получаемые по этим методикам гибридные ПИМ и ГПМ представляются в виде трехмерных векторных или растровых моделей и согласуются со всеми методологическими принципами интеграции данных ДЗЗ.

Все методики интеграции были апробированы по данным геодезических съемок различных ОТИ г. Новосибирска. Для построения трехмерной точечной ГПМ расположенного вдоль городской автомобильной дороги здания была выполнена интеграция данных НФС и МЛС. Средняя ошибка построения этой модели составила 4,2 см. Для построения точечной ГПМ объектов дорожной сети вдоль улиц Бориса Богаткова и Доватора применялась методика интеграции данных АФС и МЛС. По результатам исследований было построено несколько моделей, средняя ошибка наиболее точной из которых составила 5 см. Для исследования методики интеграции данных ВЛС и МЛС применялись результаты съемки территории студенческого городка СГУГиТ, включающие дорожную сеть и несколько зданий. Построенная ГПМ была получена со средней ошибкой 7 см. Для построения растровой ГПМ была применена методика построения ортофотопланов и ЦМР по данным АФС и МЛС Советского шоссе Новосибирской области. Средняя ошибка создания ортофотоплана составила 7 см, а ЦМР – 5 см.

Таким образом, все выполненные исследования показали высокую точность автоматизированной привязки и распознавания различных наборов данных – создания трехмерных точечных гибридных ГПМ.

5 ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДИК СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СФЕРЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

5.1 Создание векторных трехмерных геопространственных моделей объектов

5.1.1 Влияние выбора геодезического оборудования на точность построения трехмерных векторных геопространственных моделей

В соответствии с представленной в 2.5 технологией геопространственного моделирования по данным ДЗЗ векторные трехмерные модели могут быть описаны различными видами ГПМ, которые могут в дальнейшем применяться для создания различной цифровой продукции, такой как обмерные чертежи объектов. Создание ГПМ в виде геометрических примитивов, твердых тел и поверхностей может быть выполнено на основе отдельных ПИМ, сформированных с помощью методик, описанных в разделе 3, или на основе точечных ГПМ, примеры формирования которых описаны в разделе 4. Данные ДЗЗ, полученные с целью последующего моделирования, должны удовлетворять требованиям детальности и точности. Для этого необходимо учитывать все факторы, указанные в 3.1, в соответствии с принципом оптимальности выбирать подходящий метод съемки и принимать решение о выборе оптимальных моделей геодезического оборудования. Для этого следует выполнять исследования точности измерений с целью формирования рекомендаций по применению выбранного оборудования [39].

Рассмотрим влияние выбора геодезического оборудования на точность построения трехмерных векторных ГПМ, используемых для создания обмерных чертежей фасадов зданий, на примере метода НЛС [191, 259, 261].

Чтобы по данным НЛС выполнять построение трехмерных векторных ГПМ и обмерных чертежей с максимально возможной точностью и детальностью, следует руководствоваться представленной в 3.4.1 технологической схемой. Учитывая тех-

нические характеристики выбранного оборудования, необходимо выполнять проектирование расположения сканерных позиций, выбирать оптимальные параметры сканирования, такие как шаг сканирования и угол поля зрения, с целью получения массива ТЛО необходимой минимальной плотности, рассчитываемой по формуле (2.59) [13]. Подробные исследования, касающиеся проектирования расположения сканерных позиций для создания обмерных чертежей, приведены в [191].

Одна из важнейших характеристик, которую необходимо учитывать при выборе оптимальных моделей лазерных сканеров, является расходимость лазерного луча [265]. В [33] продемонстрировано исследование того, как влияет значение расходимости на точность положения объектов.

В соответствии с [115] для создания обмерных чертежей фасадов зданий подходят лазерные сканеры, по чьим данным можно построить ГПМ с точностью не ниже 5 мм. Для собственного исследования влияния характеристик лазерных сканеров на точность построения трехмерных векторных ГПМ с учетом определения оптимального расположения сканерных позиций был выбран Leica ScanStation 2, рекомендованный в [115], и Geomax Zoom 300. Leica ScanStation 2 позволяет выполнять съемку объектов местности, расположенных на расстоянии 50 м от точки съемки, с точностью 4 мм. С учетом низкого значения расходимости лазерного луча, равного 0,15 мрад, данные этого сканера позволяют строить обмерные чертежи масштаба 1: 50.

С помощью этих двух моделей лазерных сканеров выполнялась съемка территории студенческого городка СГУГиТ (рисунок 5.1). Съемка с помощью ScanStation 2 выполнялась с линейным шагом 10 см по горизонтали и 3 см по вертикали для объектов, расположенных на расстоянии 50 м от станции сканирования. Массив ТЛО сканера Zoom 300 были получен при значении линейного шага 3,9 см как по горизонтали, так и по вертикали.

Для взаимного ориентирования сканов, полученных с помощью ScanStation 2, применялись расположенные в зонах перекрытия марки. СКО взаимного ориентирования сканов составила 2 мм в плане и 1 мм по высоте. Взаимное ориентирование

сканов, полученных с помощью Zoom 300, было выполнено автоматически с помощью ПО X-RAD Office fusion по результату анализа зон перекрытия. Для внешнего ориентирования массивов ТЛО обоих сканеров была выполнена съемка тахеометром Leica TM30.

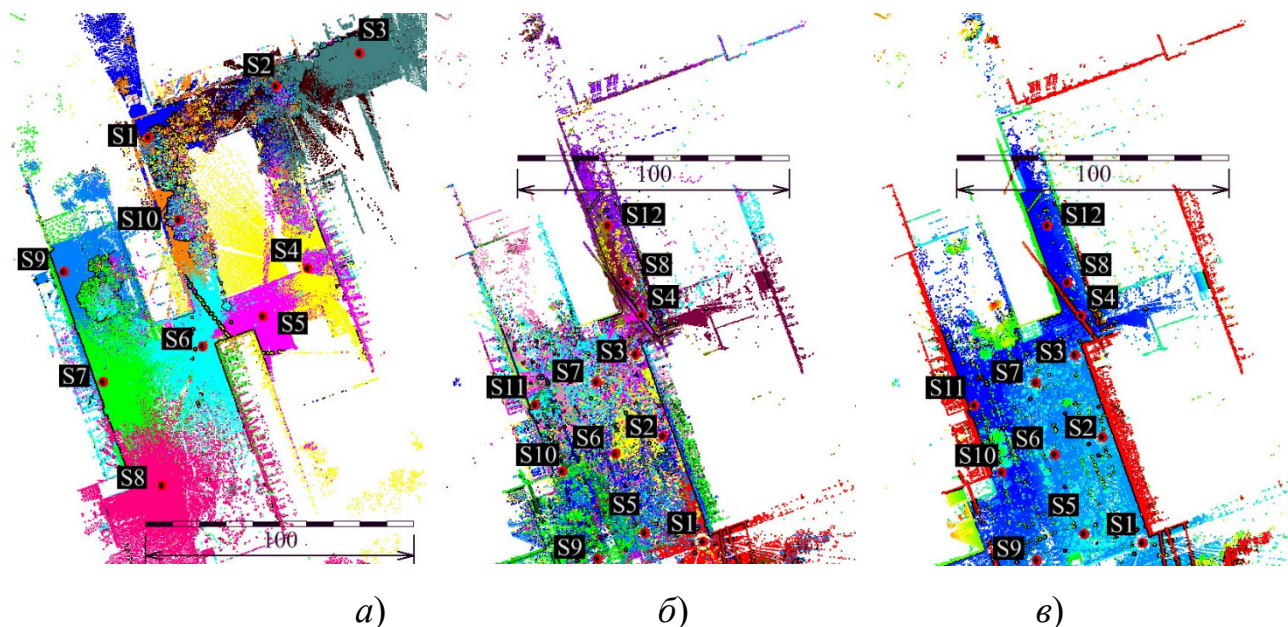



Рисунок 5.1 – Данные НЛС с видом сверху сканером: *а)* ScanStation 2 с отображением сканерных позиций по цветам; *б)* Zoom 300 с отображением сканерных позиций по цветам; *в)* Zoom 300 с отображением по высоте; ● – станции сканирования;  – градация по высоте 98,3–101,9–105,5–109,2–112,8 м

За счет более высокой плотности точек сканера Zoom 300 при одинаковом времени сбора данных теоретически выполнить создание обмерных чертежей можно с большей детализацией, чем по данным ScanStation 2. Так как лазерный сканер Zoom 300 ограничен углом поля зрения 65° по вертикали, то два верхних этажа здания, имеющего высоту 16 м, оказывались не отсканированы с ближайшей расположенной на удалении 4 м позиции. С учетом того, что высота установки сканера обычно превышает 1 м, то в целях полного покрытия этого здания массивом ТЛО по высоте минимальное расстояние станции сканирования от него должно быть 7

м, либо съемку необходимо выполнять при наклонном положении сканера, что приводит к необходимости горизонтирования массива ТЛО при камеральной обработке.

Для того чтобы определить оптимальное расположение сканерных позиций в целях создания обмерных чертежей фасадов зданий рассмотрим несколько примеров сечений глубиной 5 см, перпендикулярных его плоскости (рисунок 5.2), при отображении ТЛО только с определенных позиций. Для массива ТЛО Zoom 300 наружная часть откоса отображается только с ближайших к зданию позиций (рисунок 5.5, в), что свидетельствует о невозможности создать обмерный чертеж как минимум точнее 3 см по ТЛО сканерных позиций, расположенных на расстоянии 23 м от здания и дальше.

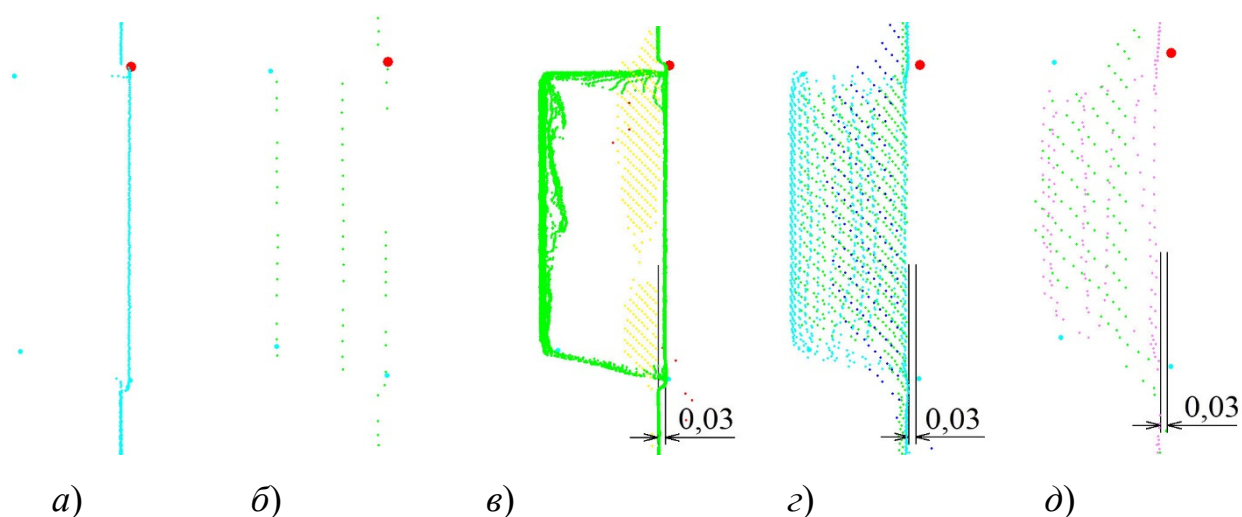


Рисунок 5.2 – Сечения массива ТЛО по откосу левого окна первого этажа здания:
 а) ТЛО ScanStation 2 с позиции S6, расположенной на расстоянии 6,5 м от окна;
 б) ТЛО ScanStation 2 с позиции S7, расположенной на расстоянии 45 м от окна;
 в) ТЛО Zoom 300 с позиций S1–S3, расположенных на расстоянии 4 м от здания;
 г) ТЛО Zoom 300 с позиций S5–S7, расположенных на расстоянии 23 м от здания;
 д) ТЛО Zoom 300 с позиций S9–S11, расположенных на расстоянии 45 м от здания

Причинами ошибок данных Zoom 300 может быть характер текстуры сканируемой поверхности фасада здания, высокий угол расходимости лазерного луча, его острые углы падения на плоскость фасада, наличие отдельных небольших элементов на пути распространения лазерного луча.

Более подробный анализ выполненных автором исследований и дополнительные эксперименты представлены в [21]. Они включают расчет истинного значения расходимости для сканера Zoom 300, которое было получено в диапазоне 1,6–5,3 мрад, что не соответствует заявленному производителем значению в 0,37 мрад.

На основе выполненного анализа качества данных можно сформулировать ряд рекомендаций по применению лазерного сканера Zoom 300:

- избегать сканирования элементов фасада здания под острыми углами. Для этого не следует выполнять установку лазерного сканера на таком близком расстоянии от здания, как это было сделано на позициях S1–S4;
- избегать сканирования элементов фасада здания с большого расстояния, как с позиций S5–S8, так как в этом случае не отобразятся многие элементы фасада;
- искусственно ограничивать дальность действия лазерного сканера расстоянием, равным длине лазерного луча от сканерной позиции до верха фасада;
- не превышать расстояния в 20 м между сканерными позициями;
- выполнять фильтрацию полученных ТЛО по их плотности.

В результате анализа форм элементов фасада рассматриваемого здания был определен диапазон оптимальных расстояний между сканерной позицией и зданием – от 7 до 10 м. С учетом рекомендуемого расстояния между сканерными позициями в 20 м можно получить массив ТЛО, позволяющий выполнять создание обмерного чертежа с максимально возможной для лазерного сканера Zoom 300 точностью и детальностью. В этом случае следует выбирать масштаб чертежа 1: 200.

Таким образом, анализ точности и качества данных лазерных сканеров Zoom 300 и ScanStation 2 показывает, что при создании трехмерных векторных ГПМ необходимо тщательно подходить к вопросу проектирования мест расположения сканерных позиций и обработке полученных результатов съемки.

5.1.2 Совершенствование технологической схемы создания трехмерных векторных геопространственных моделей объектов

Существуют различные методики трехмерного моделирования, каждая из которых основана на применении определенного ПО, относящегося к одной из трех групп:

- специализированное ПО обработки данных ДЗЗ с инструментами трехмерного моделирования;
- система автоматизированного проектирования (САПР);
- ПО информационного моделирования (BIM).

В наиболее общем виде методика трехмерного моделирования представлена в [98] в рамках технологической схемы построения трехмерных моделей местности, создания цифровых топографических планов по данным ЛС. Эта методика может быть усовершенствована посредством учета факта появления большего количества автоматизированных инструментов и использования BIM.

Специализированное ПО в первую очередь нацелено на выполнения этапов полевого сбора и предварительной обработки данных, итогом выполнения которых являются ПИМ. Одним из таких ПО является Cyclone, методики трехмерного моделирования в котором описаны в [13, 20, 27, 29, 95]. В состав трехмерной ГПМ также включают ЦМР, которая создается интерактивно по сечениям [27].

САПР прежде всего представляют собой системы, позволяющие автоматизировать ряд расчетов при проектировании. Например, для автомобильных дорог введен такой вид систем, получивших название САПР АД [36, 159]. Наиболее востребованным САПР являются Autodesk AutoCAD, NanoCAD, Bentley Microstation, Model Studio CS, КОМПАС-3D и др. К BIM относятся такие системы как ArchiCAD, Autodesk Revit, Tekla Structures, Allplan, Renga Architecture, MagiCAD, nanoCAD Инженерный BIM и др.

САПР позволяют выполнять трехмерное твердотельное моделирование по любым массивам точек, оформлять созданные модели посредством размещения тек-

стовой информации, подготавливать автоматизированным способом чертежи на основе трехмерной модели, осуществлять проектные работы с целью реконструкции объекта, формировать всю необходимую рабочую и проектную документацию.

Эволюцией САПР являются BIM [14, 148]. В современных BIM произошел перенос акцента с технического проектирования объекта на комплексное управление изменяющегося объекта в ходе всего его жизненного цикла. BIM модели в дальнейшем используются для создания цифровых двойников реальных объектов. Такой процесс создания цифровых двойников основан на имитационном моделировании [136, 158]. В настоящее время BIM обобщаются до различных инфраструктурных объектов, в сфере ТИ до проектирования автомобильных и железных дорог, мостов, тоннелей. Для автомобильных дорог применяется термин ИМД (информационное моделирование дорог) [159].

Для того чтобы выполнить трехмерное моделирование в BIM, массивы точек конвертируются в формат соответствующего ПО информационного моделирования. В отличие от САПР в BIM для всех объектов применяется набор ограничивающих критериев при вписывании, связанных с правилами проектирования, когда как для САПР такие критерии применяются в отношении только отдельных объектов [14].

Для автоматизации процесса трехмерного моделирования в BIM и САПР могут применяться дополнительные программные модули, включающие автоматические инструменты распознавания точек. Для САПР AutoCAD и Microstation, а также для BIM Revit разработан коммерческий программный модуль Leica Cloudworx. Например, в [196] описан подобный модуль, разработанный на базе ПО Microstation, и позволяющий выполнить автоматическое вписывание трехмерных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта в массив ТЛО на основе предварительно созданной библиотеки элементов.

Результат трехмерного моделирования может быть импортирован в BIM из специализированного ПО обработки данных ДЗЗ и САПР. Но в этом случае невозможно корректное распознавание всех трехмерных объектов в формате BIM, а от-

дельные из импортированных объектов не передаются совсем. Полученный результат импорта используется в качестве ориентировочного для полноценного моделирования в BIM с учетом всех требований, предъявляемых к трехмерной модели.

Таким образом, трехмерная векторная ГПМ в BIM получается тремя способами:

- интерактивное моделирование по массиву точек в BIM;
- моделирование в BIM с помощью дополнительных программных модулей, таких как Leica Cloudworx;
- импорт трехмерной модели из специализированного ПО обработки данных ДЗЗ или САПР с последующим его редактированием по требованиям BIM.

На рисунке 5.3 представлена усовершенствованная методика трехмерного моделирования по данным ДЗЗ, учитывающая особенности описанных групп ПО и современные тенденции трехмерного моделирования, заключающиеся в возросшей роли BIM-моделей.

Усовершенствованная технологическая схема применялась для трехмерного моделирования различных объектов, относящихся к сфере ТИ, с помощью описанных трех групп ПО. На рисунке 5.4 показан пример результата создания трехмерной векторной модели автозаправочной станции по данным НЛС в специализированном ПО обработки данных НЛС Cyclone и САПР AutoCAD.

Усовершенствованная технологическая схема создания трехмерных векторных геопространственных моделей объектов применялась для создания BIM модели подвергающегося реконструкции складского помещения г. Новосибирска с точностью взаимного отображения несущих конструкций до 1 см. Подробно методика построения этой модели приведена в [24]. На рисунке 5.5 приведен итоговый результат трехмерного информационного моделирования.

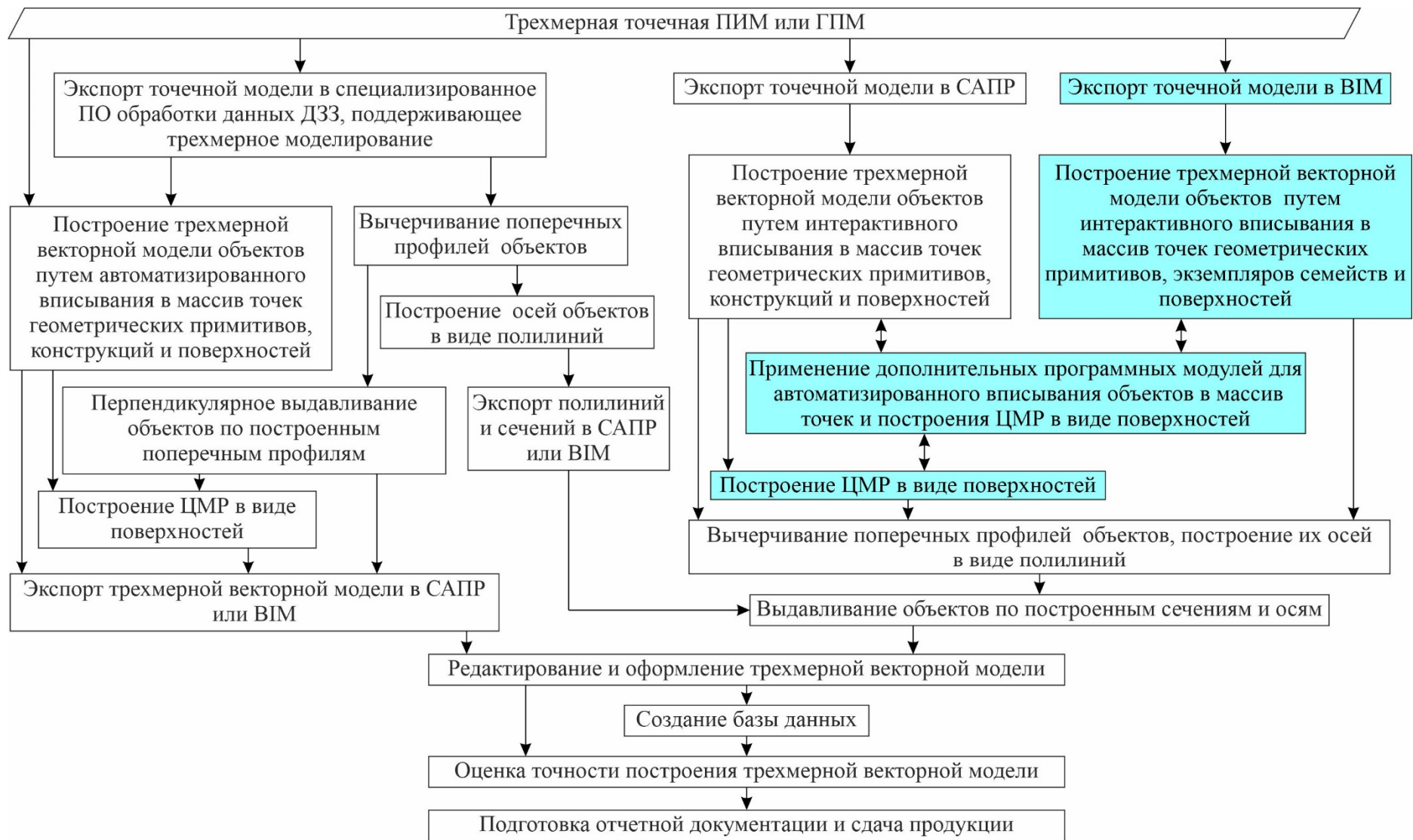


Рисунок 5.3 – Технологическая схема создания трехмерных векторных геопространственных моделей объектов

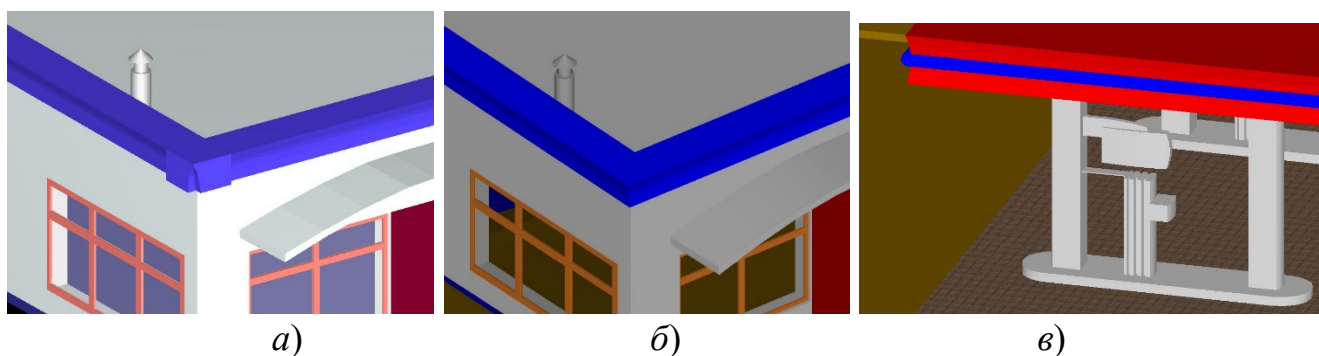


Рисунок 5.4 – Результат трехмерного моделирования:
a) в Cyclone; *б)* в AutoCAD *в)* наложение текстуры в AutoCAD

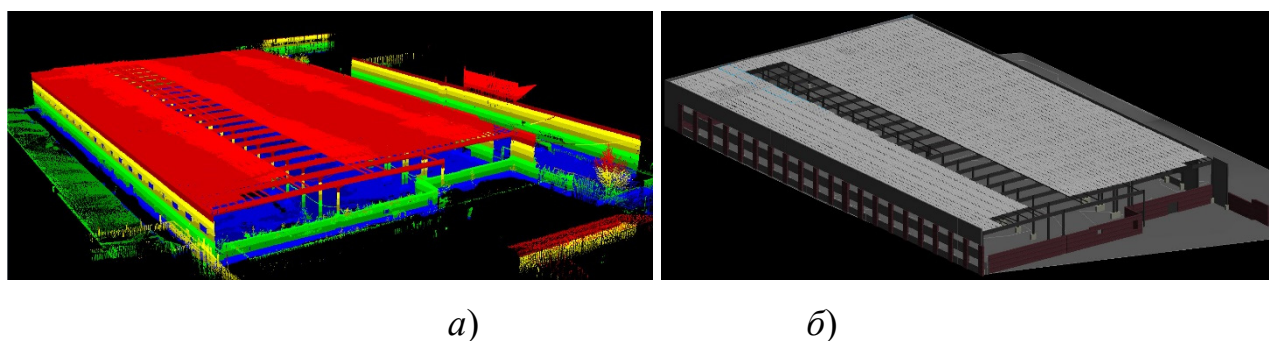


Рисунок 5.5 – Результаты трехмерного моделирования складского помещения:
a) точечная модель; *б)* трехмерная BIM модель

Созданная модель складского помещения описывает состояние реального объекта, включая его тип, материал. Ошибка вписывания трехмерных элементов несущих конструкций, стен и крыши в массив ТЛЮ не превысила 1 см.

5.2 Мониторинг технического состояния автомобильных дорог

5.2.1 Методика мониторинга технического состояния автомобильных дорог

Согласно выполненному в 1.5 обоснованию выбора оптимальных методов ДЗЗ для решения метрических задач сферы ТИ и анализу отдельного их перечня, приведенного в 1.4, для комплексного мониторинга технического состояния автомобильных дорог и определения их характеристик подходят методы НЛС и МЛС. Обоснование возможности применения НЛС для мониторинга технического

состояния автомобильных дорог также приведено в [84], а МЛС – в [155]. Из данных ЛС этих видов можно извлечь всю необходимую метрическую векторную информацию. В сфере автомобильного транспорта по такой информации могут быть получены требуемые геометрические характеристики автомобильной дороги, определена ровность и дефекты ее покрытия, выполнен мониторинг придорожной полосы и полосы отвода дороги. Для решения таких задач требуется выполнять построение ЦМП дорожного полотна и ЦМР придорожной полосы и полосы отвода [4]. При определении геометрических параметров дорог в соответствии с принципом интегрированности требуется выполнять досъемку местности с применением другого метода ДЗЗ, наиболее подходящим среди которых в соответствии с принципом оптимальности является ВЛС (таблица 1.7), так как позволяет оперативно получать точную информацию о рельефе местности на участках с плотной растительностью [25]. В этом случае в соответствии с принципом согласованности обработка данных МЛС или НЛС должна быть выполнена совместно с ВЛС для получения трехмерной точечной ГПМ ОТИ по методикам интеграции, описанным в 4.3 и 4.4. При применении только методов МЛС или НЛС, когда теневые зоны отсутствуют, допустимо использовать только трехмерную точечную ПИМ, полученную в результате обработки соответствующих данных по технологическим решениям, предложенным в 3.2 и 3.4 [134].

С целью автоматизированного извлечения всей векторной информации по трехмерной точечной ПИМ или ГПМ выполняется разработка специальных методов и методик. Основные концепции и методы извлечения векторной информации из массива точек представлены в [243, 247, 270].

Разработанная методика мониторинга технического состояния автомобильных дорог приведена на рисунке 5.6. В начале выполняется построение предварительной ЦМР по точкам земли, являющихся частью трехмерной точечной ПИМ или ГПМ, и выделение ТЛО дорожной разметки на основе анализа значений интенсивности. Предварительная ЦМР и ТЛО дорожной разметки используются для распознавания характерных линий автомобильных дорог. Второй вариант такого

распознавания – это анализ изменения уклона местности. Автоматизированные методы выполняют вписывание узлов линий в места изменения уклона предварительно построенной поверхности по точкам земли. Для апробаций разработанной методики применялись 2 метода, включенные в состав ПО TerraSolid:

- метод поиска структурных линий, выполняющий анализ изменения уклона вдоль предварительно грубо векторизованной линии в пределах задаваемого пользователем радиуса и значения уклона;

- метод поиска бордюров, аналогично выполняющий анализ изменения уклона в пределах задаваемого пользователем радиуса. Метод вписывает 2 структурные линии, соответствующих верхнему и нижнему краю бордюра.

Грубая векторизация линий выполняется в плановом положении. Затем перед применением метода поиска структурных линий или бордюра выполняется проецирование векторизованной линии на предварительную ЦМР.

Похожие методы поиска структурных линий реализованы во многих других ПО обработки данных ЛС. Например, в ПО Кредо 3D СКАН. Это ПО позволяет автоматически находить структурные линии без предварительной грубой векторизации. Но в этом случае требуется более тщательно контролировать результат векторизации и перезапускать его в случае отклонения добавленной структурной линии от истинного положения характерной линии дороги [170].

По характерным линиям вычисляют основные элементы автомобильных дорог, которые их описывают в продольном и поперечном профиле. К основным характерным линиям автомобильной дороги можно отнести следующие [174]: выпуклость дороги, ось дороги, границы укрепленной полосы обочины, бровка и подошва земляного полотна, кромки проезжей части. Они используются для определения таких их геометрических характеристик, как ширина полос движения, ширина обочин, ширина остановочной полосы, ширина разделительной полосы, ширина насыпей, продольные и поперечные уклоны проезжей части и обочин.

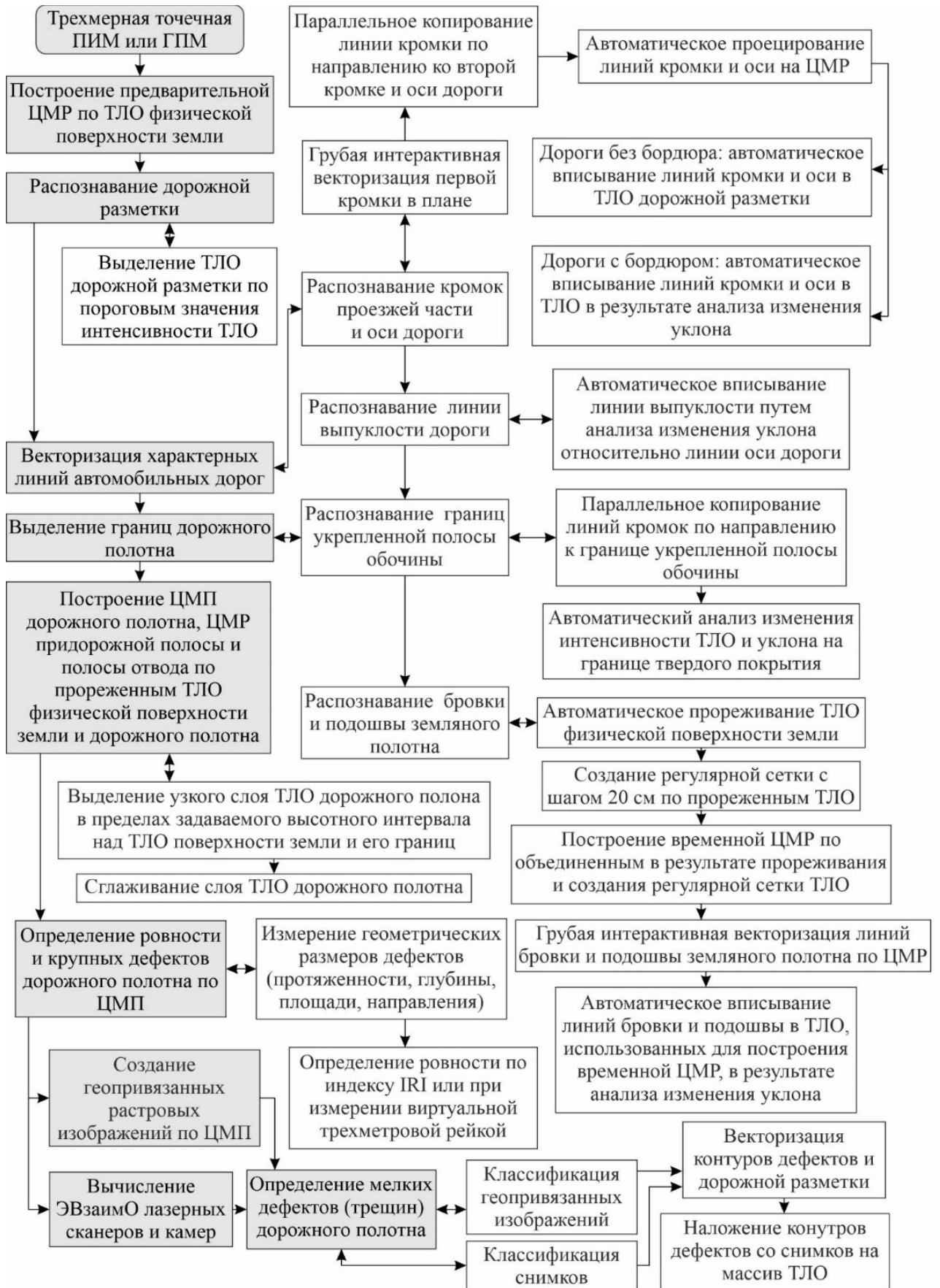


Рисунок 5.6 – Методика мониторинга технического состояния автомобильных дорог

Качество построения ЦМР и извлечения всей векторной информации будет зависеть от результатов фильтрации и уравнивания массивов ТЛО, выполненных по соответствующей технологической схеме сбора и предварительной обработки, описанной для данных МЛС в 3.2.1, а для НЛС – в 3.3.1. Также будет влиять применяемая модель системы ЛС, что было показано в 5.1.1.

Плотность массива ТЛО при съемке с проезжей части и при наличии растительности в области подошвы земляного полотна заметно снижается. Поэтому для повышения точности распознавания подошвы выполняется создание временной ЦМР по точкам физической поверхности земли, полученным в результате прореживания и создания регулярной сетки высот с шагом 20 см. Для прореживания могут применяться различные методы, многие из которых описаны в [305]. При апробации предложенной методики применялся метод прореживания, основанный на поиске ключевых точек и используемый ПО TerraSolid.

На основе линий границ укрепленной полосы обочины определяются границы дорожного полотна, которые ограничивают область построения его поверхности. Полученные границы с учетом таких характерных линий, как кромки проезжей части, выпуклость и ось поперечного профиля, применяются далее для ограничения области построения ЦМП дорожного полотна по массиву ТЛО. ТЛО поверхности дорожного полотна включают точки земли и узкий слой точек выше них в пределах небольшого высотного интервала. Задание этого интервала необходимо, чтобы компенсировать зернистую структуру такого дорожного покрытия, как асфальт. Значение интервала следует подбирать также исходя из количества шумовых составляющих данных ЛС определенной модели системы ЛС и внешних условий выполнения измерений. Положение слоя точек дорожного полотна сглаживается в пределах выбранного интервала.

Построенная ЦМП дорожного полотна используется для оценки продольной и поперечной ровности покрытия автомобильных дорог, выявления их дефектов.

Чтобы выделить контура дорожной разметки и распознать отдельные мелкие дефекты дорожного полотна, такие как трещины, может выполняться создание ге-

опривязанных растровых изображений по массиву точек поверхности дорожного полотна. На основе описанных в 2.6.2 методов определения деталей изображения, позволяющих выделить отдельные контуры, выполняется векторизация мелких дефектов дорожного полотна и контуров дорожной разметки. Либо распознавание мелких дефектов может быть выполнено посредством классификации снимков, полученных входящими в состав системы ЛС цифровыми камерами, векторизации границ класса дефектов и их наложения на массив ТЛО на основе вычисленных значений ЭВзаимО лазерных сканеров и камер.

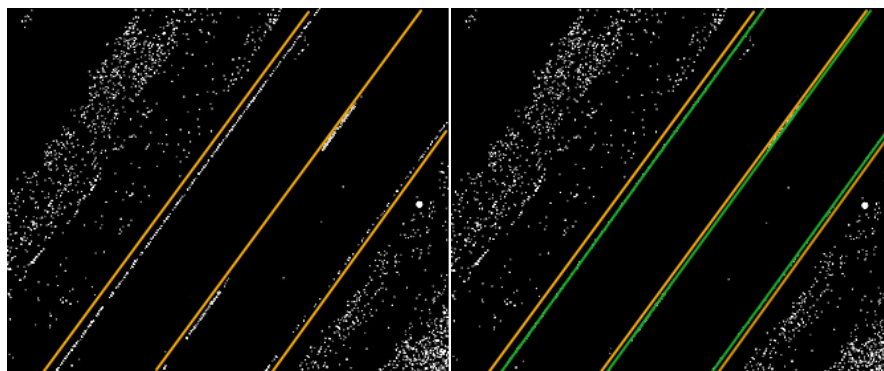
5.2.2 Исследование методики мониторинга технического состояния автомобильных дорог

Разработанная методика была применена к данным МЛС, полученных с помощью системы Riegl VMX-250 на участок автомобильной дороги между поселками 8 марта и Верх-Тула в пригороде г. Новосибирска.

Данные МЛС были получены и обработаны по технологической схеме, представленной в разделе 3.2.1. Полученная трехмерная точечная ПИМ содержала распознанные точки земли, по которым выполнялось построение предварительной ЦМР. В соответствии с методикой мониторинга технического состояния автомобильных дорог далее выделялись ТЛО дорожной разметки, которая использовалась для векторизации кромки с точностью порядка 1 м, которая параллельно копировалась ко второй кромке и оси дороги. Все 3 линии были спроецированы на предварительную ЦМР и вписаны в классифицированные по интенсивности ТЛО дорожной разметки. На рисунке 5.7 показан результат выделения ТЛО дорожной разметки, автоматического вписывания интерактивно векторизованных линий кромок и оси автомобильной дороги.

Следующий этап заключался в определении линии выпуклости автомобильной дороги. За основу была взята автоматизировано определенная ось дороги. Определение точек изменения уклона выполнялось с помощью метода поиска структурных линий в пределах радиуса поиска 3 м. Этот же метод был применен

для распознавания границ укрепленной полосы обочины при соблюдении дополнительного условия – изменения интенсивности ТЛО на границах обочины и дорожного покрытия.



a)

б)

Рисунок 5.7 – Распознавание кромок и оси автомобильной дороги:

a) до автоматического вписывания; *б)* после автоматического вписывания

— интерактивно векторизованные линии;

— автоматически вписанные линии

Для распознавания линий бровки и подошвы земляного полотна предварительно поочередно было выполнено прореживание ТЛО физической поверхности земли, создание регулярной сетки высот (рисунок 5.8, *a*), построение временной ЦМР по объединенным прореженным точкам и точкам регулярной сетки, интерактивная векторизация бровок и подошв по временной триангуляционной ЦМР, грани которой отображались с изменением цветов по высоте (рисунок 5.8, *б*), а также автоматическое вписывание интерактивно векторизованных линий с помощью метода поиска структурных линий при радиусе поиска узлов 4 м (рисунок 5.8, *в, г*).

Полученные структурные линии укрепленной полосы обочины использовались в качестве границ дорожного полотна, между которыми строилась его ЦМП как сглаженный слой точек, находящихся в пределах 1 см по высоте от предварительной ЦМР. На рисунке 5.9 показан результат построения ЦМП дорожного полотна, ЦМР придорожной полосы и полосы отвода.

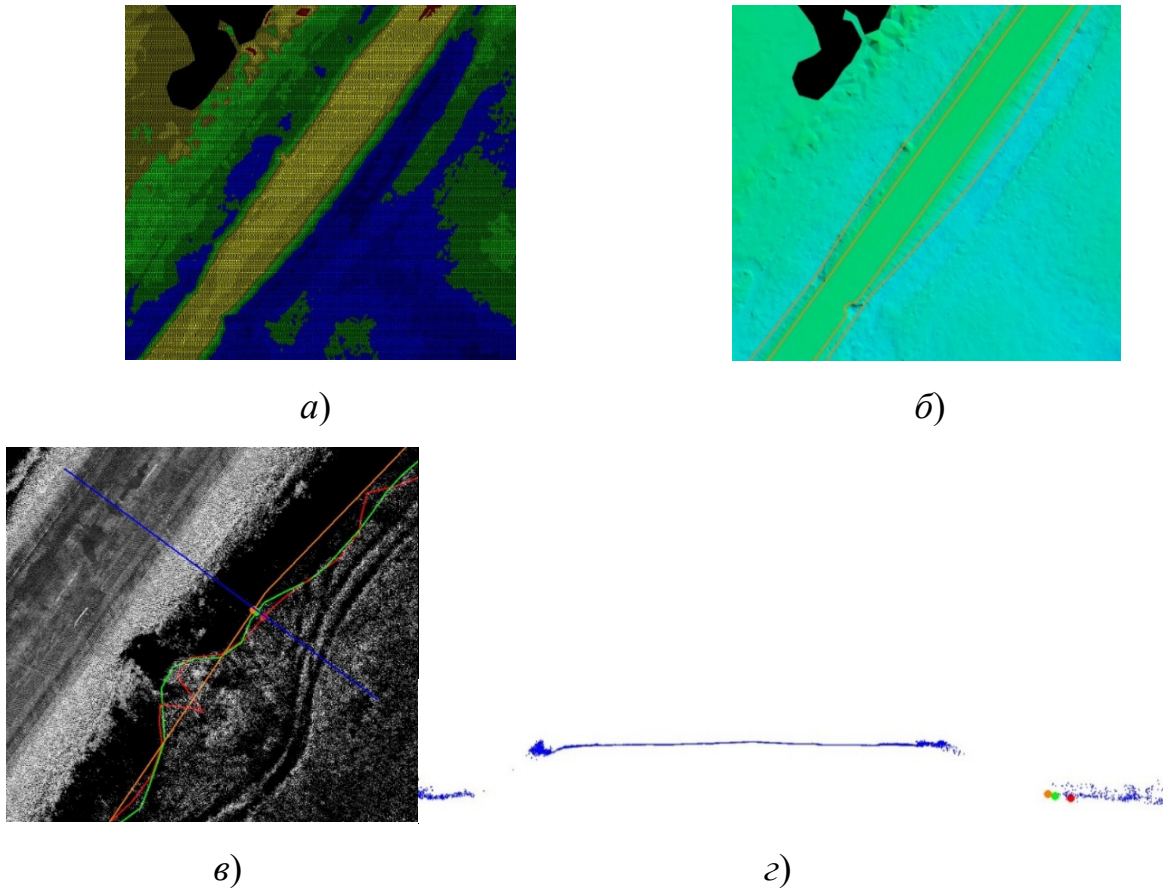


Рисунок 5.8 – Пример процесса распознавания бровки и подошвы земляного полотна: а) регулярная сетка высот; б) интерактивная векторизация бровок и подошв по временной триангуляционной ЦМР; в) поиск подошвы – вид сверху; г) – поиск подошвы – поперечный профиль; ———— – интерактивно векторизованные линии; ———— – автоматически вписанная линия по предварительной ЦМР; ———— – автоматически вписанная линия по временной ЦМР; ———— – местоположение поперечного профиля

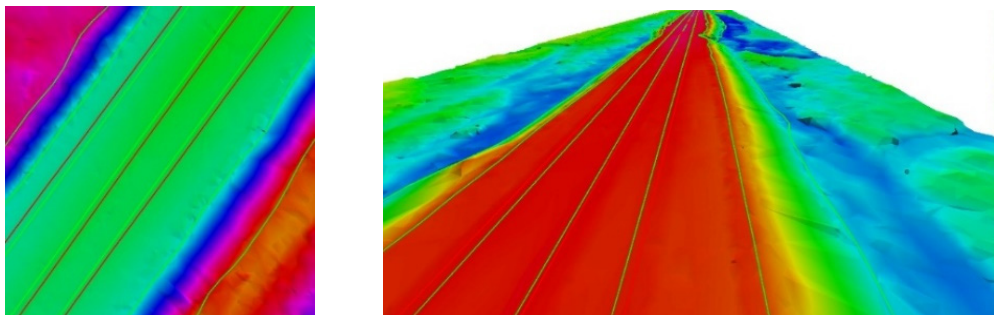


Рисунок 5.9 – ЦМП дорожного полотна, ЦМР придорожной полосы и полосы отвода

Построенная ЦМП дорожного полотна далее может быть применена для оценки его ровности и определения дефектов.

Для оценки как продольной, так и поперечной ровности по построенной ЦМП в соответствии с разработанной методикой может применяться трехметровая виртуальная рейка с целью измерения величины просвета под ней. Результаты такого исследования приведены в [155].

По ЦМП дорожного полотна могут быть измерены его крупные дефекты, такие как выбоины, широкие и глубокие трещины, проломы, просадки, неровности ямочного ремонта, разрушенные кромки покрытия. В случае, если была выполнена разновременная съемка, то при применении системы технологических решений сбора и обработки данных ДЗЗ, приведенной в разделе 3, может быть автоматически оценено, за какой временной интервал произошло изменение состояния дорожного покрытия, путем построения разновременной ЦМП [205].

Для выделения более мелких дефектов дорожного полотна, отдельных трещин, выполняется создание геопривязанных растровых изображений по массиву ТЛО или применяются снимки, полученные цифровыми камерами системы ЛС. На рисунке 5.10 показан пример результата распознавания трещин по геопривязанным растровым изображениям, созданным по массиву ТЛО.

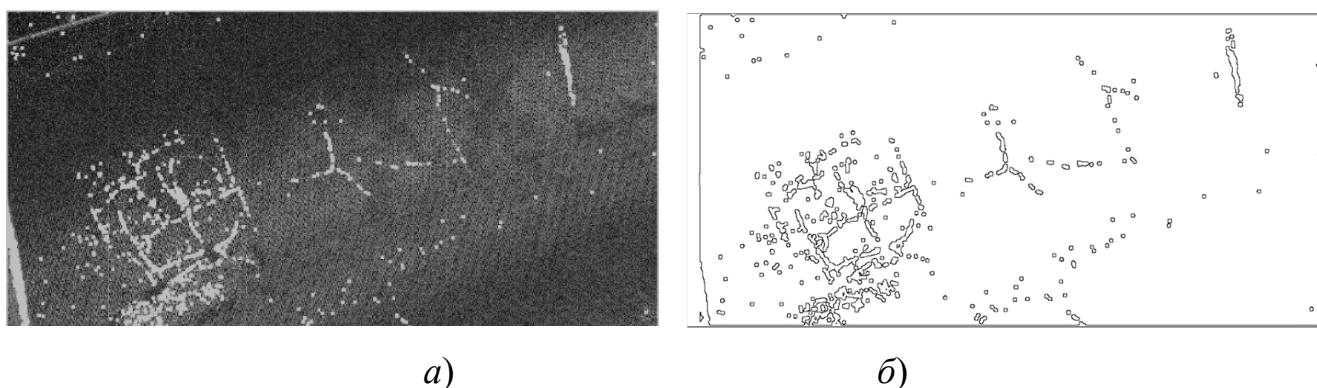


Рисунок 5.10 – Распознавание трещин по геопривязанным растровым изображениям: а) выделенные трещины на изображении; б) автоматически векторизованные контура трещин

На рисунке 5.11 показан пример поэтапного процесса распознавания трещин на основе классификации цифрового снимка. Детальный процесс классификации и применяемые методы описаны в [294].

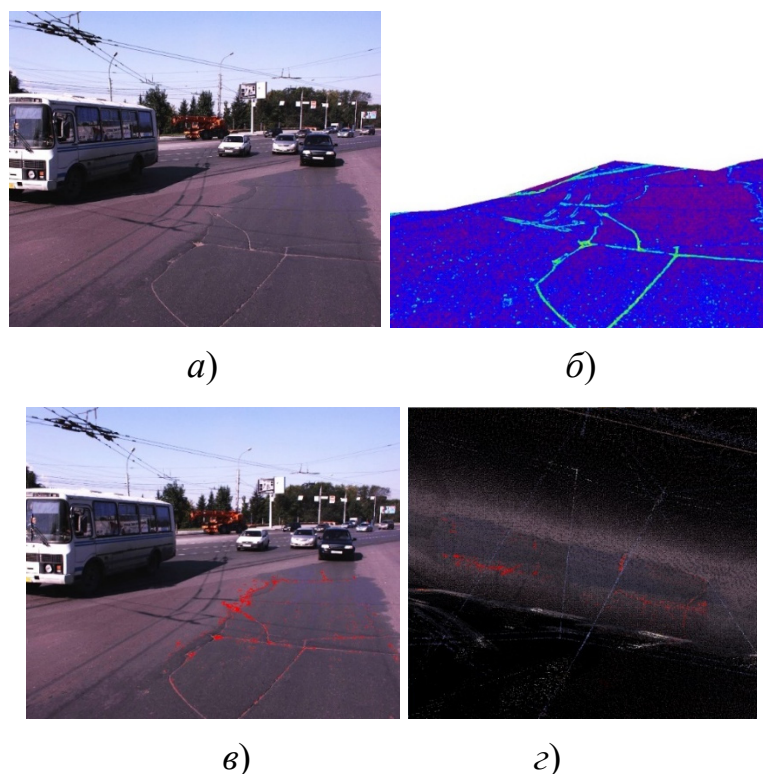


Рисунок 5.11 – Распознавание трещин по снимкам: *а)* исходный снимок
б) результат классификации снимка после маскирования не принадлежащих дорожному полотну зон; *в)* распознанные трещины на основе классификации снимка; *г)* наложенные трещины на массив ТЛО

Таким образом, разработанная методика позволяет на основе построенных по массивам ТЛО ПИМ и ГПИМ выполнить оценку технического состояния автомобильных дорог путем построения ЦМП дорожного полотна, ЦМР придорожной полосы и полосы отвода, а также применения снимков, получаемых цифровыми камерами систем ЛС. Полученные материалы позволяют рассчитать большинство геометрических характеристик автомобильных дорог и выявить их дефекты. Выполнив повторную съемку, можно построить разновременную ЦМП, оценив изменения в состоянии ОТИ и дорожного покрытия.

5.2.3 Применение методики мониторинга технического состояния автомобильных дорог для контроля качества их ремонта

Осенью 2020 года на территории студенческого городка СГУГиТ были выполнены работы по укладке нового асфальтового покрытия. Для оценки их качества применялся наземный лазерный сканер Leica ScanStation 2. Съёмка выполнялась до и после дорожных работ. Главной целью ЛС стала оценка ровности асфальтового покрытия, определение его дефектов и измерение уклонов для поиска участков возможного скопления воды. Дополнительно были в наличии данные со сканера Geomax Zoom 300, полученные после выполнения дорожных работ. Поэтому еще одной задачей для соответствия принципу оптимальности стала оценка возможности применения данных НЛС этих моделей сканеров для решения задачи определения ровности и дефектов дорожного полотна, а также сравнение ровности старого покрытия с новым и измерение того, на сколько изменился уровень высоты асфальта в области перекрытия всех трех наборов данных [6].

Процесс получения и обработки данных, полученных после выполнения дорожных работ, были описаны в 5.1.1. Внешнее ориентирование данных сканера ScanStation 2, полученных до выполнения дорожных работ, было выполнено по известным координатам марок, также использованных при обработке данных, полученных после дорожных работ. Тем самым было обеспечено выполнение методологического принципа единства измерений.

На рисунке 5.12 представлены массивы ТЛО, полученные за разные циклы сканирования, с отображением по высоте.

Для того чтобы удостовериться в точности лазерного сканера Leica ScanStation 2, осуществлялась дополнительно съёмка старого дорожного покрытия с помощью тахеометра Leica TM30. СКО данных НЛС составила 2 мм.

Все три массива ТЛО были обработаны по методике создания ПИМ, приведенной в разделе 3.4.1. Для построения ЦМП дорожного полотна по трем наборам данных необходимо было предварительно подобрать высотный интервал, в пределах которого выполняется классификация ТЛО относительно ТЛО физической по-

верхности земли как точек дорожного полотна. Для этого сначала по сечениям оценивалось качество массивов ТЛО, полученных различными лазерными сканерами.

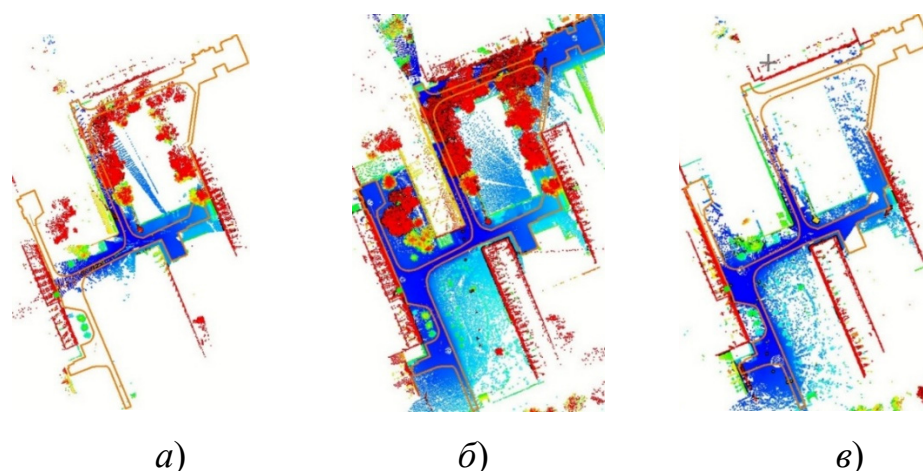
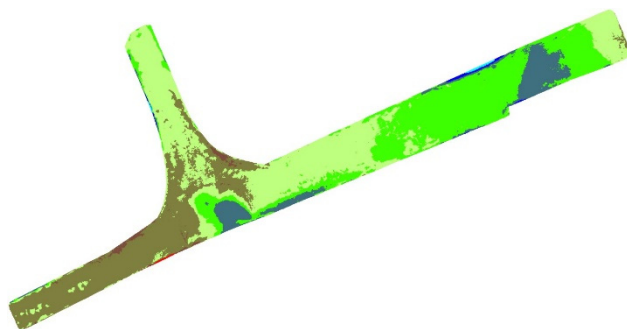


Рисунок 5.12 – Данные НЛС с видом сверху, полученные сканером:

а) ScanStation 2 до дорожных работ; б) ScanStation 2 после дорожных работ; в) Zoom 300 после дорожных работ; — границы асфальтового покрытия

Сечения показали, что уравнивание было выполнено по высоте максимально точно, так как полностью отсутствует двоение данных. Исходя из значений ширины слоя точек асфальта на нескольких сечениях, для сканера ScanStation 2 был выбран высотный интервал распознавания над выделенными по методу Аксельсона точками поверхности земли, соответствующий одному сантиметру. Для сканера Zoom 300 было выбрано значение высотного интервала 2 см, позволившее захватить основную массу ТЛО и отсесть большинство ложных измерений, получаемых на большом расстоянии от точки съемки. Более подробно результаты выполненных исследований приведены в [6].

В соответствии с методикой мониторинга технического состояния автомобильных дорог далее ТЛО дорожного покрытия были сглажены по высоте: 1 см для ТЛО сканера ScanStation 2 и 2 см – для Zoom 300. После этого строились ЦМП дорожного покрытия, по которым уже можно было решать задачи контроля качества ремонта автомобильных дорог. В рамках выполненного исследования строились ЦМП с отображением горизонталей через 1 см. Горизонтали, показанные на рисунке 5.13, свидетельствует о том, что ровность нового асфальтового по-



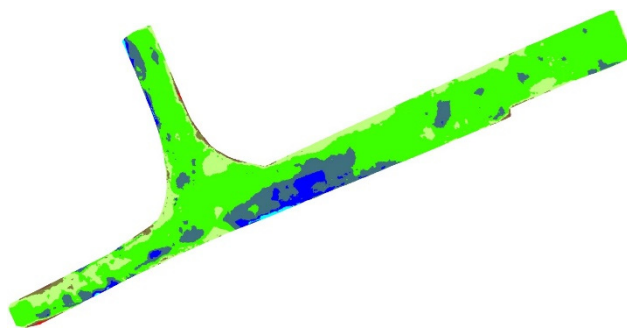
Диапазоны высотных отметок пов-ти				
Номер диапазона	Нижняя граница м	Верхняя граница м	Цвет	Площадь 2D кв.м
1	-0.050	-0.020	Красный	0.20
2	-0.020	-0.010	Синий	3.78
3	-0.010	0.000	Зеленый	94.92
4	0.000	0.010	Желтый	131.07
5	0.010	0.020	Оранжевый	116.38
6	0.020	0.040	Коричневый	31.05
7	0.040	0.060	Фиолетовый	1.21
8	0.060	0.080	Синий	0.43

Рисунок 5.14 – Результат построения разностной ЦМП между ЦМП ScanStation 2 после дорожных работ и ЦМП Zoom 300

Таблица 5.1 – Отклонения результата построения ЦМП ScanStation 2 после дорожных работ от ЦМП Zoom 300 по сетке контрольных точек

Вид отклонения	Z, м
Среднее отклонение	0,008
Среднее квадратическое отклонение	0,010
Максимальное отклонение	0,043

Если построить разностную ЦМП по данным одной модели лазерного сканера, полученным до и после дорожных работ, можно рассчитать, насколько изменился уровень асфальта. На рисунке 5.15 показан результат построения такой ЦМП по разновременным данным сканера ScanStation 2. Большинство изменений находятся в диапазоне от 33 до 65 мм.



Диапазоны высотных отметок пов-ти				
Номер диапазона	Нижняя граница м	Верхняя граница м	Цвет	Площадь 2D кв.м
1	-0.094	-0.063	Красный	0.16
2	-0.063	-0.031	Синий	1.07
3	-0.031	0.001	Зеленый	4.95
4	0.001	0.033	Желтый	53.46
5	0.033	0.065	Оранжевый	252.87
6	0.065	0.097	Коричневый	53.28
7	0.097	0.128	Фиолетовый	12.21
8	0.128	0.160	Синий	1.09

Рисунок 5.15 – Результат построения разностной ЦМП по данным ScanStation 2

Далее выполнялось построение ЦМП всего асфальтового покрытия территории студенческого города СГУГиТ по данным сканера ScanStation 2, полученных после выполнения дорожных работ. В соответствии с методикой мониторинга технического состояния автомобильных дорог были распознаны границы асфальтового покрытия путем анализа изменения уклона методом поиска бордюров. Границы асфальтового покрытия и результаты классификации массива ТЛО применялись для построения ЦМП и выявления мест скопления воды. В приложении А показан результат построения ЦМП для оценки качества ремонта дорожного покрытия. Всего было выявлено 14 участков скопления воды с общей площадью 78,1 м².

Таким образом, применение разработанной методики мониторинга технического состояния автомобильных дорог позволило выполнить оценку качества укладки нового асфальтового покрытия на территории студенческого городка СГУГиТ, оценить все зоны скопления воды и рассчитать их площадь.

5.3 Применение данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта

5.3.1 Технологическая схема применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта

В сфере железнодорожного транспорта для контроля качества ремонта и строительства железнодорожных путей находит активное применение метод МЛС, позволяющий выполнить проектирование ремонта и реконструкции железных дорог, их исполнительную съемку для проверки соответствия пространственного положения отремонтированного пути и его параметров проектным данным. Практический опыт применения этого метода для исполнительной съемки железных дорог и создания масштабных планов приведен в [193]. В последнее время на железных дорогах также начинают использовать методы ВЛС и АФС с БВС, позволяющие ре-

шить ряд задач исполнительной съемки при невысокой стоимости комплекта оборудования по сравнению с методом МЛС [17, 93].

На рисунке 5.16 приведена технологическая схема применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта.

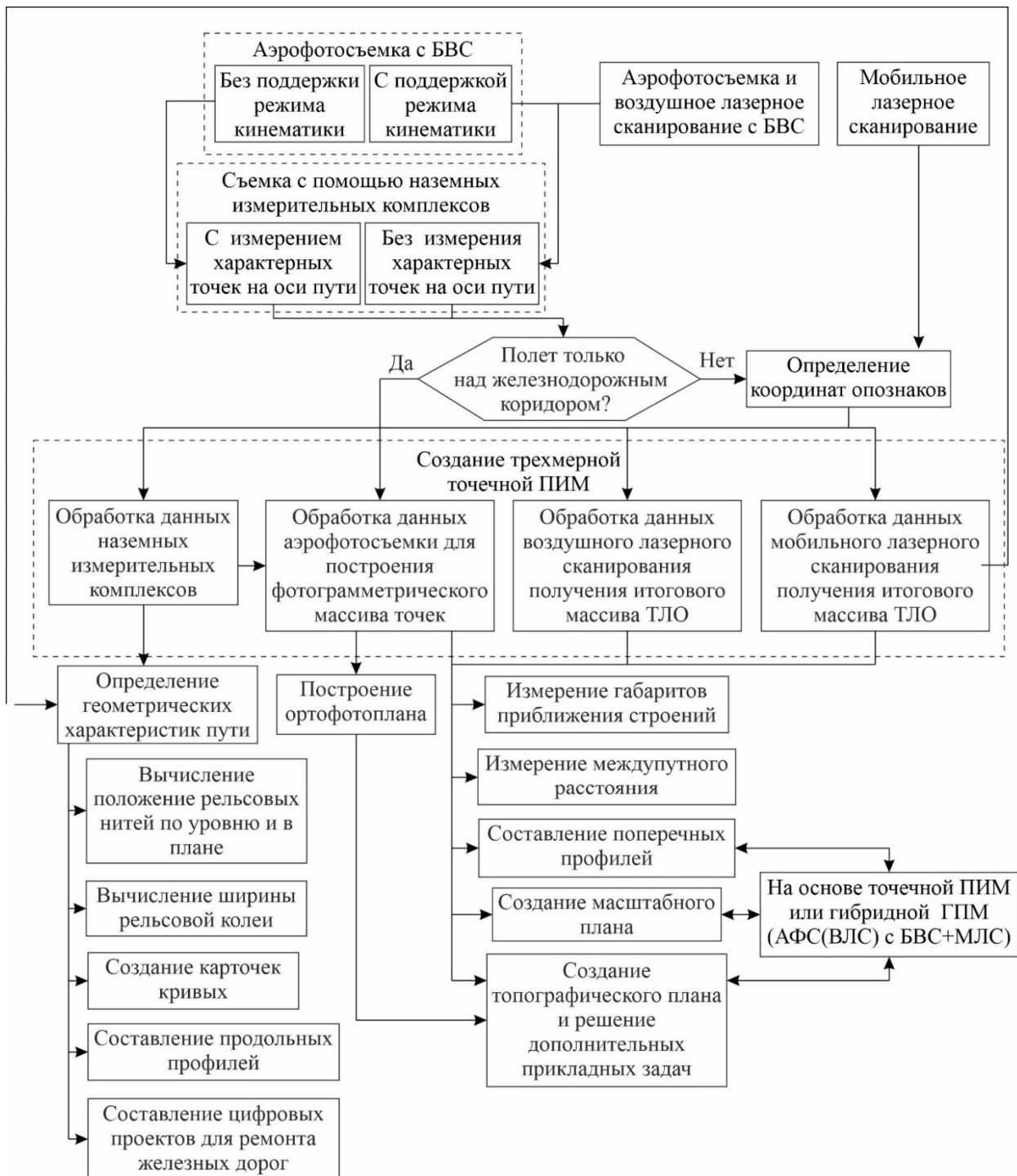


Рисунок 5.16 – Технологическая схема применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта

Если выполняется только МЛС, то при условии применения сети наземных опознаков можно решить все задачи исполнительной съемки железных дорог, включая определение абсолютного положения рельсового пути и всех геометрических параметров, построение продольных профилей на основе положения рельсовых нитей, поперечных профилей земляного полотна, создать масштабные и топографические планы.

Метод АФС с БВС также позволяет надежно решить многие из этих задач при выполнении определенных условий, таких как низкая высота полета и надежная пространственная привязка. Для решения задач, требующих наибольшей точности, в дополнении к АФС применяются наземные измерительные комплексы, что было показано в 3.5 при разработке соответствующей методики построения ПИМ. В этом случае преимуществом АФС с БВС перед МЛС будет меньшее количество теневых зон по краям железнодорожного коридора и возможность построения ортофотоплана.

Согласно разработанной схеме, по данным МЛС могут быть решены все упомянутые задачи, а при применении ВЛС или АФС с БВС рекомендуется решать все задачи, несвязанные напрямую с созданием цифровой модели пути. Дополнительным преимуществом АФС является возможность построения дополнительной цифровой продукции – ортофотоплана, которая в дополнение к фотограмметрическому массиву точек упрощает задачу создания топографического плана и решения других метрических задач. В соответствии с принципом преемственности технологическая схема применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта учитывает разработанные схемы создания ПИМ, приведенные в 3.2, 3.3 и 3.4, а также оставляет возможности применения гибридной ГПМ, методика создания которой описана в 4.3.

5.3.2 Применение данных АФС с БВС для исполнительной съемки железных дорог

Технологическая схема сбора и предварительной обработки данных АФС с

БВС для создания ПИМ, описанная в разделе 3.5.1, была успешно применена при съемке ряда железнодорожных перегонов и станций. Обработанный в ПО Agisoft Metashape участок одного из таких перегонов приведен на рисунке 5.17, на котором отмечены использованные для внешнего ориентирования точки оси железнодорожного пути, расположенные напротив характерных железнодорожных объектов и измеренные с помощью АПК «Профиль-М». Это участок перегона Тягун-Алаббай, находящийся в Кемеровской области, съемка которого была выполнена с высоты 20 м с помощью DJI Phantom 4 Pro в октябре 2018 года [17]. Такая низкая высота полета позволила построить фотограмметрические массивы точек с точностью и детальностью, приемлемой для измерения габаритов приближения строений и междупутного расстояния.

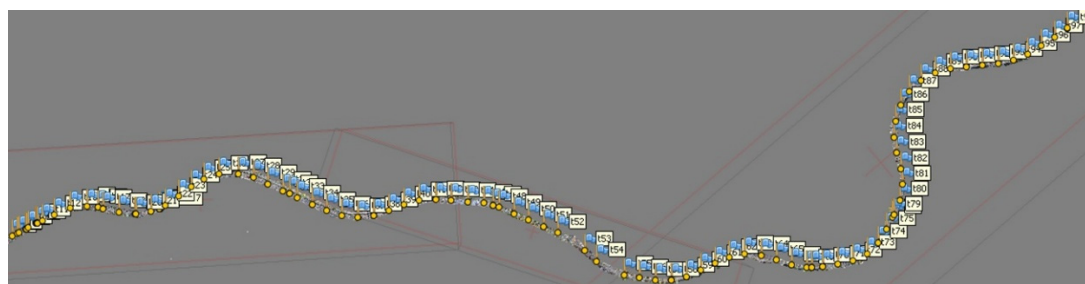


Рисунок 5.17 – Обработанный участок перегона Тягун-Алаббай

Половина точек оси железнодорожного пути была выбрана в качестве опорных, а другая половина – контрольных. По опорным точкам средняя ошибка внешнего ориентирования точечной модели данного участка перегона составила 6,2 см, максимальная – 14,8 см. По контрольным точкам данная ошибка составила 13,2 и 20,5 см соответственно. Размер пикселя созданного ортофотоплана на местности при этом составил 4,5 мм. Причины относительно больших ошибок внешнего ориентирования при использованной схеме измерений указаны в разделе 3.5.1. Но целью построения ПИМ по данным БВС на железной дороге является измерение не абсолютных значений ошибок положения объектов, а относительных.

По фотограмметрическому массиву выполнялось построение поперечных сечений в местах характерных точек для определения габаритов приближения строений

ний, междупутного расстояния и построения поперечных профилей, которые содержали информацию о ширине плеча балластной призмы, ширине обочины земляного полотна, об уклонах откосов земляного полотна и балластной призмы.

Для оценки точности полученных измерений были выполнены контрольные промеры в 72 сечениях с использованием электронного тахеометра FOCUS 4. Исследование показало, что величины междупутья и габаритов приближения строений для опор контактной сети определены с СКО 2 см.

Для построения поперечных профилей и определения геометрических параметров, необходимых при исполнительной съемке, может применяться любой САПР. В рамках выполняемых работ применялся САПР MicroStation. По загруженному фотограмметрическому массиву точек и точкам оси пути, полученных с помощью АПК «Профиль-М», определялись положения объектов инфраструктуры, таких как пикетные и километровые столбики, опоры контактной сети, стрелочные переводы, светофоры. Подгруженные данные системы АПК «Профиль-М» включали в себя как все точки траектории ее перемещения, необходимые для создания единой полилинии и отслеживания пикетажа, так и характерные, отмеченные напротив объектов инфраструктуры с присвоением полевого кода. В соответствии с полученным пикетажем определялись местоположения необходимых поперечных профилей в соответствии с проектом на ремонт пути, измерялись междупутные расстояния и габариты приближения строений для опор контактной сети.

Один из участков перегона, на котором выполнялась исполнительная съемка с использованием АФС с БВС, располагался в условиях сложного рельефа, высота насыпей которого достигала 25 м. Выполнять съемку поперечного профиля на глубоких выемках и высоких насыпях с помощью традиционных наземных геодезических методов или ГНСС-измерений является трудоемким и технически сложным процессом. Применение БВС позволяет построить ЦММ при любых условиях рельефа более эффективно. В настоящее время по заказу ОАО «РЖД» была выполнена исполнительная съемка большого количества перегонов с применением мето-

В соответствии с предложенной технологической схемой применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта масштабные планы могут быть построены по данным МЛС, ВЛС или АФС с БВС. Применение АФС с БВС позволяет получать ортофотопланы, которые могут являться источником новой информации для отображения на масштабных планах, так и одним из видов контрольных измерений [23]. При выполнении исполнительной съемки, выполнив привязку данных БВС по пикетным и километровым столбам, можно сократить объем полевых измерений с помощью АПК за счет того, что измерение координат всех остальных сооружений будет уже выполняться в камеральных условиях по привязанному ортофотоплану или фотограмметрическому массиву точек.

На рисунке 5.31, *а* показан результат построения ортофотоплана на территорию станции Камень-на-Оби и прилегающего перегона с наложенными рельсовыми путями в истинном масштабе. На рисунке 5.19, *б* показан окончательный вид отображения рельсовых путей на масштабном плане. Чтобы перейти от вида плана, показанного на рисунке 5.19, *а* к виду, показанному на рисунке 5.19, *б*, осуществлялись операции поворота и изменения горизонтального масштаба. Нанесение всех сооружений на план осуществляется до данных преобразований.



Рисунок 5.19 – Результаты съемки станции Камень-на-Оби

а) рельсовые пути с наложенным ортофотопланом; *б*) рельсовые пути на масштабном плане

Ортофотоплан экспортировался в ГИС ArcView. На рисунке 5.20 показан пример отображения измеренных с помощью АПК условных знаков ОТИ, наложенных на ортофотоплан.

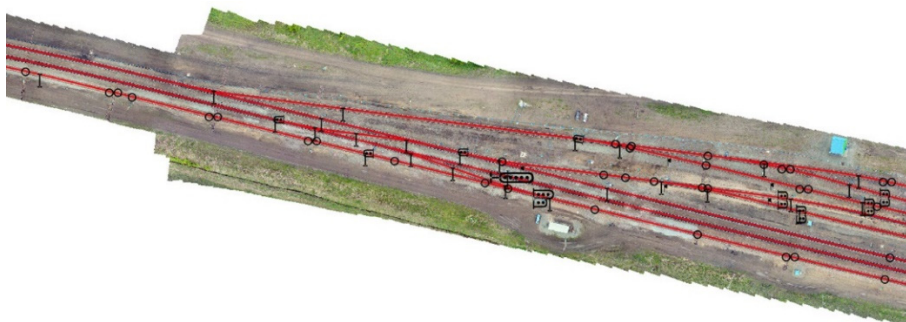


Рисунок 5.20 – Фрагмент ортофотоплана с отображением условных знаков ОТИ

Передача итоговых материалов может быть выполнена в двух формах:

- масштабной с отображением условных знаков;
- метрической с отображением условных знаков и подложкой в виде ортофотоплана.

Преимущество метрической формы состоит в большей наглядности и возможности выполнения по ортофотоплану любых дополнительных измерений. Масштабная форма позволяет получить план в более компактном виде для вывода его на печать на меньшем количестве листов, но не позволяет в реальном времени выполнить дополнительные измерения, так как многие стационарные пути могут быть отображены отдельно от остальных.

Таким образом, построенный по данным АФС с БВС ортофотоплан позволяет выполнить контроль результатов наземных геодезических измерений, являющихся основой масштабного плана, и служит источником измерений. Ортофотоплан совместно с масштабным планом повышает визуальное восприятие информации.

5.3.4 Применение данных АФС с БВС для создания топографических планов и решения дополнительных прикладных задач

Согласно технологической схеме, приведенной в 5.3.1, данные ДЗЗ на желез-

ных дорогах также применяются для создания топографических планов и решения дополнительных прикладных задач. Для этого выполняется предварительное создание ПИМ и ГПИМ по технологическим схемам и методикам разделов 3 и 4. На железных дорогах одной из дополнительных задач, решаемой по данным ДЗЗ, является мониторинг зон затоплений. Для этого актуально использовать методы ВЛС и АФС с БВС. Эти методы позволяют в совокупности построить высокоточные ЦМР, анализ которых позволяет отследить все зоны затопления на больших площадях. Подобная задача уже была рассмотрена в 5.2.3 для мониторинга технического состояния автомобильных дорог при анализе стоков воды в пределах границ дорожного покрытия. В контексте железных дорог, анализ зон скопления воды выполняется относительно границ транспортного железнодорожного коридора, как внутри него, так и за пределами.

Не смотря на то, что ВЛС позволяет получить более точную информацию о рельефе, для решения задачи выявления зон затопления на преимущественно незалесенных территориях допустимо применение метода АФС с БВС. В этом случае АФС выполняется и за пределами железнодорожного коридора, что необходимо для принятия мер с целью снижения уровня воды вокруг территории железной дороги. Создание ПВО в этом случае необходимо выполнять традиционным способом или ГНСС-методом с применением наземных опознаков, так как большинство маршрутов АФС пролегают за пределами железнодорожного коридора. Для оценки точности создания ЦМР и лучшего планирования мероприятий по устранению зон затоплений часть контрольных измерений требуется выполнять на уровне уреза воды. Создание топографического плана также помогает решению этой задачи за счет упрощения восприятия информации о расположении ОТИ относительно зоны затопления.

Для решения задачи мониторинг зон затоплений разработанные технологические решения и методики сбора и обработки данных АФС с БВС были применены на территории Любинского района Омской области.

АФС была выполнена помощью DJI Phantom 4 Pro над зоной затопления. Про-

тяжесть территории съемки составила 12 км. Результатами обработки данных АФС стали фотограмметрические массивы точек и ортофотоплан (рисунок 5.21), которые использовались для создания топографического плана масштаба 1: 2 000 и ЦМР в форме триангуляционной сети.



Рисунок 5.21 – Результат построения ортофотоплана

Результаты создания топографического плана и ЦМР по всю представлены в приложении Б в форме заливки граней треугольников цветом по высоте и в форме цветового отображения горизонталей. Такая форма ЦМР позволяет надежно спланировать все мероприятия по устранению зон затоплений.

5.3.5 Применение данных МЛС для создания топографических планов

По технологической схеме применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта наиболее универсальным методом ДЗЗ является МЛС. По сравнению с АФС метод МЛС применяется на железной дороге, когда требуется выполнить как исполнительную съемку, так и создать топографический план в пределах узкого железнодорожного коридора. В соответствии с принципом интегрированности совместное применение АФС и МЛС, методики создания гибридной ГПМ, описанной в разделе 4.3, целесообразно, когда топографический план требуется для более широкого железнодорожного коридора при сложном рельефе местности. Съемка подобной территории железной дороги была выполнена

с помощью системы МЛС Ortech Lynx Mobile Mapper M1 Сибирской государственной геодезической академией совместно с компанией «Йена Инструмент» в 2012 г. Объектом съемки послужил участок железнодорожного пути в Беловском районе Кемеровской области между станциями Беловская ГРЭС – Черемшанка (рисунок 3.4). Требовалось выполнить создание топографического плана масштаба 1: 1 000 полосой 200 м и построить продольные профили [157].

Из-за сложного рельефа и наличия большого количества растительности данных МЛС в пределах полосы съемки оказалось недостаточным для построения точной ЦМР. Согласно таблице 1.7 для выполнения топографической съемки на такой территории в описанной ситуации необходимо выполнять досъемку с помощью метода ВЛС. В противной ситуации возможно выполнить досъемку с помощью тахеометрической и ГНСС-съемки. Разработанная методология интеграции данных ДЗЗ с целью создания ГПМ территории и цифровой продукции, представленная в 2.4, допускает применение дополнительных наземных методов сбора пространственных данных, к которым относятся тахеометрическая и ГНСС-съемка.

Описание схемы сканирования этого участка железной дороги было приведено в 3.2.2.1. Предварительная обработка была выполнена по технологической схеме, приведенной в 3.2.1. Затем в результате анализа массива ТЛЮ были определены координаты мест досъемки теневых зон. Результаты досъемки объединялись с массивом ТЛЮ, после чего создавался топографический план в Microstation и MapInfo.

ЦМР для отображения горизонталей топографического плана строилась в результате сочетания данных досъемки и массива ТЛЮ. В Microstation выполнялась векторизация контуров объектов (рисунок 5.22, а), которые затем вместе с построенными горизонталями импортировались в MapInfo для окончательного оформления (рисунок 5.22, б).

Таким образом, был создан топографический план масштаба 1: 1 000 по данным МЛС, тахеометрической и ГНСС-съемок. Комбинацию этих методов съемки в первую очередь следует применять при большой полосе съемки и сложном релье-

ефе местности в случае отсутствия возможности дополнительного применения методов АФС и ВЛС.

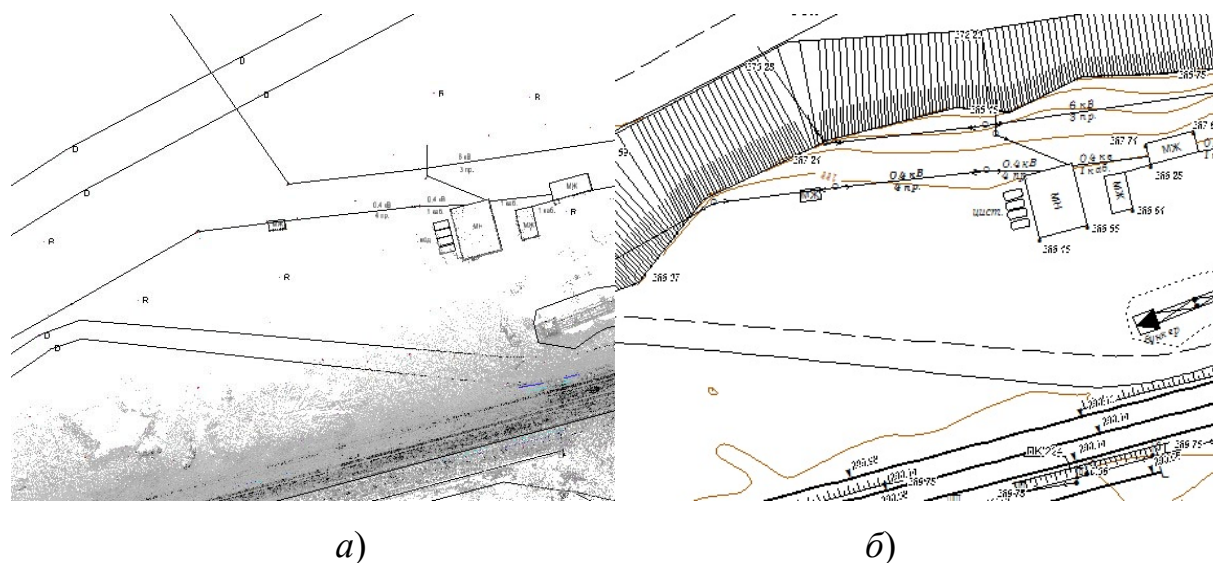


Рисунок 5.22 – Процесс создания топографического плана масштаба 1: 1 000
 а) контура топографического плана; б) оформленный топографический план

5.4 Выводы по пятому разделу

Трехмерные точечные ПИМ и ГПМ, построенные по данным ДЗЗ, являются основой создания цифровой продукции и решения различных метрических задач. В соответствии с рассмотренными в 2.2 теоретическими основами сбора и обработки данных ДЗЗ для формирования единого геопространства объектов транспортной инфраструктуры и представленной в 2.5 технологией геопространственного моделирования в качестве промежуточного этапа по трехмерным точечным ПИМ и ГПМ для решения отдельных задач могут создаваться трехмерные векторные ПИМ и ГПМ в виде геометрических примитивов, твердых тел или поверхностей. В диссертационной работе была усовершенствована технологическая схема создания таких трехмерных векторных геопространственных моделей объектов. Исследования схемы и создание векторных твердотельных моделей выполнялись по данным различных объектов, относящихся к сфере ТИ – АЗС и одно из складских помещений г. Новосибирска.

В соответствии с технологией геопространственного моделирования на точность создания трехмерных векторных ПИМ и ГПМ также оказывает правильно подобранное геодезическое оборудование. Чтобы показать это влияние, были выполнены соответствующие исследования на примере решения задач создания обмерных чертежей и мониторинга технического состояния автомобильных дорог по данным НЛС территории студенческого городка СГУГиТ.

Для решения задачи мониторинга технического состояния автомобильных дорог была разработана соответствующая методика, где ПИМ и ГПМ выступают в качестве исходных материалов. Предложенная методика позволяет построить ЦМП дорожного полотна, ЦМР придорожной полосы и полосы отвода. Исследования показали, что ЦМП дорожного полотна позволяет выявить различные крупные и мелкие дефекты, определить ровность.

Для территории железнодорожного транспорта разработанная система технологических решений и методик сбора и обработки данных ДЗЗ была применена для следующих задач: исполнительная съемка железных дорог, создание масштабных планов железнодорожных станций и топографических планов железных дорог, мониторинг зон затопления. Все они были объединены в общую технологическую схему применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта. Апробация технологической схемы по данным АФС с БВС выполнялась при исполнительной съемке железных дорог перегона Тягун-Аламбай; создания масштабного плана железнодорожной станции Камень-на-Оби; топографического плана и ЦМР Любинского района Омской области с целью мониторинга зон затопления. По данным МЛС апробация выполнялась для однопутной железной дороги Беловского района Кемеровской области.

Все выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможность применения системы методик сбора и обработки данных ДЗЗ, базирующейся на технологии геопространственного моделирования, для решения всех задач при эксплуатации и развитии ТИ Российской Федерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации осуществлено системное решение актуальной научной проблемы приведения в соответствие скорости и точности обработки разнородных данных дистанционного зондирования к нормативным и регламентным требованиям дорожной отрасли, что обеспечивается предложенной методологией сбора и обработки разнородных данных дистанционного зондирования для наземной транспортной инфраструктуры. Предложенное теоретическое обоснование послужило основой разработки алгоритмов автоматизированной обработки и методик интеграции данных, полученных различными съемочными и измерительными системами. Основные научные и практические результаты выполненного диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен информационно-аналитический анализ современных научно-технических разработок, связанных с проблематикой обработки данных дистанционного зондирования Земли и создания геопространственных моделей объектов транспортной инфраструктуры, в результате которого обозначена проблема организации эффективного управления дорожной отраслью, обусловленная отсутствием теоретического обоснования по выбору критериев для оптимальных методов сбора пространственных данных, отсутствием разработанной структуры единого геопространства территории транспортной инфраструктуры;

– разработаны методологические принципы интеграции данных дистанционного зондирования Земли, которые позволили дать теоретическое обоснование для разработки технологии геопространственного моделирования с целью решения всех научно-технических задач дорожной отрасли в соответствии с предложенной классификацией требуемой точности и достаточной детальностью создаваемых геопространственных моделей транспортной инфраструктуры;

– предложена структура единого геопространства территории транспортной инфраструктуры, позволяющая представить этапы сбора и обработки пространственных данных в виде системы технологических решений, необходимых для со-

здания координатного пространства и решения актуальных научно-технических задач дорожной отрасли с необходимой точностью, соответствующей предложенной классификации;

– разработана методология интеграции данных дистанционного зондирования Земли в структуру единого геопространства, что позволяет существенно повысить эффективность совместной обработки геопространственной информации объектов дорожной отрасли в едином координатном пространстве транспортной инфраструктуры;

– разработана технология геопространственного моделирования территории транспортной инфраструктуры, состоящая из предложенной системы технологических решений и соответствующих методик, позволяющая создавать соответствующие геопространственные модели, что расширит транспортную доступность регионов Российской Федерации и условия ее национальной безопасности;

– выполнена апробация разработанной технологии геопространственного моделирования для развития наземной транспортной инфраструктуры на примере автомобильных и железных дорог Российской Федерации, которая показала высокую эффективность предложенной системы технологических решений.

Результаты выполненных исследований рекомендуется использовать для геопространственного моделирования территорий автомобильной и железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в расширении области применения полученных результатов и повышения уровня автоматизации обработки данных ДЗЗ для решения отдельных узкоспециализированных задач сферы ТИ.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ICP	–	итеративный алгоритм ближайших точек
VBDVI	–	вегетационный индекс в видимом диапазоне
BIM	–	информационное моделирование зданий
САПР	–	система автоматизированного проектирования
ИМД	–	информационное моделирование дорог
АПК	–	аппаратно-программный комплекс
АФС	–	аэрофотосъемка
БВС	–	беспилотное воздушное судно
ВЛС	–	воздушное лазерное сканирование
ГИС	–	геоинформационная система
ГНСС	–	глобальная навигационная спутниковая система
ГПМ	–	геопространственная модель
ДЗЗ	–	дистанционное зондирование земли
ЕГП	–	единое геопространство
ИНС	–	инерциальная навигационная система
КС	–	космическая съемка
ЛС	–	Лазерное сканирование
ЛЭП	–	линия электропередач
МЛС	–	мобильное лазерное сканирование
НЛС	–	наземное лазерное сканирование
НФС	–	наземная фотосъемка
ОТИ	–	объект транспортной инфраструктуры
ПВО	–	планово-высотное обоснование
ПЗС	–	прибор с зарядовой связью
ПИМ	–	пространственно-информационная модель
ПЛА	–	пилотируемые летательные аппараты
ПО	–	программное обеспечение

СКО	–	средняя квадратическая ошибка
ТИ	–	транспортная инфраструктура
ТЛО	–	точки лазерных отражений
ЦММ	–	цифровая модель местности
ЦМО	–	цифровая модель объектов
ЦМП	–	цифровая модель поверхности
ЦМР	–	цифровая модель рельефа
ЭВзаимО	–	элементы взаимного ориентирования
ЭВнешО	–	элементы внешнего ориентирования
ЭВнутО	–	элементы внутреннего ориентирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Алгоритмы последовательного анализа многоспектральных аэрокосмических снимков на основе использования структурно-статистического подхода при дешифрировании природных объектов / А. П. Гук, М. А. Алтынцев, Л. Г. Евстратова, М. А. Алтынцева. – Текст : непосредственный // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019): Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием, Бердск, 26 – 30 августа 2019 г. / ИВТ СО РАН. – Новосибирск, 2019. – С. 77–83.

2 Алтынов, А. Е. Исследование влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы (аэрофотосъемки, лазерного сканера) на точность создания ЦММ с помощью имитационного моделирования / А. Е. Алтынов, Мохаммад Акель Амин. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 5. – С. 110–120. – DOI: 10.17513/use.37833.

3 Алтынцев, М. А. Дешифрирование космических снимков лесных массивов с применением структурно-статистического подхода / М. А. Алтынцев, М. А. Алтынцева. – Текст : непосредственный // От снимка к цифровой реальности: ДЗЗ и фотограмметрия : Материалы 19-й Международной научно-технической конференции, Сеул, Южная Корея, 28 – 31 октября 2019 г. – С. 3–10.

4 Алтынцев, М. А. Влияние результатов предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования на точность построения цифровых моделей поверхности автомобильных дорог / М. А. Алтынцев, Каркокли Хамид Маджид Саббер. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020 : сборник материалов в 8 томах XVI Международного научного конгресса, Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 74–85. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-1-74-85.

5 Алтынцев, М. А. Выбор методики составления топографических планов

нефтегазовых объектов в зависимости от метода съемки / М. А. Алтынцев, М. А. Алтынцева. – Текст : непосредственный // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. – Москва : Издательство Московского университета, 2020. – Т. 26, Ч. 1. – С. 447–463. – DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-447-463.

6 Алтынцев, М. А. Исследование результатов обработки полученных различными моделями наземных лазерных сканеров данных для контроля качества ремонта автомобильных дорог / М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 5–17. – DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-5-17.

7 Алтынцев, М. А. Исследование статистических свойств спектральных характеристик растительности. Непараметрический подход / М. А. Алтынцев, М. М. Шляхова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 58–69. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-4-58-69.

8 Алтынцев, М. А. Методика автоматизированного уравнивания данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 5–23. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-4-5-23.

9 Алтынцев, М. А. Методика автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 5–19. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19.

10 Алтынцев, М. А. Методика интеграции данных наземного и воздушного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 26–41. – DOI: 10.30533/GiA-2023-007.

11 Алтынцев М. А. Методика интеграции данных мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъемки для создания цифровой модели местности / М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 5–18. – DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-5-5-18.

12 Алтынцев, М. А. Методика предварительной обработки данных воздушного лазерного сканирования, полученных с применением беспилотных воздушных судов / М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2023. – № 6. – С. 30–41. – DOI: 10.22389/0016-7126-2023-996-6-30-41.

13 Алтынцев, М. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, П. А. Карпик – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 121–139. – DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139.

14 Алтынцев, М. А. Особенности построения трехмерных метрических моделей по данным лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, П. А. Карпик. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020 : сборник материалов в 8 томах XVI Международного научного конгресса, Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 113–122. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-4-1-113-122.

15 Алтынцев, М. А. Особенности предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019 : сборник материалов в 9 томах XV Международного научного конгресса, Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 239–248. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-1-1-239-248.

16 Алтынцев, М. А. Привязка данных мобильного лазерного сканирования к результатам аэрофотосъемки на основе определения взаимного положения массивов точек / М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 5–14. – DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-4-5-15.

17 Алтынцев, М. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для исполнительной съемки железных дорог / М. А. Алтынцев, И. В. Щербаков, С. А. Третьяков. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019 : сборник материалов в 9 томах XV Международного научного конгресса, Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 111–118. – DOI: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-111-118.

18 Алтынцев, М. А. Применение наземного лазерного сканирования для оценки качества укладки асфальтового покрытия / М. А. Алтынцев, М. А. Алтынцева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021 : сборник материалов в 8 томах XVII Международного научного конгресса, Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 75–84. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-1-75-84.

19 Алтынцев, М. А. Применение технологии лазерного сканирования для контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов / М. А. Алтынцев, М. А. Алтынцева. – Текст : непосредственный // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. / Издательство Московского университета. – Москва, 2021. – Т. 27, № 1. – С. 377–393. – DOI 10.35595/2414-9179-2021-1-27-377-393.

20 Алтынцев, М. А. Применение технологии лазерного сканирования для моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре / М. А. Алтынцев, А. В. Чернов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2018. – № 9. – С. 52–63. – DOI: 10.22389/0016-7126-2018-939-9-52-63.

21 Алтынцев, М. А. Применение технологии наземного лазерного сканирования для создания обмерных чертежей фасадов зданий / М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 3. – С. 5–23. – DOI:

10.33764/2411-1759-2022-27-3-5-18.

22 Алтынцев, М. А. Совместная обработка данных мобильного лазерного сканирования и цифровой наземной фотосъемки для построения единого массива точек / М. А. Алтынцев, М. А. Иптышева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018 : сборник материалов XIV Международного научного конгресса, Новосибирск, 23 – 27 апреля 2018 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 87–95.

23 Алтынцев, М. А. Создание масштабного плана в ГИС с использованием данных БПЛА / М. А. Алтынцев, И. В. Щербаков, М. А. Алтынцева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020 : сборник материалов в 8 томах XVI Международного научного конгресса, Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 86–92. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-1-86-92.

24 Алтынцев, М. А. Создание метрической имитационной модели «цифрового двойника» активным методом дистанционного зондирования земли / М. А. Алтынцев, П. А. Карпик – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 58–67. – DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-58-67.

25 Алтынцев, М. А. Уравнивание данных воздушного лазерного сканирования для создания поверхности дорожного полотна / М. А. Алтынцев, А. В. Антипов. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии сбора и обработки геопространственных данных для управления природными ресурсами: сб. материалов междунар. конф. – Алматы, Республика Казахстан: Казахский национальный технический университет имени К. И. Сатпаева, 2012. – С. 24–31.

26 Алтынцева, М. А. Автоматизированная сегментация и классификация данных мобильного лазерного сканирования для векторизации контурной части топографического плана городской территории / М. А. Алтынцева, А. В. Комиссаров,

М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 6. – С. 32–43. – DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-32-43.

27 Аманова, А. К. Разработка методики трехмерного моделирования объектов ситуации и рельефа городской территории по данным наземного лазерного сканирования г. Томска / А. К. Аманова, А. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010: : сборник материалов в 3 томах VI Международного научного конгресса, Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2010. – Т. 3 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 79–83.

28 Амр Махмуд Абдалла Елшештави. Разработка методики использования материалов, полученных с БВС, для картографирования линейных объектов : специальность 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Амр Махмуд Абдалла Елшештави ; Государственный университет по землеустройству. – Москва, 2022. – 145 с. – Текст : непосредственный.

29 Анализ методов получения и обработки данных для формирования 3D-модели генерального плана объекта недвижимости / А. В. Чернов, С. Р. Горобцов, М. А. Алтынцев, А. А. Харазян, Д. В. Гоголев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2024. – № 4. – С. 30-40. – DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1006-4-30-40.

30 Андреева, О. А. Разработка методики геоинформационного моделирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта : специальность 25.00.35 «Геоинформатика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Андреева Ольга Александровна ; Московский государственный университет геодезии и картографии. – Москва, 2021. – 218 с. – Текст : непосредственный.

31 Аникеева, И. А. Факторы, критерии и требования к изобразительному качеству материалов аэрофотосъемки, получаемой для целей картографирования / И.

А. Анিকেева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 104–119. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-104-119.

32 Антипов, И. Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции / И. Т. Антипов. – Москва : Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 296 с. – ISBN 5-86066-055-3. – Текст : непосредственный.

33 Априорная оценка точности создания трехмерной цифровой модели местности по данным наземного лазерного сканирования / А. В. Комиссаров, Т.А. Широкова, А. В. Комиссаров, Е.А. Егорченкова, Н.С. Коротченко. – Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. – 2012. – № 12. – С. 58–60.

34 Береговой, Д. В. Создание топографических планов на основе данных съемки с беспилотного летательного аппарата и автоматизации процесса дешифрирования : специальность 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. В. Береговой ; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2018. – 136 с. – Текст : непосредственный.

35 Берлянт, А. М. Геоиконика / А. М. Берлянт. – Москва : Астрей, 1996. – 208 с. – ISBN 5-7594-0025-8. – Текст : непосредственный.

36 Бойков, В. Н. САПР автодорог – перспективы развития / В. Н. Бойков. – Текст : непосредственный // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2013. – Т. 1, № 1. С. 6–9. – DOI: 10.17273/CADGIS.2013.1.1.

37 Брынь, М. Я. Сравнительная оценка мобильного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотной авиационной системы и съемки с комплексной дорожной лаборатории при выполнении диагностики автомобильных дорог / М. Я. Брынь, Д. Р. Баширова, А. Г. Багишян. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2021. – Т. 18, № 2. – С. 211–221. – DOI: 10.20295/1815-588X-2021-2-211-221.

38 Булгаков, С. В. Особенности пространственного моделирования / С. В. Булгаков. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ МИРЭФ. – 2014. – Т. 3, № 2. – С. 145–155.

39 Вербная, В. П. Оптимальный метод выбора лазерного сканера для раз-

личных видов инженерно-технических работ / В. П. Вербная, В. С. Хорошилов, А. В. Комиссаров. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015 : сборник материалов в 2 томах XI Международного научного конгресса, Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 204–208.

40 Военные применения лазеров / В. А. Борейшо, Д. В. Клочков, М. А. Коняев, Е. Н. Никулин. – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет, 2015. – 103 с. – ISBN 978-5-85546-906-6. – Текст : непосредственный.

41 ВСН 208-89. Инженерно-геодезические изыскания железных и автомобильных дорог. – Москва : Минтрансстрой СССР, 2014. – Текст : непосредственный.

42 ГКИНП-02-033-82. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 : изд. офиц. : утв. Приказом № 436 п главным управлением геодезии и картографии при Совете Министров СССР от 5 окт. 1979 г. : дата введ. 1983-01-01. – Москва : Недра, 1982. – 148 с.

43 Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва : Техносфера, 2006. – 1072 с. – ISBN 5-94836-028-8. – Текст : непосредственный.

44 Горбачев, В. А. Плотная реконструкция рельефа местности на основе модифицированного алгоритма полуглобального стерео отождествления / В. А. Горбачев. – Текст : непосредственный // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 2. – С. 66–77.

45 Гордиенко, А. С. Разработка методики многоступенчатого дешифрирования космических снимков / А. С. Гордиенко, М. А. Алтынцев, С. А. Арбузов. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 29–33.

46 Горелик, А. Л. Методы распознавания : учебное пособие. 2-е изд. / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – Москва : Высшая школа, 1984, – 208 с. – Текст : непосредственный.

47 ГОСТ 21.701–2013. Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации автомобильных дорог. – Москва : Стандартинформ, 2014. – Текст : непосредственный.

48 ГОСТ 21.702–2013. Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации железнодорожных путей. – Москва : Стандартинформ, 2014. – Текст : непосредственный.

49 ГОСТ 32825–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия. Методы измерения геометрических размеров повреждений. – Москва : Стандартинформ, 2015. – Текст : непосредственный.

50 ГОСТ 32836–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Изыскания автомобильных дорог. Общие требования – Москва : Стандартинформ, 2016. – 57 с. – Текст : непосредственный.

51 ГОСТ 32869–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению топографо-геодезических изысканий. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 40 с. – Текст : непосредственный.

52 ГОСТ 32948–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Опоры дорожных знаков. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный.

53 ГОСТ 32953–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Разметка дорожная. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный.

54 ГОСТ 32963–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Расстояние видимости. Методы измерений (переиздание). – Москва : Стандартинформ, 2019. – 18 с. – Текст : непосредственный.

55 ГОСТ 33101–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия. Методы измерения ровности. – Москва : Стандартинформ, 2016. – Текст : непосредственный.

56 ГОСТ 33220–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к эксплуатационному состоянию. – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст :

непосредственный.

57 ГОСТ 33383–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Геометрические элементы. Методы определения параметров. – М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с. – Текст : непосредственный.

58 ГОСТ 33388–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению диагностики и паспортизации. – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный.

59 ГОСТ 56905–2016. Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного наследия. Общие требования. Национальный стандарт Российской Федерации. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 24 с. – Текст : непосредственный.

60 ГОСТ 58349–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Методы измерения толщины слоев дорожной одежды. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 19 с. – Текст : непосредственный.

61 ГОСТ 9238–2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. – Москва : Стандартинформ, 2014. – Текст : непосредственный.

62 ГОСТ Р 52440–2005. Модели местности цифровые. Общие требования: дата введения 2006.07.01. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 8 с.

63 ГОСТ Р 53606–2009. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических и землеустроительных работ. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2011. – Текст : непосредственный.

64 ГОСТ Р 56925–2016. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий. – Москва : Издательство стандартов, 2016. – 11 с. – Текст : непосредственный.

65 ГОСТ Р 58854–2020 Фотограмметрия. Требования к созданию ориентированных аэроснимков для построения стереомоделей застроенных территорий. – Москва : Стандартинформ, 2020. – Текст : непосредственный.

66 ГОСТ Р 59328–2021 Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 34 с. – Текст : непосредственный.

67 ГОСТ Р 70689-2023. Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Общие требования к проведению работ. – Москва : Стандартинформ, 2023. – Текст : непосредственный.

68 ГОСТ Р 70690–2023. Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги. – Москва : Стандартинформ, 2023. – Текст : непосредственный.

69 Гук, А. П. Автоматическая идентификация соответственных точек на аэроснимках лесных массивов / А.П. Гук, М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 68–77.

70 Гук, А. П. Автоматический выбор и идентификация характерных точек на разновременных разномасштабных аэрокосмических снимках / А. П. Гук, Иехиа Хассан Мики Хассан. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 2. – С. 66–68.

71 Гук, А. П. Использование метода независимых компонент при дешифрировании снимков лесных массивов / А. П. Гук, С. А. Арбузов, А. А. Гук. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014 : сборник материалов в 2 томах X Международного научного конгресса, Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – С. 3–7.

72 Гук, А. П. Исследование критериев оценки эффективности статистических непараметрических методов для дешифрирования лесных массивов / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова // Материалы V Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» / Сиб. федер. ун-т. – Красноярск, 2018. – С. 12–15.

73 Гук, А. П. Методы и технологии распознавания объектов по их изображе-

нию : учеб.-метод. пособие / А. П. Гук, Е. П. Хлебникова. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – 138 с. – ISBN 978-5-907052-39-0. – Текст : непосредственный.

74 Гук, А. П. Особенности современного этапа развития средств дистанционного зондирования / А. П. Гук, М. М. Шляхова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018 : сборник материалов в 2 томах XIV Международного научного конгресса, Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – С. 7–13.

75 Гук, П. Д. Технология создания карт фототопографическими методами : учебное пособие / П. Д. Гук. – Новосибирск: НИИГАиК, 1990. – 69 с. – ISBN 5-230-11669-3. – Текст : непосредственный.

76 Догополов, Д. В. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования земли / Д. В. Догополов, М. Ю. Баборыкин, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021 : сборник материалов в 8 томах XVII Международного научного конгресса, Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология», № 1. – С. 25–32. – DOI: 10.3364/2618-981X-2021-1-25-32.

77 Долгополов, Д. В. Теоретическое обоснование разработки технологий аэрокосмических исследований для создания геопространственных моделей систем трубопроводного транспорта : специальность 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Долгополов Даниил Валентинович ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2023. – 233 с. – Текст : непосредственный.

78 Дробышев, Ф. В. Основы аэрофотосъемки и фотограмметрии / Ф. В. Дро-

бышев. – Москва : Недра, 1973. – 287 с. – Текст : непосредственный.

79 Дуглас, К. Rapideye: космическая съемка Земли и не только / К. Дуглас, М. Хайнен. – Текст : непосредственный // Геоматика. – 2010. – № 4. – С. 64–67.

80 Жидов, В. М. Создание электронной версии масштабных планов железнодорожных станций / В. М. Жидов, О. В. Ковалева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019 : сборник материалов в 9 томах XV Международного научного конгресса, Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 184–189. – DOI: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-184-189.

81 Журкин, И. Г. Геоинформационные системы / И. Г. Журкин, С. В. Шайтура. – Москва : КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. – 272 с. – ISBN 978-5-91136-065-8. – Текст : непосредственный.

82 Интеграция геопространственных данных на основе трехмерного моделирования для экологической оценки городских территорий / Л. К. Трубина, Т. А. Хлебникова, О. Н. Николаева, Е. Н. Кулик. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 83–86.

83 Исследование достоверности определения лесотаксационных характеристик по данным воздушного лазерного сканирования / В. И. Кузин, Р. А. Попов, М. А. Алтынцев, С. А. Арбузов. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – №4/С. – С. 54–57.

84 Камнев, И. С. Исследование технологии лазерного сканирования при инженерно-геодезических изысканиях для ремонта автодороги / И. С. Камнев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 67–77.

85 Каркищенко, А. Н. Метод распознавания объектов по данным лазерного сканирования на основе спектральной теории графов / А.Н. Каркищенко, С.П. Левашев. – Текст : непосредственный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 72–85. – DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-72-8.

86 Каркокли Хамид Маджид Сабер. Влияние плотности размещения соответ-

ственных точек на результаты уравнивания данных мобильного лазерного сканирования / Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021 : сборник материалов в 8 томах XVII Международного научного конгресса, Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 65–74. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-1-65-74.

87 Каркокли Хамид Маджид Сабер. Разработка методик предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования : специальность 1.6.22 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каркокли Хамид Маджид Сабер; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2022. – 116 с. – Текст : непосредственный.

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

89 Кашкин, В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учебное пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин – Москва : Логос, 2001. – 264 с. – ISBN 5-94010-138-0. – Текст : непосредственный.

90 Климков, Ю. М. Взаимодействие лазерного излучения с веществом : учебное пособие / Ю. М. Климков, В. С. Майоров, М. В. Хорошев ; Московский государственный университет геодезии и картографии. – Москва : МИИГАиК, 2014. – 108 с. – Текст : непосредственный.

91 Климков Ю. М. Лазерная техника: учебное пособие / Ю. М. Климков, М. В. Хорошев. – Москва : МИИГАиК, 2014. – 143 с. – Текст : непосредственный.

92 Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований. Аэрокосмические методы географических исследований / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – Москва : Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с. – ISBN 5-7695-1529-5. – Текст : непосредственный.

93 Ковалева, О. В. Применение современных геодезических технологий и

спутниковых систем позиционирования при съемке железнодорожных станций / О. В. Ковалева, В. М. Жидов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019 : сборник материалов в 9 томах XV Международного научного конгресса, Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 165–172. – DOI: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-165-172.

94 Комиссаров, А. В. Автоматизированные технологии сбора и обработки пространственных данных : учебник / А. В. Комиссаров, Е. Н. Кулик. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 307 с. – ISBN 978-5-87693-988-3. – Текст : непосредственный.

95 Комиссаров, А. В. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование: учеб.-метод. пособие / А. В. Комиссаров ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 58 с. – ISBN 978-5-907052-90-1. – Текст : непосредственный.

96 Комиссаров, А. В. Метод активного дистанционного зондирования: лазерное сканирование : монография / А. В. Комиссаров, М. А. Алтынцев ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 254 с. – ISBN 978-5-907320-44-4. – Текст : непосредственный.

97 Комиссаров, А. В. Методика совместного получения и обработки данных наземного лазерного сканирования и цифровой фотосъемки / А. В. Комиссаров, М. С. Калинина. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 39–42.

98 Комиссаров, А. В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Комиссаров Александр Владимирович ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2015. – 278 с. – Текст : непосредственный.

99 Кочнева, А. А. Создание цифровых моделей рельефа для проектирования автодорог на основе технологии воздушного лазерного сканирования / А. А. Кочнева, М. Г. Мустафин. – Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. – 2015. – № 2. – С. 91–95.

100 Краснопевцев, Б. В. Фотограмметрия / Б. В. Краснопевцев. – Москва : УПП «Репрография» МИИГАиК, 2008. – 161 с. – Текст : непосредственный.

101 Кузин, В. С. Технический учет, паспортизация дорог и дорожных сооружений / В.С. Кузин, Б.И. Дагаев. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 7. – С. 92–94.

102 Кузовков, Н. Т. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Н. Т. Кузовков, О. С. Салычев. – Москва : Машиностроение, 1982. – 216 с. – Текст : непосредственный.

103 Куприянов, А. О. Глобальные навигационные спутниковые системы : учебное пособие / А. О. Куприянов. – Москва : МИИГАиК, 2017. – 76 с. – Текст : непосредственный.

104 Лабутина, И.А. Дешифрирование космических снимков : учеб. пособ. / И.А. Лабутина. – Москва : Аспект Пресс, 2004 – 184 с. – ISBN 5-7567-0330-6. – Текст : непосредственный.

105 Лаврентьева, И. С. Перспективы развития транспортной инфраструктуры / И. С. Лаврентьева. – Текст : непосредственный // Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 271–277.

106 Лаврова, Н. П. Космическая фотосъемка : учеб. пособие / Н. П. Лаврова. – Москва : Недра, 1983. – 288 с. – Текст : непосредственный.

107 Лисицкий, Д. В. Основные принципы цифрового картографирования местности / Д. В. Лисицкий. – Москва : Недра, 1988. – 264 с. – ISBN 5-247-00266-0. – Текст : непосредственный.

108 Лутина, Л. Э. Транспортная инфраструктура / Л. Э. Лутина ; Московский государственный технический университет гражданской авиации. – Москва : ИД

Академии Жуковского, 2021. – 36 с. – Текст : непосредственный.

109 Любимов, М. С. Распознавание объектов дорожной инфраструктуры с помощью полносверточной нейронной сети / М. С. Любимов, В. И. Лушков, А. А. Азарченков. – Текст : непосредственный // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. – Т. 6, № 4. – С. 38–43. – DOI: 10.30987/2658-3488-2019-2019-4-38-43.

110 Матвеев, В. В. Инерциальные навигационные системы : учебное пособие / В. В. Матвеев. – Тула : ТулГУ, 2012. – 199 с. – Текст : непосредственный.

111 Мачерет, Д. А. Перспективы развития транспортной инфраструктуры / Д. А. Мачерет, А. Ю. Ледней. – Текст : непосредственный // Транспорт РФ. – 2018. – Т. 78, № 5. – С. 16–22.

112 Медведев, В. И. Предварительная обработка данных мобильного лазерного сканирования в системе IndorCloud / В. И. Медведев, Д. С. Сарычев, А. В. Скворцов. – Текст : непосредственный // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 2 (3). – С. 67–74.

113 Медведев, Е. М. Лазерная локация земли и леса : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е. М. Медведев, И. М. Данилин, С. Р. Мельников. – Москва : Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с. – ISBN 5-903055-09-5. – Текст : непосредственный.

114 Медетов, А. А. Термин Big Data и способы его применения / А. А. Медетов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 11 (115). – С. 207–210.

115 Методика высокоточной бесконтактной исполнительной съемки навесных фасадных систем с воздушными зазорами при возведении высотных зданий. МДС 11-20.2009 / ООО «Тектоплан». – Москва : ОАО «ЦПП», 2010. – 41 с. – Текст : непосредственный.

116 Методические указания по составлению продольных профилей станционных путей и перегонов, утвержденные ОАО "РЖД" № ЦПТ-54/26 от 17.12.2008.

117 Михайлов, А. П. Фотограмметрия: Учебник для вузов / А. П. Михайлов,

А. Г. Чибуничев. – Москва : Изд-во МИИГаик, 2016. – 294 с. – ISBN 978-5-91188-070-5. – Текст : непосредственный.

118 Михайлюкова, П. Г. Методика мониторинга состояния объектов транспортной инфраструктуры по данным дистанционного зондирования / П. Г. Михайлюкова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013 : сборник материалов в 8 томах IX Международного научного конгресса, Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 7 : Междунар. науч. конф. «Раннее предупреждение и управление в кризисных и чрезвычайных ситуациях: предпринимаемые шаги и их реализация с помощью картографии, геоинформации, GPS и дистанционного зондирования». – С. 102–105.

119 Мсаллам, М. Методика регистрации 3д облаков точек с использованием коррекции плоскостей и корреляции гистограмм / М. Мсаллам, В. И. Сырякин. – Текст : непосредственный // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – Т. 61, № 1. – С. 73–89.

120 Мусихин, В. В. Создание цифровой модели местности с помощью данных радарной радиолокационной съемки / В. В. Мусихин, Ю. С. Курков. – Текст : непосредственный // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 9. – С. 116–124.

121 Назаров, А. С. Фотограмметрия : учеб. Пособие для студентов вузов / А. С. Назаров. – Минск : ТетраСистемс, 2006. – 368 с. – ISBN 985-470-402-5. – Текст : непосредственный.

122 Наземное лазерное сканирование объектов промышленных площадок на территории нефтегазовых месторождений / В. А. Бударова, Н. Г. Мартынова, А. В. Шереметинский, А. В. Привалов. – Текст : непосредственный // Московский экономический журнал. – 2019. – № 7. – С. 8–14. – DOI: 10.24411/2413-046X-2019-16004.

123 Нехин, С. С. Актуальные задачи нормативного регулирования в области топографического картографирования по материалам дистанционного зондирова-

ния / С. С. Нехин. – Текст : непосредственный // Приложение к журналу известия вузов. геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. – 2019. – № 10-1. – С. 64–68.

124 Нехин, С. С. Лазерное сканирование и перспективы его применения для целей топографического картографирования и кадастра / С. С. Нехин, Н. М. Бабашкин. – Текст : непосредственный // Вестник северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: науки о земле. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 29–39. – DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.011.

125 Никитин, А. В. Теория и методы геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры : специальность 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Никитин Андрей Вячеславович ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2018. – 230 с. – Текст : непосредственный.

126 Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения, помещения, машиноместа : приказ Росреестра от 23.10.2020 № П/0393. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

127 Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты / В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов, С. М. Зраенко, А. В. Сосновский, В. А. Тренихин; под общ. ред. В. Г. Коберниченко. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 168 с. – ISBN 978-5-7996-0867-5. – Текст : непосредственный.

128 ОДМ 218.3.105-2018. Методические рекомендации по организации взаимодействия участников разработки проектной и рабочей документации на пилотных проектах строительства, капитального ремонта и реконструкции автомобильных дорог с применением ВМ-технологии. – Москва : Росавтодор, 2018. – 85 с. – Текст : непосредственный.

129 ОДМ 218.4.039–2018. Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог. – Москва : Росавтодор, 2018. – 55 с. – Текст : непосредственный.

130 ОДМ 218.9.017–2019. Методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с использованием беспилотных летательных аппаратов при изысканиях в целях строительства и реконструкции автомобильных дорог. – Москва : Росавтодор, 2021. – 60 с. – Текст : непосредственный.

131 Орешкин, М. С. Перспективы экономической политики / М. С. Орешкин. – Текст : непосредственный // Экономическая политика. – 2018. – Т. 13, № 3. – С. 8–27. – DOI: 10.18288/1994-5124-2018-3-01.

132 Осипенко, Л. А. Аналитическая геометрия: учебное пособие / Л. А. Осипенко, Л. Н. Шеметова. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т, Институт математики, экономики и информатики, 2019. – 124 с. – ISBN 978-5-9624-1727-1. – Текст : непосредственный.

133 Оценка точности плотной цифровой модели поверхности и ортофотопланов, полученных по материалам аэрофотосъемки с БЛА серии Supercam / М. В. Шинкевич, Н. Г. Воробьева, М. А. Алтынцев, Р. А. Попов, С. А. Арбузов, А. В. Флоров. – Текст : непосредственный // Геоматика. – 2015. – № 4. – С. 37–41.

134 Патент № 2562368 Российская Федерация, МПК G01C 3/02 (2006.01). Способ определения параметров геометрических элементов автомобильной дороги и характеристик придорожной полосы : №2016101613 : заявл. 19.01.2016 : опубл. 22.03.2017 / Середович В. А., Середович А. В., Алтынцев М. А., Ткачева Г. Н. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Текст : непосредственный.

135 Патент № 2562368 Российская Федерация, МПК G06T 17/05 (2011/01). Способ трехмерного (3D) картографирования : № 2014139755/08 : заявл. 30.09.2014 : опубл. 10.09.2015 / Середович В. А., Середович А. В., Алтынцев М. А., Ткачева Г. Н. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное об-

разовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий». – Текст : непосредственный.

136 Петров, А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников / А. В. Петров. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10. – С. 56–66. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66.

137 ПНСТ 506-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Правила формирования информационных моделей на различных стадиях жизненного цикла. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – Текст : непосредственный.

138 Подольская, Е. С. Использование данных дистанционного зондирования земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве / Е. С. Подольская. – Текст : непосредственный // Вопрос лесной науки. – 2022. – Т. 5, № 4. – С. 1–21. – DOI: 10.31509/2658-607x-202252-115

139 Полетаев, А. М. Данные дистанционного зондирования Земли как объект стандартизации / А. М. Полетаев. – Текст : непосредственный // Информация и космос. – 2007. – № 2. – С. 117–124.

140 Правила назначения ремонтов железнодорожного пути. Распоряжение от 12 декабря 2021 г. № 2888/р.

141 Проблемы и перспективы использования наземного лазерного сканирования при обследовании резервуаров / Г. Г. Васильев, М. А. Лежнев, И. А. Леонович, А. П. Сальников. – Текст : непосредственный // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 1. – С. 21–24.

142 Проблемы нормативно-технического обеспечения создания пространственных данных по материалам дистанционного зондирования / Бабашкин Н. М., Кадничанский С. А., Нехин С. С., Яблонский Л. И. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017 : сборник материалов XIII Международного научного конгресса, Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г. / Сибирский государственный университет геосистем и геотехнологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – № S. –

Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 3–7.

143 Рис, У. Г. Основы дистанционного зондирования / У. Г. Рис. – Москва : Техносфера, 2006. – 336 с. – ISBN 5-94836-094-6. – Текст : непосредственный.

144 Рыбников, П. А. Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных авиационных и космических аппаратов для изучения горнопромышленных территорий / П. А. Рыбников, Д. А. Бузина. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 55–70. – DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_55.

145 Рыльский, И. А. Уравнивание данных лазерного сканирования в RIPROCESS / И. А. Рыльский. – Текст : непосредственный // Вестник науки и образования. – 2020. – № 15(93), Ч. 1. – С. 65–69.

146 Рышков, А.В. Транспортная инфраструктура основа долгосрочного социально экономического развития / А. В. Рышков, В. А. Максимушкин, С. Б. Постников. – Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. – 2016. – № 12. – С. 12–20.

147 Сабитова, Т. А. Сравнительный анализ традиционных методов построения топографических планов и трехмерного лазерного сканирования / Т. А. Сабитова, С. О. Яценко, Е. Д. Соболева. – Текст : непосредственный // Вестник волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2021. – Т. 82, № 1. – С. 79–88.

148 САПР-журнал. – Текст : электронный. – URL: <http://sapr-journal.ru/uroki-revit/uroki-revit-2-osnovnyie-terminy> (дата обращения: 20.04.2024).

149 Сафонов, Р. А. Типичные дефекты верхнего дорожного покрытия в России / Р. А. Сафонов. – Текст : непосредственный // Вестник южно-уральского государственного университета. серия: строительство и архитектура. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 75–84. – DOI: 10.14529/build200210.

150 Середович, А. В. Методика создания цифровых моделей объектов нефтегазопромыслов средствами наземного лазерного сканирования : специальность

25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Середович Александр Владимирович ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2007. – 165 с. – Текст : непосредственный.

151 Середович, В. А. Выбор методики уравнивания данных мобильного лазерного сканирования в зависимости от качества полученных данных и снимаемой территории / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, Р. А. Попов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014 : сборник материалов в 2 томах X Международного научного конгресса, Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 2 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 142–149.

152 Середович, В. А. Выявление изменений в инфраструктуре города по данным мобильного лазерного сканирования / В. А. Середович, Р. А. Попов, М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014 : сборник материалов в 2 томах X Международного научного конгресса, Новосибирск, 8 – 18 апреля 2014 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 2 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 156–160.

153 Середович, В. А. Исследование точности создания цифровых моделей рельефа и вычисления объемов насыпи и выемки горных пород на основе данных лазерного сканирования / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, Р. А. Попов. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – №5/С. – С. 66–71.

154 Середович, В. А. Исследование точности уравнивания данных мобильного лазерного сканирования / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, Е. С. Анцифиров. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013 : сборник материалов в 3 томах IX Международного научного конгресса, Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 3 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картогра-

фия, маркшейдерия». – С. 90–95.

155 Середович, В. А. Определение индекса ровности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, А. К. Егоров. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 33–44.

156 Середович, В. А. Особенности применения данных различных видов лазерного сканирования при мониторинге природных и промышленных объектов / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, Р. А. Попов. – Текст : непосредственный // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18.1 – С. 141–144.

157 Середович, В. А. Применение данных мобильного лазерного сканирования для создания топографических планов / В. А. Середович, М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013 : сборник материалов в 3 томах IX Международного научного конгресса, Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 3 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 96–100.

158 Скворцов, А. В. Жизненный цикл проектов автомобильных дорог в контексте информационного моделирования / А. В. Скворцов, Д. С. Сарычев. – Текст : непосредственный // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2015. – Т. 4, № 1. – С. 4–14. – DOI: 10.17273/CADGIS.2015.1.1.

159 Скворцов, А. В. Трудности перехода от автоматизированного проектирования к информационному моделированию дорог / А. В. Скворцов. – Текст : непосредственный // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2015. – Т. 5, № 2. – С. 4–12. – DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.1.

160 Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ / С. Абрамов, Д. А. Макаров, А. А. Талалаев, В. П. Фраленко. – Текст : непосредственный // Программные системы: теория и приложения. – 2018. – Т. 9, № 4 (39). – С. 417–442. – DOI 10.25209/2079-3316-2018-9-4-417-442.

161 Согорин А. А., Богданец Е. С. Исследование точности воздушного лазер-

ного сканирования / А. А. Согорин, Е. С. Богданец. – Текст : непосредственный // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2022. – Т. 1. – С. 479–484.

162 Соловьев, А. В. Метод автоматического определения одноименных точек для вычисления элементов взаимного ориентирования / А. В. Соловьев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 1. – С. 40–44.

163 СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. – Москва, 2005. – 72 с. – Текст : непосредственный.

164 СП 233.1326000.2015. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Высокоточная координатная система. – Москва : Минтранс России, 2015. – Текст : непосредственный.

165 СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – Москва : ЦНИИГАиК, 2016. – Текст : непосредственный.

166 Сравнительный анализ алгоритмов построения изображений подстилающей поверхности / В. А. Бочаров, Н. С. Каширов, Е. П. Чумикова, А. И. Гаврилов. – Текст : непосредственный // Молодежный научно-технический вестник. – 2014. – № 12 – С. 24.

167 Степанов, И. В. Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения. Состояние, проблемы, пути совершенствования / И. В. Степанов, Ю. А. Грачев. – Текст : непосредственный // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2015. – Т. 68, № 4. – С. 175–178.

168 Сутырина, Е. Н. Дистанционное зондирование земли : учеб. пособие / Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с. – ISBN 978-5-9624-0801-9. – Текст : непосредственный.

169 Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути, утвержденные распоряжением ОАО "РЖД" № 75р от 18.01.2013, редакция от 17.07.2017.

170 ТИМ КРЕДО 3D СКАН. – Текст : электронный // Кредо-Диалог : офици-

альный сайт. – 2024. – URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/tim-kredo-3d-scan.html> (дата обращения: 01.05.2024).

171 Тропченко, А. А., Методы вторичной обработки и распознавания изображений : учебное пособие / А. А. Тропченко, А. Ю. Тропченко. – СПб : Университет ИТМО, 2015. – 215 с. – ISBN 2227-8397. – Текст : непосредственный.

172 Трубина, Л. К. Методические подходы к созданию 3D-моделей для исследования экологического состояния городских территорий / Л. К. Трубина, Т. А. Хлебникова, О. Н. Николаева. – Текст : непосредственный // География и природные ресурсы. – 2017. – № 2. – С. 199–205. – DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(199-205).

173 Уставич, Г. А. Создание инженерных топографических планов для проектирования объектов в горной местности / Г. А. Уставич, А. П. Чахлова, Я. Г. Пошивайло. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 183–187.

174 Федотова, Г.А. Справочная энциклопедия дорожника. Т. 5. Проектирование автомобильных дорог / Г. А. Федотова, П. И. Поспелова. – Москва : Информавтор, 2007. – 1466 с. – Текст : непосредственный.

175 Фотограмметрия и дистанционное зондирование. Курс лекций: учебное пособие / А. А. Калинин, А. М. Бондаренко, Б. Н. Строгий, М. Н. Семенцов, И. А. Казачков, Ж. В. Матвейкина, Т. Ф. Самойлова; под ред. А. А. Калинина. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. – 98 с. – Текст : непосредственный.

176 Хамадж Наср Еддин. Формирование радиолокационного изображения с синтезированной апертурой / Хамадж Наср Еддин. – Текст : непосредственный // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 3. – С. 175–178.

177 Хлебникова, Е. П. Влияние нормирования яркости на достоверность дешифрирования многозональных космических снимков / Е. П. Хлебникова // Геодезия и картография. – 2005. – №12. – С. 24–28. – Текст : непосредственный.

178 Хлебникова, Т. А. Исследование и разработка технологии построения из-

мерительных трехмерных видеосцен по материалам аэрокосмических съемок : специальность 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Хлебника Татьяна Александровна ; Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск, 2011. – 251 с. – Текст : непосредственный.

179 Хлебникова, Т. А. Разработка технологической схемы сбора и обработки данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных авиационных систем для моделирования геопространства / Т. А. Хлебникова, Х. К. Ямбаев, О. А. Опритова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 106–118. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-1-106-118.

180 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования современных программных продуктов для моделирования геопространства / Т. А. Хлебникова, А. О. Опритова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, №. – С. 119–131.

181 Цветков, В. Я. Геоинформационное моделирование объектов транспортной инфраструктуры по данным мобильного лазерного сканирования / В. Я. Цветков, О. А. Андреева. – Текст : непосредственный // Изв. Вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2020. – Т. 64, № 3. – С. 354–360. – DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-3-354-360.

182 ЦПТ-54/27. Методические указания по составлению масштабных планов железнодорожных станций. – Москва, 2008. – Текст : непосредственный.

183 Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – Москва : Техносфера, 2013. – 312 с. – ISBN 978-5-94836-178-9. – Текст : непосредственный.

184 Чибуничев, А. Г. Автоматическая привязка снимков к облаку точек, полученному с помощью наземного лазерного сканера / А. Г. Чибуничев, В. П. Галахов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 84–89.

185 Чибуничев, А. Г. Автоматическое построение плотного облака точек по

множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек / А. Г. Чибуничев, А. П. Михайлов, В. В. Старшов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 2. – С. 14–18.

186 Чибуничев, А. Г. Фотограмметрия: учебник для вузов / А. Г. Чибуничев. – Москва : Изд-во МИИГАиК, 2022. – 328 с. – ISBN 978-5-91188-080-4. – Текст : непосредственный.

187 Чубукова, И. А. Data Mining : учебное пособие / И.А. Чубукова. – Москва : Интернет – Университет информационных технологий : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 382 с. – ISBN 978-5-94774-819-2. – Текст : непосредственный.

188 Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман ; пер. с англ. – 2-е изд. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с. – ISBN 978-5-87693-336-2. – Текст : непосредственный.

189 Шинкевич, Д. Н. Методика создания кадастровых планов автомобильной дороги с использованием аэрофотосъемки / Д. Н. Шинкевич. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2005 : сборник материалов в 7 томах I Международного научного конгресса, Новосибирск, 27–29 апреля 2005 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2005. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, картография, геоинформатика, экология, экономика», № 1. – С. 37–42.

190 Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование методы и модели обработки изображений / Р. А Шовенгердт. – Москва : Техносфера, 2013. – 592 с. – ISBN 978-5-94836-244-1. – Текст : непосредственный.

191 Шокер Хуссейн Мухаммад. Геодезическое обеспечение обмерной фиксации объектов культурного наследия на основе применения лазерно-сканирующей съемки : специальность 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шокер Хуссейн Мухаммад ; ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – Санкт-Петербург, 2021. – 131 с. – Текст : непосредственный.

192 Шоломицкий, А. А. Особенности обработки и анализа результатов наземного лазерного сканирования при геодезическом мониторинге земляных дамб / А. А. Шоломицкий, Р. Р. Ханнанов, Е. А. Олейникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 31–41. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-31-40.

193 Щербаков, В. В. Разработка и исследование комплекса технологических решений автоматизации геодезического обеспечения реконструкции и ремонта железнодорожных путей : специальность 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Щербаков Владимир Васильевич ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2020. – 211 с. – Текст : непосредственный.

194 Щербаков, И. В. Аппаратно-программный комплекс «Профиль-М» для определения пространственных и геометрических параметров рельсовой колеи / И. В. Щербаков. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 60–71.

195 Якушев, Д. А. Высокоточное трехмерное моделирование инфраструктуры железнодорожного транспорта с помощью ПО Bentley Systems / Д. А. Якушев. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – 2015. – № 4. – С. 4–8.

196 Якушев, Д. А. Автоматизация мониторинга состояния инфраструктуры ж/д транспорта в высокоточном координатном пространстве по данным мобильного лазерного сканирования : специальность 05.13.17 «Теоретические основы информатики» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. А. Якушев ; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук. – Москва, 2016. – 191 с. – Текст : непосредственный.

197 A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements / A. Jaakkola, J. Huuppa, A. Kukko, X. Yu, H. Kaartinen H., M. Lehtomäki, Y. Lin Y. – Текст : непосредственный // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2010. – Vol. 65 (6). – P. 514–522. – DOI: 10.1016/j.is-

prsjprs.2010.08.002.

198 A railway track geometry measuring trolley system based on aided INS / Q. Chen, X. Niu, L. Zuo, T. Zhang, F. Xiao, Y. Liu, J. Liu. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2018. – Vol. 18(2), – 538. – DOI: 10.3390/s18020538.

199 A review of algorithms for filtering the 3D point cloud / J. S. Jin, M.-J. Wang, W. Jiang, L. Gao., L. Xiao. – Текст : непосредственный // Signal Processing: Image Communication. – 2017. – Vol. 57. – P. 103–112.

200 A Review of Deep Learning-based Semantic Segmentation for Point Cloud / J. Zhang, X. Zhao, Z. Chen, Z. Lu. – Текст : непосредственный // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 179118–179133. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2958671.

201 A survey of mobile laser scanning applications and key techniques over urban areas / Y. Wang, Q. Chen., Q. Zhu, L. Liu, C. Li, D. Zheng. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11(13), 1540.

202 Accuracy assessment of direct georeferencing for photogrammetric applications on small unmanned aerial platforms / O. Mian, J. Lutes, G. Lipa, J. J. Hutton, E. Gavelle, S. Borghini. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2016. – Vol. XL-3/W4. – P. 77–83. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-77-2016.

203 Airborne lidar point cloud classification fusion with DIM point cloud / M. Zhou, Z. Kang, Z. Wang, M. Kong. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2020. – Vol. XLIII-B2-2020. – P. 375–382. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-375-2020.

204 Akturk, E. Accuracy assessment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain / E. Akturk, A. O. Altunel. – Текст : непосредственный // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – 2019. – Vol. 136. – P. 382–386. – DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.101.

205 Altyntsev, M. A. Automated Recognition of Roadbed Deformations (defects) Using Laser Scanning Data / M. A. Altyntsev. – Текст : непосредственный // International Workshop "Integration of Point- and Area-wise Geodetic Monitoring for Structures

and Natural Objects". – April, 2014. – Novosibirsk: SSGA. – P. 147–151.

206 Altyntsev, M. A. Impact of atmospheric conditions and a scanned surface type on laser scanning results / M. A. Altyntsev, V. G. Salnikov, E. A. Popp. – Текст : непосредственный // 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 115601U, 12 November 2020. – Proc. SPIE 11560. – DOI 10.1117/12.2575562.

207 Altyntsev, M. A. Relative adjustment of mobile laser scanning data in different scenes / M. A. Altyntsev. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2022. – Vol. V-1-2022. – P. 111–120. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-625-2019.

208 Altyntsev, M. A. The Analysis of GPS signal short-term loss influence on the accuracy of mobile laser scanning data / M. A. Altyntsev, R. A. Popov. – Текст : непосредственный // XXV FIG Congress. – 2014. – Malaysia, Kuala Lumpur.

209 Altyntsev, M. A. The challenge of automation for large scale topographic mapping of oil and gas deposits based on terrestrial laser scanning data / M. A. Altyntsev, M. A. Altyntseva. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2022. – Vol. XLIII-B2. – P. 161–167. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-161-2022.

210 Altyntsev, M. A. The study of mobile laser scanning data adjustment results for large scale topographic mapping / M. A. Altyntsev, Karkokli Hameed Majeed Saber. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2020. – Vol. 43(B2). – P. 197–203. – DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-197-2020.

211 An integrated approach for modelling and global registration of point clouds / T. Rabbani, S. Dijkman, F. van den Heuvel, G. Vosselman. – Текст : непосредственный // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2007. – Vol. 61 (6). – P. 355–370. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2006.09.006.

212 Application of laser scanning in the REDUS layout / M. A. Altyntsev, A. V. Ivanov, O. Schuster, H. F. Schuster, L. Gerdau. – Текст : непосредственный // Zfv - Zeitschrift Fur Geodasie, Geoinformation und Landmanagement. – 2016. – V. 6. – P.

416–419. – DOI 10.12902/zfv-0146-2016.

213 Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points / P. Martínez-Carricondo, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, F.-J Mesas-Carrascosa, A. García-Ferrer, F.-J. Pérez-Porras. – Текст : непосредственный // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2018. – Vol. 72, P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.jag.2018.05.015.

214 Automated coarse registration of point clouds in 3d urban scenes using voxel based plane constraint / Y. Xu, R. Boerner, W. Yao, L. Hoegner, U. Stilla. – Текст : непосредственный // ISPRS Annals. – 2017. – Vol. IV-2/W4. – P. 185–191. – DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-185-2017.

215 Automatic Filtering and Classification of Low-Density Airborne Laser Scanner Clouds in Shrubland Environments / T. Simoniello, R. Coluzzi, V. Imbrenda, A. Guariglia. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14 (20). – 5127. – DOI: 10.3390/rs14205127.

216 Automatic geo-referencing mobile laser scanning data to UAV images / Y. Gao, X. Huang, F. Zhang, Z. Fu, C. Yang. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2015. – Vol. XL-1/W4. – P. 41–46.

217 Automatic registration of large-scale urban scene point clouds based on semantic feature points / B. Yang, Z. Dong, F. Liang, Y. Liu. – Текст : непосредственный // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 113. – P. 43–58. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.12.005.

218 Automatic registration of point clouds by combining local shape descriptor and G4PCS algorithm / W. Tao, J. Lin, D. Xu, Y. Xiao. – Текст : непосредственный // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2023. – Vol. 99. – P. 1–13. – DOI 10.1109/JSTARS.2023.3293409.

219 Axelsson, P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models / P. Axelsson. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2000. – Vol. XXXIII-4. – P. 111–118.

220 Bay, H. SURF: speeded up robust features / H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool.

– Текст : непосредственный // Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision. – Springer LNCS, 2006. – Vol. 3951, Part. 1. – P. 404–417.

221 Besl, P. Method for Registration of 3-D Shapes / P. J. Besl, N. D. McKay. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1992. – Vol. 14, Issue 2. – P. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791. – DOI: 10.1109/34.121791.

222 Big Data: что такое большие данные и где они применяются. – Текст : электронный // Selectel : официальный сайт. – 2022. – URL: <https://selectel.ru/blog/what-is-big-data> (дата обращения: 01.06.2022).

223 Brightman, N. Point cloud registration: a mini-review of current state, challenging issues and future directions / N. Brightman, L. Fan, Y. Zhao. – Текст : непосредственный // AIMS Geosciences. – 2023. – Vol. 9. – P. 1–13. – DOI 10.3934/geosci.2023005.

224 Brown, G. L. A Survey of Image Registration Techniques / G. L. Brown. – Текст : непосредственный // ACM Computing Surveys. – 1992. – Vol. 24. – P. 325–376.

225 Byun, Y. A Novel Region-Based Approach for Automatic Road Extraction from High Resolution Satellite Images / Y. Byun. – Текст : непосредственный // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 284–287. – P. 2998–3003. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.2998.

226 Capitalism on spatiality in European transport corridors / P. A. Witte, F. van Oort, B. Wiegmans, T. J. M. Spit. – Текст : непосредственный // Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie. – 2013. – Vol. 104. – No. 4. – P. 510–517. – DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.011.

227 Cheng, Q. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement / Q. Cheng, L. Jing, A. Panahi. – Текст : непосредственный // International journal of remote sensing. – 2006. – Vol. 27 (15). – P. 3387 – 3042. – DOI: 10.1080/01431160600606882.

228 Continuous Fusion of Motion Data Using an Axis-Angle Rotation Representa-

tion with Uniform B-Spline / H. Hu, J. Beck, M. Lauer, C. Stiller. – Текст : непосредственный // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21(15). – 5004.

229 Decision-level and feature-level integration of remote sensing and geospatial big data for urban land use mapping / J. Yin, P. Fu, P., N. A. S. Hamm, Z. Li, N. You, Y. He, A. Cheshmehzangi, J. Dong. – Текст : непосредственный // *Remote sensing*. – 2021. – Vol. 13. – No. 1579. – DOI 10.3390/rs13081579.

230 Deera, M. Automatic Image Registration using 2D–Discrete Wavelet Transform / M. Deera, T. Saravanan. – Текст : непосредственный // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9 (5).

231 Demir, N. Extraction of buildings and trees using images and LiDAR data / N. Demir, D. Poli, E. Baltsavias. – Текст : непосредственный // *International Archives of ISPRS*. – 2008. – Vol. XXXVII. – P. 375–382.

232 DJI Phantom 4 vs DJI Phantom 4 RTK. – Текст : электронный // *Blogarama*, : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://www.blogarama.com/photography-blogs/327053-coptrz-drones-blog/27517315-dji-phantom-rtk> (дата обращения: 02.03.2024).

233 Dold, C. 2006. Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data / C. Dold, C. Brenner. – Текст : непосредственный // *International Archives of ISPRS*. – 2006. – Vol. 36 (5). – P. 78–83. – DOI: 10.15488/3750.

234 Evaluating Remotely Sensed Images for Use in Inventorying Roadway Features / D. Veneziano, K. Mantravadi, S. Hallmark, R. R. Souleyrette. – Текст : непосредственный // *Proceedings of the seventh international conference on applications of advanced technology in transportation*. – 2002. – P. 378–385. – DOI: 10.1061/40632(245)48.

235 Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration / P. Li, R. Wang, Y. Wang, W. Tao. – Текст : непосредственный // *IEEE Access* 2020. – Vol. 8. – P. 68030–68048. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986470.

236 Flammini, F. Railway infrastructure monitoring by drones / F. Flammini, C. Pragliola, G. Smarra. – Текст : непосредственный // *International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International*

Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). – 2016. – DOI: 10.1109/esars-itec.2016.7841398.

237 Forkuo, E. K. Automatic fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds / E. K. Forkuo., B. King. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2004. – Vol. XXXV-B4. – P. 921–926.

238 Fryskowska-Skibniewska, A. Mobile Laser Scanning accuracy assessment for the purpose of base-map updating / A. Fryskowska-Skibniewska, P. Wróblewski. – Текст : непосредственный // Geodesy and Cartography. – 2018. – Vol. 67. – P. 35–55. – DOI: 10.24425/118701.

239 Fuad, N. Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data / N. Fuad. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2018. – Vol. XLII-4/W9. – P. 11–21. – DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.

240 Fusion of mobile laser scanning and panoramic images for studying river environment topography and changes / M. Vaaja, M. Kurkela, H. Hyypä, P. Alho, J. Hyypä, A. Kukko, H. Kaartinen, E. Kasvi, S. Kaasalainen, P. Rönnholm. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2012. – Vol. XXXVIII-5/W12. – P. 319–324. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-319-2011.

241 Gomez, R. B. Hyperspectral imaging: a useful technology for transportation analysis / R. B. Gomez. – Текст : непосредственный // Optical Engineering. – 2002. – Vol. 41. – No. 9. – DOI: 10.1117/1.1497985.

242 Grilli, E. A review of point clouds segmentation and classification algorithms / E. Grilli, F. Menna, F. Remondino. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2017. – Vol. XLII-2/W3. – P. 339–444. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-339-2017.

243 Guan, H. Automated extraction of road information from mobile laser scanning data: Doctor's thesis / /H. Guan. – Waterloo, Ontario, Canada, 2013. – 201 p. – Текст : непосредственный.

244 Guarnieri, A. Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to cultural

heritage 3D modelling / A. Guarnieri, F. Remondino, A. Vettore. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2006. – Vol. XXXVI–B.

245 Han, Y. Automated geo/co-registration of multi-temporal very-high-resolution imagery / Y. Han, J. Oh. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2018. – Vol. 18, No 1599. – DOI: 10.3390/s18051599.

246 Hassan, A. T. Integration of laser scanning and photogrammetry in 3d/4d cultural heritage preservation – a review / A. T. Hassan, D. Fritsch. – Текст : непосредственный // International Journal of Applied Science and Technology. – 2019. – Vol. 9, No 2. – P. 76–91. – DOI: 10.30845/ijast.v9n4p9.

247 Hervieu, A. Semi-automatic road/pavement modeling using mobile laser scanning / A. Hervieu, B. Soheilian. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2013. – Vol. II-3/W3. – P. 31–36. – DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W3-31-2013.

248 Hirschmuller, H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information / H. Hirschmuller. – Текст : непосредственный // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 2. – P. 807–814.

249 Hu, H. Accurate global trajectory alignment using poles and road markings / H. Hu, M. Sons, C. Stiller. – Текст : непосредственный // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – 2019. – arXiv:1903.10205v1. – P. 1186–1191.

250 Huang, X. Integration of mobile laser scanning data with UAV imagery for very high-resolution 3D city modelling / X. Huang, A. Gruen, R. Qin, T. Du, W. Fang. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 8th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2013). – 2013.

251 Hubbard, T. D. High-resolution lidar for Alaska infrastructure corridors / T. D. Hubbard, R. D. Koehler, R. A. Combellick. – Alaska Division of Geological & Geophysical Surveys Raw Data File 2011-3L, Alaska: Anchorage Quadrangle, 2012. – 6 p. – Текст : непосредственный.

252 Hussnain, Z. An automatic procedure for mobile laser scanning platform 6dof trajectory adjustment / Z. Hussnain, S. Oude Elbernk, G. Vosselman. – Текст :

непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2018. – Vol. XLII-1. – P. 203–209.

253 Hutton, J. The Applanix SmartBase software for improved robustness, accuracy, and productivity of mobile mapping and positioning / J. Hutton, E. Roy. – Текст : электронный // Applanix : официальный сайт. – 2024. – URL: <https://www.applanix.com/pdf/applanix%20smartbase.pdf> (дата обращения: 01.09.2024).

254 Integrating remote sensing and geospatial big data for urban land use mapping: A review / J. Yin, J. Dong, N. Hamm, Z. Li, J. Wang, H. Xing, P. Fu. – Текст : непосредственный // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2021. – Vol. 103 (9). – No. 102514. – DOI 10.1016/j.jag.2021.102514.

255 Integration of laser scanning and photogrammetry / P. Rönholm, E. Honkavaara, P. Litkey, H. Нуурпää, J. Нуурпää. – Текст : непосредственный // ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. – 2007. – Vol. XXXVI, Part 3 / W52, 2007. – P. 355–362.

256 Joglekar, J. Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to cultural heritage 3D modelling / J. Joglekar, S. S. Gedam. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2011. – Vol. XXXVIII-3/W22. – P. 109–114.

257 Jwa, Y. Kalman Filter Based Railway Tracking from Mobile Lidar Data / Y. Jwa, G. Sonh. – Текст : непосредственный // ISPRS Annals. – 2015. – Vol. II-3/W5 – P. 159–164. – DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-159-2015.

258 Kadhim, H. A. A method to improve corner detectors (Harris, Shi-Tomasi & FAST) using adaptive contrast enhancement filter / H. A. Kadhim, W. A. Araheemah. – Текст : непосредственный // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – 2020. – Vol. 8. – P. 508–515.

259 Karagianni, A. Terrestrial laser scanning and satellite data in cultural heritage building documentation. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2021. – Vol. XLVI-M-1-2021. – P. 361–366. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-361-2021.

260 Ke, Y. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image de-

scriptors / Y. Ke, R. Sukthankar. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2004. – Vol. 2.

261 Lachat, E. First experiences with the Trimble SX10 scanning total station for building facade survey / F. Lachat, T. Landes, P. Grussenmeyer. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2017. – Vol. XLII-2/W3. – P. 405–412. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-405-2017.

262 Large scale orthophotography using DTM from terrestrial laser scanning / A. Georgopoulos, M. Tsakiri, C. Ioannidis, A. Kakli. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2004. – Vol. XXXV– B5. – P. 467–472.

263 Lee, J. Automated extraction of road networks from IKONOS data in urban area / J. Lee. – Текст : непосредственный // Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2005. – Vol. 1. – DOI 10.1109/IGARSS.2005.1526206.

264 Leutenegger, S. BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints / S. Leutenegger, M. Chli, R. Y. Siegwart. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision. – 2011. – P. 2548–2555.

265 Levin, D. The approximation power of moving least-squares / D. Levin. – Текст : непосредственный // Math. Comp. – 1998. – Vol. 67. – No. 224. – P. 1517–1531.

266 Li, Y. A self-calibration method for boresight error of mobile mapping system / Y. Li, Y. Bai, M. Wang. – Текст : непосредственный // 2nd International Conference on Geoscience and Environmental Chemistry (ICGEC 2020). – 2020. – Vol. 206. – 03010.

267 Liu, P. A survey of remote-sensing big data / P. Liu. – Текст : непосредственный // Frontiers in Environmental Science. – 2015. – Vol. 3. – No. 45. – DOI 10.3389/fenvs.2015.00045.

268 Liu, S. Registration algorithm based on line-intersection-line for satellite remote sensing images of urban areas / Liu S., Jiang J. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, No 1400. – DOI: 10.3390/rs11121400.

269 Lowe, D. G. Object recognition from local scale-invariant features / D. G.

Lowe. – Текст : непосредственный // Proc. Intl. Conference on Computer Vision. – 1999. – Vol. 8. – P. 1150–1157.

270 Miraliakbari, A. Automatic extraction of road surface and curbstone edges from mobile laser scanning data / A. Miraliakbari, M. Hahn, S. Sok. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2015. – Vol. XL-4/W5. – P. 119–124. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-4-W5-119-2015

271 Miraliakbari, A. Development of multi-sensor system for road condition mapping / A. Miraliakbari, M. Hahn, H-G Mass. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2014. – Vol. XL-1. – P. 265–272. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-265-2014.

272 Mitka, B. Integration of photogrammetric and 3D laser scanning data as a flexible and effective approach for heritage documentation / B. Mitka, A. Rzonca. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2009. – Vol. XXXVIII-5/W1.

273 Mohammed, H. Fusion of Terrestrial and Airborne Laser Data for 3D Modeling Applications: Doctor's thesis // H. Mohammed. – University of Calgary, Calgary, Canada, 2015. – 135 p. – Текст : непосредственный.

274 Morel, J. M. ASIFT: A New Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison. Siam J. / J. M. Morel, G. Yu. – Текст : непосредственный // Imaging Sci. – 2010. – Vol. 2. – P. 438–469.

275 Object Classification and Recognition From Mobile Laser Scanning Point Clouds in a Road Environment / M. Lehtomäki, A. Jaakkola, J. Huuypä, J. Lampinen, H. Kaartinen, A. Kukko, E. Puttonen, H. Huuypä. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 54. – No. 2. – P. 1–14. – DOI 10.1109/TGRS.2015.2476502.

276 Optimization of automatic image registration algorithms and characterization // Ch. Venkateswara Rao, K.M.M. Rao, A. S. Manjunath, R. V. N. Srinivas. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2004. – Vol. 35. – P. 698–703.

277 Point cloud data filtering and downsampling using growing neural gas / S. Orts-Escolano, V. Morell, J. García-Rodríguez, M. Cazorla // Neural Networks (IJCNN), The

2013 International Joint Conference on, Dallas, TX. – 2013. – P. 1–8.

278 Poreba, M. & Goulette, F. Assessing the Accuracy of Land-Based Mobile Laser Scanning Data / M. Poreba, F. Goulette. – Текст : непосредственный // *Geomatics and Environmental Engineering*. – 2012. – Vol. 6. – P. 73–81. – DOI: 10.7494/geom.

279 Procházková, J. Notes on Iterative Closest Point Algorithm / J. Procházková, D. Martišek. – Текст : непосредственный // *17th Conference on Applied Mathematics APLIMAT*. – 2018. – P. 876–884.

280 Quintuple local coordinate images for local shape description / W. Tao, X. Hua, R. Wang, D. Xu. – Текст : непосредственный // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 86. – P. 121–132. – DOI 10.14358/PERS.86.2.121.

281 Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark / Z. Dong, F. Liang, B. Yang, Y. Xu, Y. Zang, J. Li, Y. Wang, W. Dai, H. Fa, J. Hyypäb, U. Stilla. – Текст : непосредственный // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 163. – P. 327–342. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013.

282 Remote sensing big data: theory, methods and applications / P. Liu, L. Di, Q. Du, L. Wang. – Текст : непосредственный // *Remote sensing*. – 2018. – Vol. 10. – No. 711. – DOI 10.3390/rs10050711.

283 Remotely sensed big data: evolution in model development for information extraction / B. Zhang, J. A. Benediktsson, B. Liu, L. Zou, J. Li, A. Plaza. – Текст : непосредственный // *Proceedings of the IEEE*. – 2019. – Vol. 107. – No. 12. – P. 2294–2301. – DOI 10.1109/JPROC.2019.2948454.

284 Resende, M. Monitoring the condition of roads pavement surfaces: proposal of methodology using hyperspectral images / M. Resende, L. Bernucci, J. Quintanilha. – Текст : непосредственный // *Journal of Transport Literature*. – 2014. – Vol. 8. – No. 2. – P. 201–220. – DOI 10.1590/S2238-10312014000200009.

285 Riegl, J. Merging and processing of laser scan data and high-resolution digital images acquired with a hybrid 3 D laser sensor // J. Riegl, S. Nikolaus, A. Ullrich. – Текст : непосредственный // *Proceedings of the CIPA 2003 XIXth International Sym-*

posium,. – 2003. – P. 511–516.

286 Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions / J. Matas, O. Chum, M. Urban, T. Pajdla. – Текст : непосредственный // Proceedings of British Machine Vision Conference. – 2002. – P. 384–396.

287 Saprykin, O. Recognition of urban transport infrastructure objects via hyperspectral images / O. Saprykin, A. Fedoseev, T. Mikheeva. – Текст : непосредственный // Proceedings of the international conference on vehicle technology and intelligent transport systems (VEHITS 2016). – 2016. – P. 203–208. – DOI 10.5220/0005901902030208.

288 SAR-SIFT: A SIFT-like algorithm for SAR images / F. Dellinger, J. Delon, Y. Gousseau, J. Michel, F. Tupin. – Текст : непосредственный // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2015. – Vol. 53. – 453–466.

289 Saxena, S. Survey of Recent and Classical Image Registration Methods / S. Saxena, R. A. Singh. – Текст : непосредственный // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. – 2014. – Vol. 7. – P. 167–176.

290 Schaer, P. Trajectory adjustment of mobile laser scan data in GPS denied environments / P. Schaer, J. Vallet. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2016. – Vol. XL-3/W4. – P. 61–64.

291 Schervish, M. Theory of Statistics / M. Schervish. – New York : Springer, 1995. – 732 p. – Текст : непосредственный. – DOI: 10.1007/978-1-4612-4250-5.

292 Scherzinger, B. Applanix In-Fusion technology explained / B. Scherzinger, J. Hutton. – Текст : электронный // Applanix : официальный сайт. – 2024. – URL: https://www.applanix.com/pdf/Applanix_IN-Fusion.pdf (дата обращения: 01.09.2024).

293 Second Iteration of Photogrammetric Processing to Refine Image Orientation with Improved Tie-Points / N. Truong Giang, J.-M. Muller, E. Rupnik, C. Thom, M. Pierrot-Deseilligny. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2018. – Vol. 18, 2150.

294 Sereдович, V. A. The Feasibility Study of Automatic Extraction of Cracks in the Roadbed from Mobile Laser Scanning Data / V. A. Sereдович, M. A. Altyntsev. –

Текст : непосредственный // XXV FIG Congress. – June, 2014. – Malaysia, Kuala Lumpur.

295 Shcherbakov, V. V. Application of rail track geometry measuring trolleys for georeferencing of UAV images / V. V. Shcherbakov, M. A. Altyntsev, M. A. Altyntseva. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2021. – Vol. XLIII (B2). – P. 101–107. – DOI 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-101-2021.

296 Stamos, I. Automated feature-based range registration of urban scenes of large scale / I. Stamos, M. Leordean. – Текст : непосредственный // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2003. – Vol. 2. – P. 1063–6919. – DOI: 10.1109/CVPR.2003.1211516.

297 Surface reconstruction from unorganized points / H. Hoppe, T. Derose, T. Duchamp, J. McDonald, W. Stuetzle. – Текст : непосредственный // Proceedings of SIGGRAPH. – 1992. – P. 71–78.

298 Taddia, Y. Using DJI Phantom 4 RTK drone for topographic mapping of coastal areas / Y. Taddia, F. Stecchi, A. Pellegrinelli. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2019. – Vol. 42(2/W13). – P. 625–630. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-625-2019.

299 Tampubolon W., Reinhardt W. UAV data processing for large scale topographical mapping / W. Tampubolon, W. Reinhardt W. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2014. – Vol. XL-5. – P. 565–572. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XL-5-565-2014.

300 TerraScan User Guide. – Текст : электронный // TerraSolid : официальный сайт. – 2024. – URL: <https://terrasolid.com/guides/tscan/index.html> (дата обращения: 10.11.2024).

301 The use of multiple data sources in the process of topographic maps updating / A. Cantemir, A. Visan, N. Parvulescu, M. Dogaru. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2016. – Vol. XLI-B4. – P. 19–24. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-19-2016.

302 Tsin, Y., Takeo, K., 2004. A correlation-based approach to robust point set reg-

istration / Y. Tsin, K. Takeo. – Текст : непосредственный // European Conference on Computer Vision. – 2004. – P. 558–569.

303 UAV aerial survey: accuracy estimation for automatically generated dense digital surface model and orthophoto plan / M. A. Altyntsev, S. A. Arbuzov, R. A. Popov., G. V. Tsoi, M. O. Gromov. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2016. – Vol. XLI(B6). – P. 155–159.

304 Urso, M. G. D. On the integrated use of laser-scanning and digital photogrammetry applied to an archaeological site / M. G. D. Urso, G. Russo. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2008. – Vol. XXXVII-B5. – P. 1107–1112.

305 Vosselman, G. Airborne and terrestrial laser scanning / G. Vosselman, H.-G. Maas. – Boca Raton : CRC Press, 2010. – 337 p. – ISBN 978-1-904445-87-6. – Текст : непосредственный.

306 Wahed, M. Automatic Image Registration Technique of Remote Sensing Images / M. Wahed, Gh. S. El-tawel, A. Gad El-karim. – Текст : непосредственный // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2013. – Vol. 4 (2). – P. 177–187.

307 Wen C., Xia Y., Lian Y., Dai Y., Tan J., Wang C., Li J. Mobile laser scanning systems for GPS/GNSS-denied environment mapping // International Archives of ISPRS. – 2018. – Vol. XLII-1. – P. 457–460.

308 Wu, B. Review of geometric fusion of remote sensing imagery and laser scanning data / B. Wu, S. Tang. – Текст : непосредственный // International Journal of Image and Data Fusion. – 2015. – Vol. 6. – P. 97–114. – DOI: 10.1080/19479832.2015.1024175.

309 Wu, C.-T. Improvement of LiDAR data accuracy using 12 parameter affine transformation / C.-T. Wu, C.-Y. Hsiao, C.-S. Chen. – Текст : непосредственный // Journal of Chinese Soil and Water Conservation. – 2013. – Vol. 44(4). – P. 293–301.

310 Zaman, F. Density-based denoising of point cloud / F. Zaman, Y. P. Wong, B. Y. Ng. – Текст : непосредственный // ArXiv preprint arXiv:160205312. – 2016.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТ ПОСТРОЕНИЯ ЦМП АСФАЛЬТОВОГО ПОКРЫТИЯ



Впадины		
Номер	Цвет	Площадь 2D кв.м
1		4.94
2		2.72
3		26.62
4		1.62
5		7.56
6		0.66
7		1.68
8		7.87
9		3.26
10		3.42
11		9.50
12		2.55
13		4.63
14		1.07
Сумма		78.10

Диапазоны высотных отметок пов-ти				
Номер диапазона	Нижняя граница м	Верхняя граница м	Цвет	Площадь 2D кв.м
1	0.02	0.15		49.95
2	0.15	0.17		46.97
3	0.17	0.20		59.79
4	0.20	0.27		45.48
5	0.27	0.34		49.22
6	0.34	0.57		135.40
7	0.57	0.66		80.87
8	0.66	0.78		114.09
9	0.78	0.85		103.31
10	0.85	0.87		61.02
11	0.87	0.89		72.18
12	0.89	0.92		67.72
13	0.92	0.95		59.67
14	0.95	1.00		78.80
15	1.00	1.05		62.10
16	1.05	1.09		49.90
17	1.09	1.11		44.78
18	1.11	1.14		43.98
19	1.14	1.18		45.90
20	1.18	1.20		50.42
21	1.20	1.22		47.70
22	1.22	1.24		50.35
23	1.24	1.26		51.53
24	1.26	1.28		53.51
25	1.28	1.31		64.96
26	1.31	1.36		85.26
27	1.36	1.41		81.31
28	1.41	1.45		56.56
29	1.45	1.48		52.04
30	1.48	1.52		61.86
31	1.52	1.55		53.57
32	1.55	1.58		49.02
33	1.58	1.59		46.07
34	1.59	1.61		51.94
35	1.61	1.63		66.59
36	1.63	1.70		67.26
37	1.70	2.02		84.12
38	2.02	2.35		135.62
39	2.35	2.51		74.22
40	2.51	2.68		60.36

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТ ПОСТРОЕНИЯ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО ПЛАНА И ЦМР

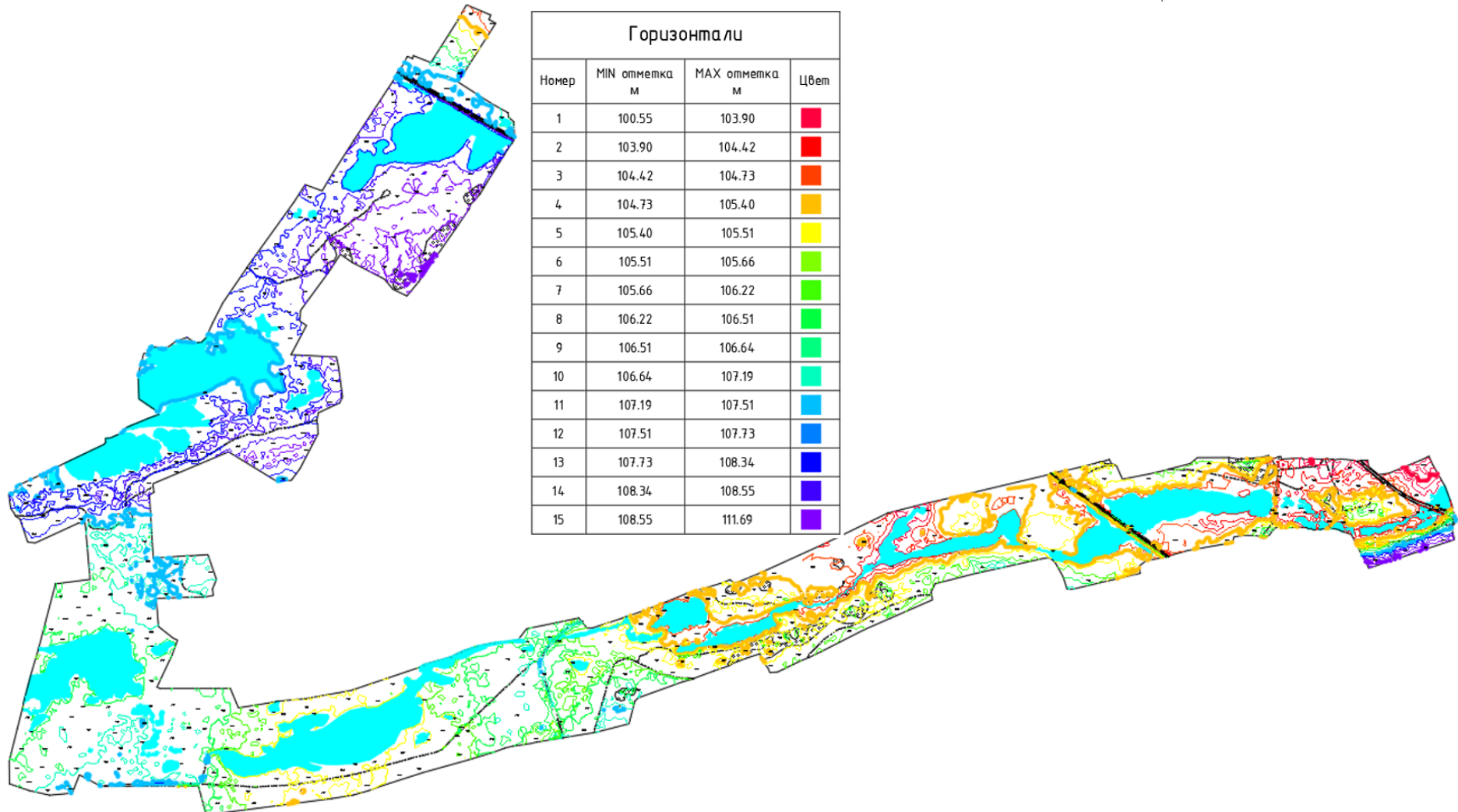


Рисунок Б.1 – ЦМР в форме отображения горизонталей цветом по высоте

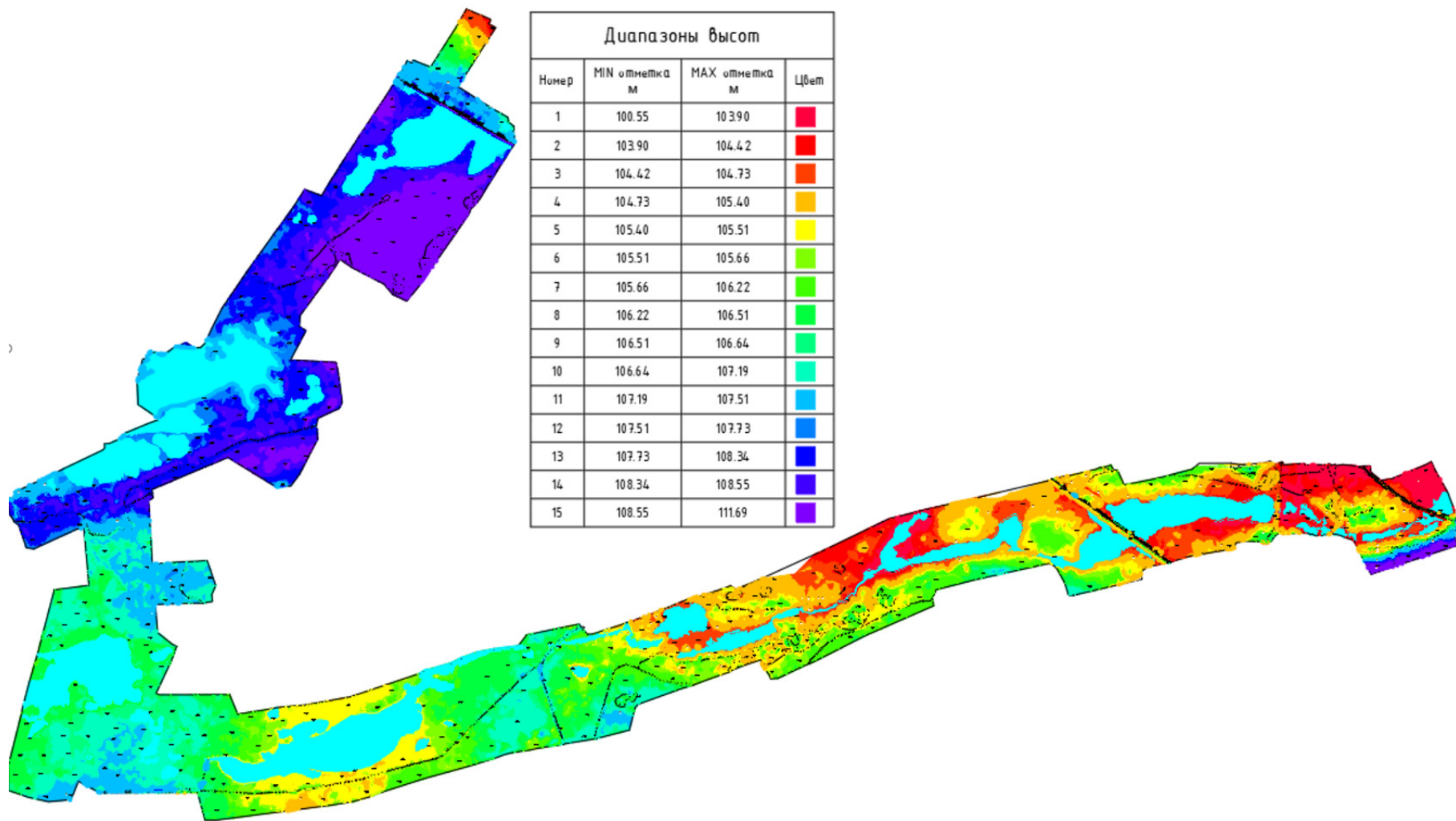


Рисунок Б.2 – ЦМР в форме заливки граней треугольников цветом по высоте