

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный консультант – доктор технических наук, доцент Комиссаров Александр Владимирович.

Официальные оппоненты:

Мустафин Мурат Газизович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Брынь Михаил Ярославович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», заведующий кафедрой «Инженерная геодезия»;

Долгополов Даниил Валентинович, доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», ведущий научный сотрудник лаборатории разработки и ведения геоинформационных систем и баз данных.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (г. Москва).

Защита диссертации состоится 17 июня 2025 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»

<https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/altyntsev-maksim-aleksandrovich/>

Автореферат разослан 31 марта 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 28.02.2025. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 2,00. Тираж 100 экз. Заказ 21.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, аэрофотосъемка 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., Vernucci 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 методов 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 организациями 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 2013г.; 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 г.; 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), на 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность выбранной темы диссертационного исследования и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, приведена научная новизна, теоретическая и практическая значимость

работы, отражены выносимые на защиту положения, рассмотрены результаты апробации выполненных исследований.

В первом разделе рассмотрены особенности развития сферы транспортной инфраструктуры (ТИ) РФ, выделены основные проблемы ее транспортной системы, заключающиеся в дефиците пропускной способности дорожной сети; устаревающей транспортной инфраструктуре; недостаточном развитии подходов к аэропортам, морским портам, автомобильным и железнодорожным пунктам пропуска; недостаточной сформированности транспортной сети, что приводит к сдерживанию экономического развития отдаленных от столицы регионов. Было определено, что развитие ТИ является приоритетным направлением нашей страны, благодаря чему достигаются положительные эффекты в экономической, культурной и общественной областях жизни человека. В условиях цифровой трансформации отрасли одним из приоритетных направлений ее развития является создание геопространственных моделей (ГПМ) объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ), источником чего являются различные виды пространственных данных, среди которых особое место занимают полученные с помощью методов 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. Данные ДЗЗ среди этого набора занимают ключевую роль. 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, усовершенствованием их технических характеристик, накоплением большого объема получаемых данных и необходимостью их интеграции.

Детальный анализ перечня задач при развитии сферы ТИ и современные примеры применения методов ДЗЗ для их решения показали, что основой геопространственного моделирования ОТИ является правильный подбор подходящих методов измерений на местности. 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. Для решения задач дорожной отрасли была предложена классификация требуемой точности (таблица 1), согласно которой для решения отдельных задач сферы ТИ могут применяться тахеометрическая и ГНСС-съемка, геометрическое нивелирование, а также следующие методы ДЗЗ: космическая съемка (КС), аэрофотосъемка (АФС) с беспилотных воздушных судов (БВС) или пилотируемых летательных аппаратов (ПЛА), воздушное лазерное сканирование (ВЛС), мобильное лазерное сканирование (МЛС), наземное лазерное сканирование (НЛС), наземная фотосъемка (НФС).

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 точности для создания ГПМ, соответствующей определенной стадии жизненного цикла ОТИ. Было определено, в какой ситуации необходимо применять комплекс методов ДЗЗ, а когда достаточно данных съемки, выполненной единственным методом. Применение комплекса методов ДЗЗ необходимо при топографической съемке, когда требуются результаты 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.

Таблица 1 – 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

Также были определены дополнительные критерии выбора оптимальных методов: протяженность и площадь участка съемки, уровень застроенности территории, наличие сплошного покрова растительности от 0,5 м высоты, категория земель, вид обмера. Совместный анализ этих критериев, существующих методов ДЗЗ и перечня задач сферы ТИ позволил сформировать для каждой задачи список оптимальных методов, где в виде набора альтернативных методов учитываются следующие дополнительные критерии: доступность оборудования, ограничения доступа на территорию, наличие архивных материалов, необходимость совместного решения нескольких задач.

Все результаты выполненного анализа сгруппированы в виде таблицы оптимальных методов ДЗЗ для решения задач сферы ТИ, в которой указаны классы точности в соответствии с разработанной классификацией (таблица 2).

Таблица 2 – Оптимальные методы ДЗЗ для решения задач сферы ТИ

Стадии жизненного цикла ОТИ	Задача	Характеристики территории	Основной метод (классы точности)	Альтернативный метод	Метод доъемки
1	2	3	4	5	6
Планирование и проектирование строительства (предпроектные изыскания)	Определение координат характерных точек границ земельных участков (приказ Росреестра от 23 октября 2020 года № П/0393) для составления кадастровых планов	–	КС/АФС/НЛС/МЛС/ВЛС в зависимости от категории земель и их площади (3–8)	–	–
	Выявление участков с развитием опасных и техногенных процессов (ГОСТ 32869)	–	КС/АФС/МЛС/ВЛС в зависимости от масштаба съемки, характеристики участков трассы (3–8)	–	–
	Топографические карты для получения наглядной информации и определения полосы варьирования 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 определения сложных участков, предварительного положения при-трассовой 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 съемки и протяженности участка	–
Покрытая растительностью		ВЛС (7–9)	КС/МЛС в зависимости от площади съемки и протяженности участка		
Планирование и проектирование строительства (проектно-изыскательские 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 остановок, искусственных сооружений, проходящие по населенным пунктам участки трасс) в масштабе 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: 5 000; 4) проблемных участков автомобильных дорог в масштабе 1: 500 – 1: 5 000;	Незастроенная территория без растительности	АФС (3–8)	МЛС/НЛС в зависимости от площади съемки и протяженности участка	МЛС/НЛС в зависимости от площади съемки и протяженности участка
		Незастроенная территория, покрытая растительностью	ВЛС (3–8)	МЛС/НЛС в зависимости от площади съемки и протяженности участка	АФС/МЛС/НЛС/ВЛС в зависимости от площади съемки и протяженности участка

Продолжение таблицы 2

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 2

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	–

Анализ выполненных теоретических исследований показал, что для учета всех современных тенденций развития сферы ТИ необходима разработка универсальной технологии геопространственного моделирования территории по данным ДЗЗ, обеспечивающей 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.

Во втором разделе разработаны методологические принципы интеграции данных ДЗЗ; рассмотрены основы получения данных ДЗЗ в едином координатном пространстве, обеспечивающие принцип единства измерений; разработаны теоретические основы сбора и обработки данных ДЗЗ для решения задач сферы ТИ, которые опираются на разработанные методологические принципы их интеграции и позволяют предложить структуру единого геопространства территории ТИ; разработана методология интеграции данных ДЗЗ в структуру единого геопространства; разработана технология геопространственного моделирования территории ТИ для создания соответствующих геопространственных моделей; анализируются методы автоматической обработки данных ДЗЗ: привязки, распознавания объектов и выявления изменений.

Как видно из таблицы 2, для решения каждой определенной задачи сферы ТИ оптимально применение определенного метода ДЗЗ или их комплекса, когда необходима досъемка территории. Построенная по данным ДЗЗ ГПМ должна иметь точность и детализацию, позволяющую решить требуемую в конкретный момент времени на определенном этапе жизненного цикла ОТИ задачу. При комплексном последовательном решении группы задач, когда необходимо применять несколько методов ДЗЗ, требования к ГПМ повышаются – она должна содержать актуальную информацию обо всех ОТИ и их отдельных элементах в форме единого геопространства (ЕГП). Для этого необходимо соблюдение следующих основных методологических 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 классификацией 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.

Сущность формирования ЕГП ОТИ можно описать комплексной функцией F , осуществляющей серию преобразований на множестве геопространственных данных D

$$ЕГП = \{F, D\}, \quad (1)$$

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

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

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.

Отображение свойств объектов территории производится с помощью функции F_s в виде первичных данных S . 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 могут быть представлены в виде

снимков или множества точек. Согласно результатам анализа методов сбора пространственных данных, подходящих для решения задач сферы ГИ, геометрические данные D_g в виде снимков разделяются на следующие: КС, АФС с БВС, АФС с ПЛА, НФС. Геометрические данные D_g в виде множества точек представлены следующими видами: ВЛС с БВС, ВЛС с ПЛА, МЛС, НЛС, ГНСС-съёмка, данные геометрического нивелирования, данные тахеометрической съёмки.

Первичные данные получают как в результате изучения территории без непосредственного выезда на нее (архивные первичные данные S_a), так и в результате полевого сбора (первичные данные S_p).

В результате обработки первичные данные с помощью функции F_i преобразуются в геопространственную информацию I , представляющую собой первичную форму ЦММ – ПИМ, которая уже может быть использована при решении различных задач сферы ГИ. Но для получения комплексного представления о территории выполняется ее дальнейшее моделирование с помощью функции F_m или F_{m2} – создается ЦММ в форме ГПМ. Чтобы описать представление объектов в ЦММ применяются модели пространственных данных: растровая M_r , векторная топологическая или нетопологическая M_v или их сочетание. 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 . Векторные модели M_{pt} включают в свой состав только точки, которым в результате операций сегментации назначается номер группы, а в результате дальнейших операций описания, распознавания и интерпретации – определенный класс. 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. Функция F_m применяется для получения M_p , M_t и M_s по ПИМ, а F_{m2} – по

предварительно созданной M_{pr} . Результаты геопространственного моделирования M в форме ГПМ с помощью функции F_n могут использоваться для создания цифровой продукции N . ГПМ и цифровая продукция подвергаются пространственному анализу с помощью функции F_a , на основе результатов которого (A) с помощью функции F_r принимаются пространственные решения R .

Так как при построении актуальных ГМП могут быть использованы архивные материалы S_s , включающие первичные данные S_a , созданные на их основе архивные ПИМ I_a и ГПМ M_a , то вводится дополнительная функция сбора архивных материалов F_{ss} . 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 функции F_g , результатом чего является выработанное решение G о целесообразности полевого сбора первичных данных S_p .

В случае принятия решения о необходимости полевых геодезических измерений необходимо составить технический проект на выполняемые работы, в котором указываются оптимальные модели геодезического оборудования. Решение о выборе таких моделей E принимается с помощью функции F_e на основе анализа их характеристик и результатов выполненных исследований точности.

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 1.

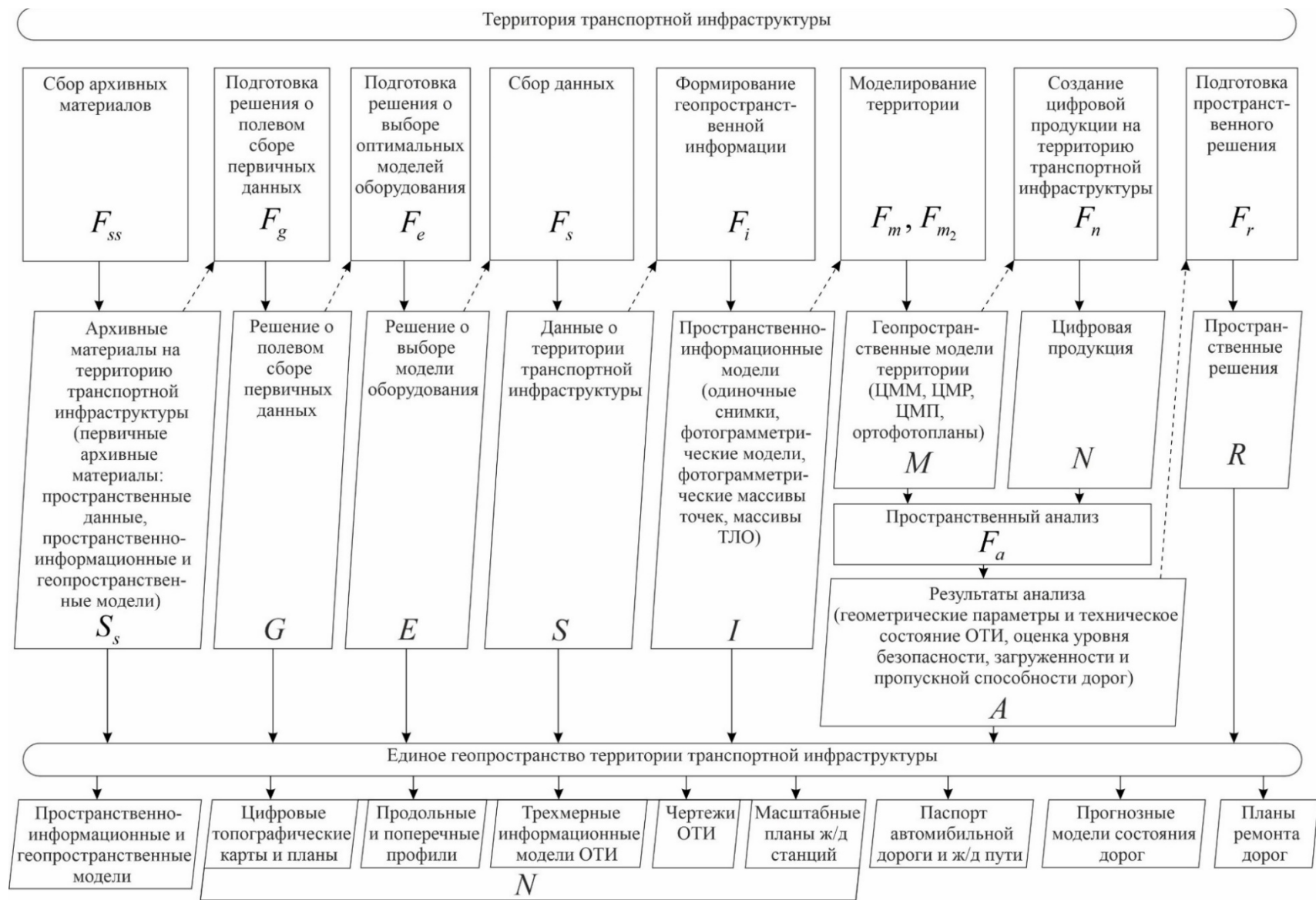


Рисунок 1 – Разработанная структура единого геопространства территории ТИ

Предложенная структура геопространственного моделирования отличается тем, что она адаптирована для сбора различных наборов пространственных данных в сфере ТИ и вводом следующих дополнительных функций F_{ss} , F_g , F_e .

В соответствии с принципом единства измерений для отображения в составе ЦММ разнородных данных и выполнения процесса интеграции в едином координатном пространстве необходимо описать положение снимков различных пассивных съемочных систем в момент фотографирования, радиолокационных снимков и массивов ТЛЮ путем составления соответствующих уравнений. На рисунке 2 представлена технологическая схема интеграции ПИМ, построенных на основе однородных или разнородных данных. К однородным относятся данные, имеющие один формат: двумерные изображения или трехмерные массивы точек. Данные ДЗЗ называются разнородными, если их формат отличается.



Рисунок 2 – Технологическая схема интеграции ПИМ

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 оказывают влияние на выбор способа привязки.

Взаимное ориентирование ПИМ выполняется посредством отождествления соответственных объектов с помощью различных методов.

При привязке однородных ПИМ применяются два 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. 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;
- трехмерный подход на основе массива ТЛО и сгенерированного по снимкам фотограмметрического массива точек.
- комбинированный подход, когда распознавание трехмерных объектов выполняется по массивам ТЛО в трехмерном пространстве и соответствующих им контуров по снимкам в двумерном.

Способ взаимного ориентирования разнородных ПИМ предполагает выбор одной из трех стратегий, по первой из которых результаты фотосъемки используются как опорные для привязки данных ЛС, по второй – наоборот, а третья является комбинированной, при которой, например, привязка в плановом положении выполняется по первой стратегии, а в высотном – по второй.

Способ калибровки оборудования заключается в вычислении элементов взаимного ориентирования всех сенсоров одной системы ДЗЗ.

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, истинные цвета снимков могут быть наложены на массивы ТЛО.

На третьей стадии интеграции выполняется распознавание объектов местности или их составных элементов для построения гибридной ГПМ.

На рисунке 3 представлена предложенная методология интеграции, этапы которой опираются на разработанные методологические принципы и результаты анализа территории геодезической съемки: линейно-протяженный или площадной объект, наличие сплошной растительности, застроенная или незастроенная территория, площадь территории. Она затрагивает различные варианты комбинации методов ДЗЗ.

При интеграции данных ДЗЗ также можно выделить четыре уровня. Объектный уровень интеграции подразумевает, что данные фотосъемки и лазерного сканирования сначала обрабатываются отдельно. Внешнее ориентирования разнородных данных выполняется независимо. Получается гибридная модель.

Уровень интеграции путем обработки данных фотосъемки с помощью лазерного сканирования применяется, когда необходимо, в первую очередь, обработать данные фотосъемки, а данные лазерного сканирования только помогают выполнить эту обработку на определенном этапе. Например, по данным АФС строятся ортофотопланы, где используется информация о рельефе, полученная из результатов ЛС.

Уровень интеграции путем обработки данных ЛС с помощью фотосъемки используется при обратной ситуации – когда в первую очередь обрабатываются данные лазерного сканирования, 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.

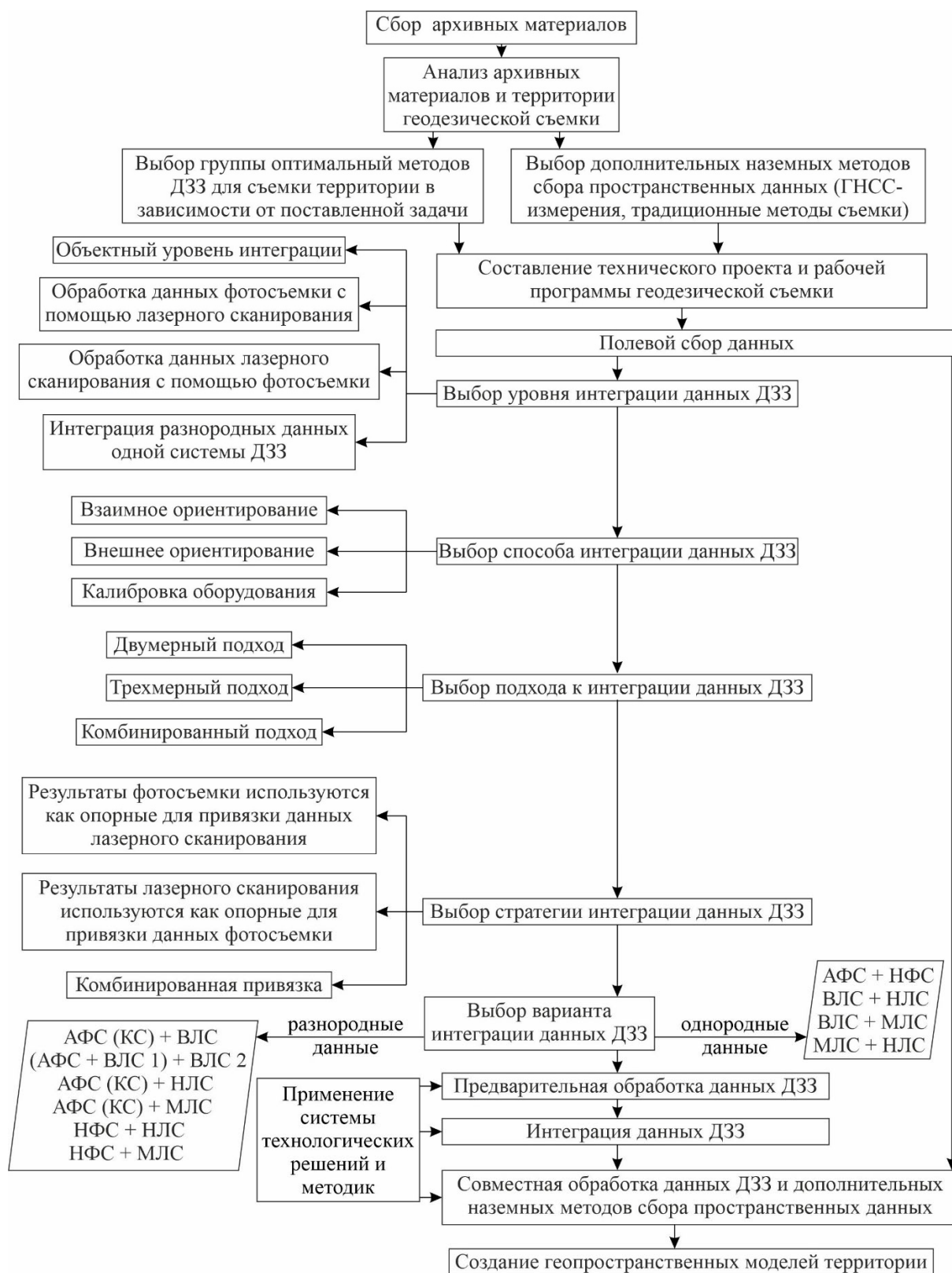


Рисунок 3 – Методология интеграции данных ДЗЗ с целью создания ГПМ

В соответствии с принципом системности разработку всех технологических решений и методики сбора и обработки пространственных данных необходимо выполнять в рамках единой технологии геопространственного моделирования. На рисунке 4 приведена технология геопространственного моделирования по данным ДЗЗ, в которой традиционные наземные геодезические методы и ГНСС-съемка применяются только в качестве дополнительного источника данных при создании ПВО и в случае, если выбранной группы методов ДЗЗ оказывается недостаточно. Представленная технология разделяется на 4 этапа: подготовительные работы, полевой сбор данных, предварительная и тематическая обработка.

Выбор определенного варианта интеграции выполняется на этапе подготовительных работ технологии геопространственного моделирования территории ТИ путем применения функции F_g , если ее итогом является вывод о необходимости применения более одного метода ДЗЗ в соответствии с принципом оптимальности.

Итогом этапа полевых работ является набор первичных данных, которые далее подвергаются предварительной обработке – с помощью функции F_i создаются ПИМ.

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 метрических задач сферы ТИ.

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.

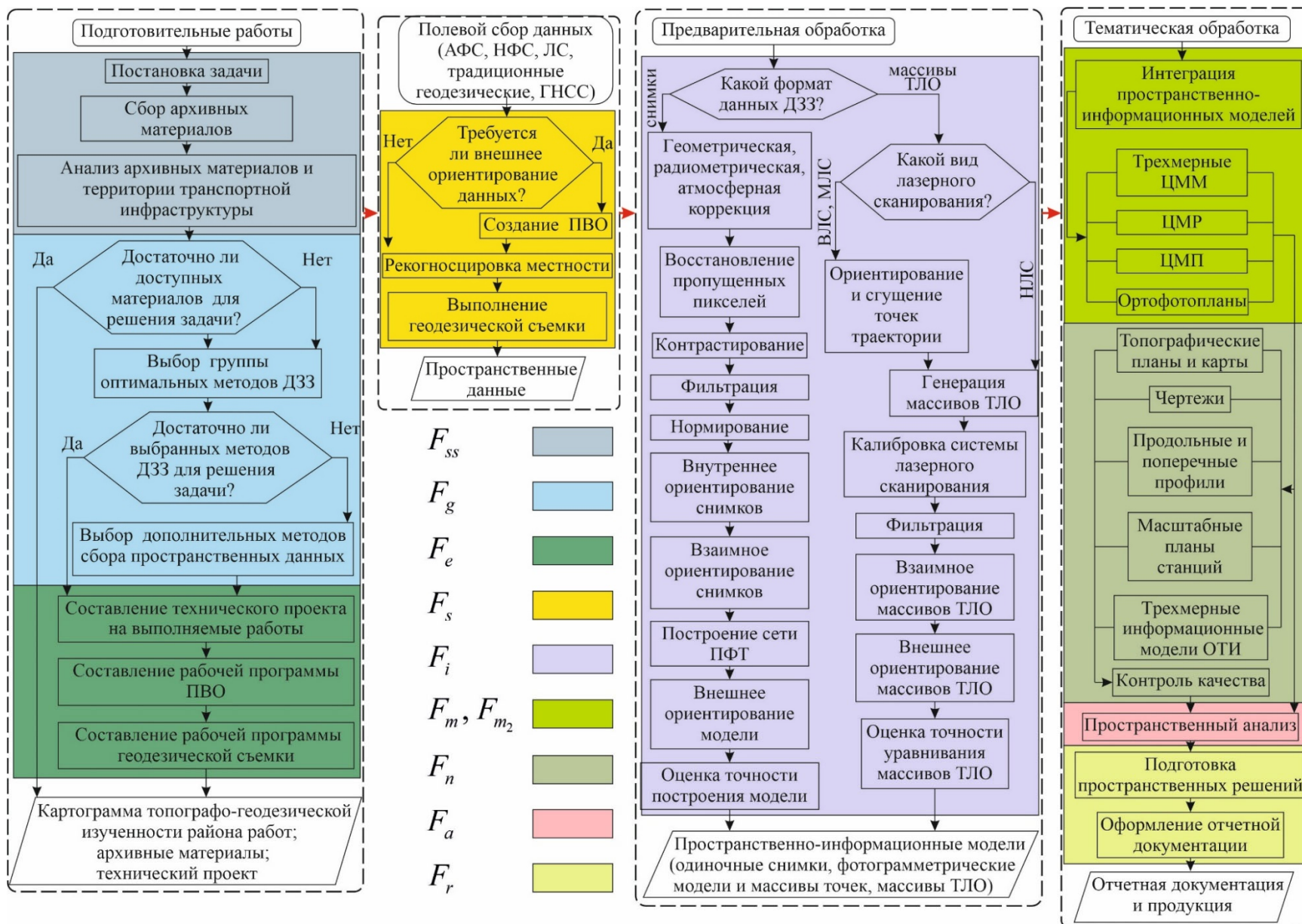


Рисунок 4 – Технология геопространственного моделирования территории ТИ по данным ДЗЗ

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

Разработанная технология позволяет сформировать представление о получаемой цифровой продукции по данным ДЗЗ, которую можно использовать для решения объемного перечня научно-технических задач сферы ТИ.

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. В диссертации все автоматизированные методы были проанализированы и сгруппированы.

В третьем разделе была разработана система технологических решений сбора и обработки данных ДЗЗ для формирования ПИМ. Разработанная система 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. Они обладают высоким уровнем автоматизации, что необходимо для оперативного решения требуемых отдельных задач, соответствуют принципу преемственности – учитывают предыдущий опыт применения методов ДЗЗ при решении задач в сфере ТИ.

Все разработанные технологические решения апробированы при съемке автомобильных и железных дорог Новосибирской, Кемеровской, Якутской и Омской областей. Результаты исследований показали, что точность построенных ПИМ соответствует требованиям нормативной документации.

На рисунке 5 приведена одна из схем – для данных МЛС.

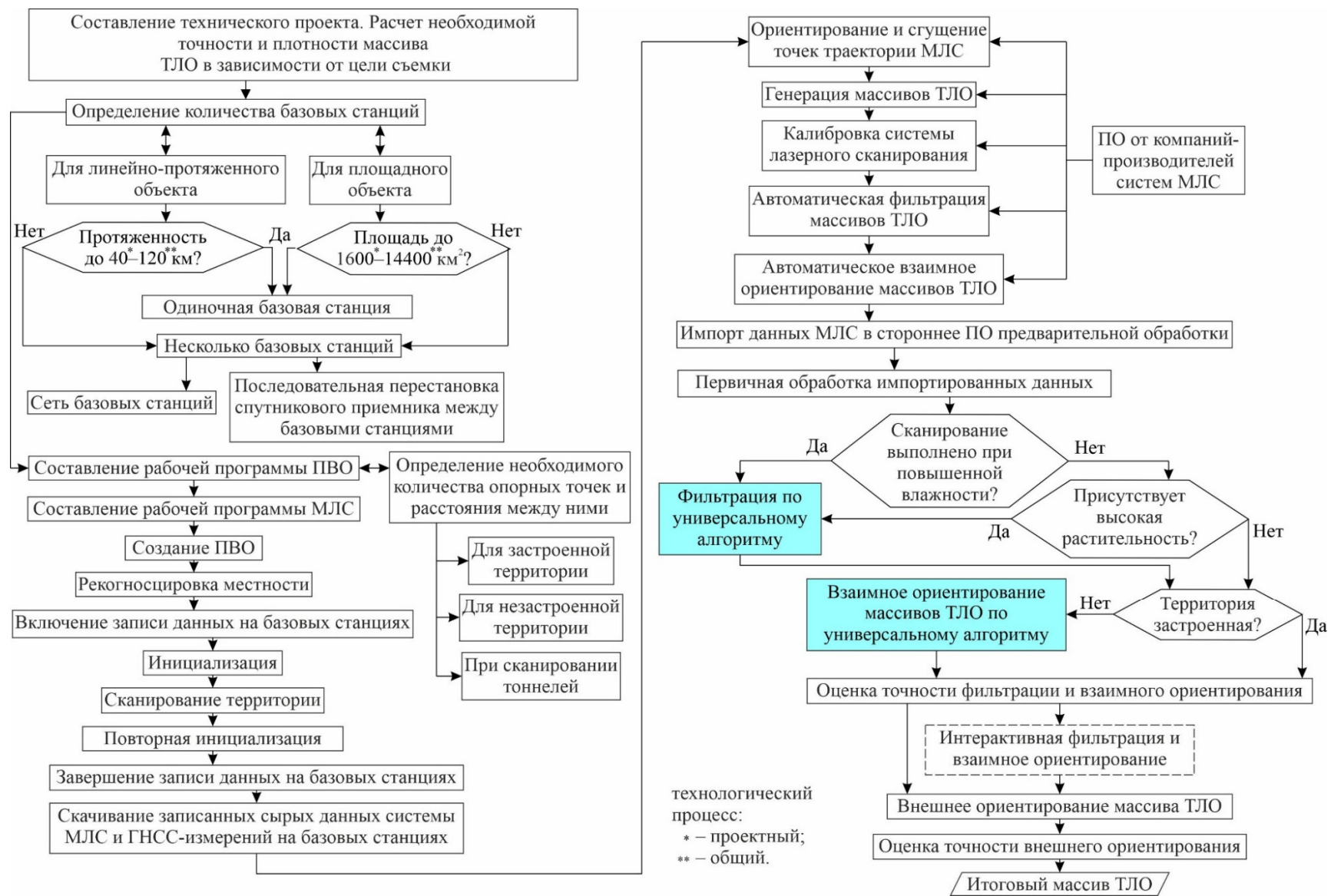


Рисунок 5 – Технологическая схема сбора и предварительной обработки данных МЛС

Технологическая схема сбора и предварительной обработки данных МЛС позволяет определить необходимое количество базовых станций и дополнительных опознаков в зависимости от характера застроенности территории, протяженности объекта и его площади. Она повышает уровень автоматизации предварительной обработки данных ДЗЗ посредством включения в ее состав разработанных в диссертации универсальных алгоритмов фильтрации и взаимного ориентирования.

Универсальный алгоритм фильтрации ТЛО позволяет удалить большинство ложных ТЛО и выполнить распознавание точек земли. Этот алгоритм использует следующую информацию: пространственное положение каждой ТЛО в массиве, значение интенсивности отраженного сигнала, порядковый номер отражения. Технологическая схема позволяет учесть внешние условия выполнения измерений. 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. Этот алгоритм подходит как для территорий, покрытых растительностью, когда плотность массива ТЛО по уровню физической поверхности земли снижается, так и для других по характеру застроенности территорий.

Универсальный алгоритм взаимного ориентирования использует информацию обо всех небольших вертикальных объектах, таких как опоры (ЛЭП, освещения и т. д.), дорожные знаки. Предложенные пороговые значения алгоритма подобраны исходя из их средней высоты. Он успешно апробирован как для незастроенной, так и для застроенной территорий, реализует комплексный подход, позволяющий принимать во внимание особенности сканируемой территории и выполнять минимальное количество дополнительных измерений.

На базе такой схемы и технологии геопространственного моделирования в соответствии с принципом преемственности было разработано технологическое решение сбора и предварительной обработки данных ВЛС. Этапы подготовительных работ и полевого сбора данных схожи с этапами схемы для МЛС. От-

личия заключаются в задаче определения необходимого количества опорных точек и расстояния между ними. Эта схема опирается на применение в составе съемочного комплекса цифровой фотокамеры.

В рамках предложенной технологической схемы были разработаны два универсальных алгоритма: фильтрации и взаимного ориентирования. Они подходят для данных ВЛС, полученных в сочетании с АФС. Универсальный алгоритм фильтрации данных ВЛС учитывает характер застройки территории, оказывающий влияние на расчет параметров АФС, в частности выбор значения поперечного перекрытия аэрофотоснимков. Универсальный алгоритм взаимного ориентирования данных ВЛС позволяет рассчитать параметры калибровки съемочной системы, случайные и систематические ошибки в траекториях полета. Преимущество схемы для данных ВЛС заключается в возможности учета уровня застроенности территории и внешних условий выполнения измерений.

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. В диссертации приведена технологическая схема сбора и предварительной обработки данных НЛС, которая позволяет подобрать методику полевого сбора данных и оптимальные методы взаимного ориентирования при предварительной обработке в зависимости от уровня застроенности территории и ее характера. Схема включает разработанный универсальный алгоритм фильтрации данных НЛС. Его рекомендуется применять при неблагоприятных условиях, описанных для данных МЛС.

На рисунке 6 приведена разработанная технологическая схема для данных АФС с БВС, полученных для железных дорог, которая может быть адаптирована и для автомобильных дорог. Ее особенностью является применение наземных измерительных средств в качестве основы для создания ПВО при использовании БВС без поддержки режима кинематики в реальном времени. Одним из таких средств является аппаратно-программный комплекс (АПК) «Профиль-М». Совместное

применение БВС и АПК «Профиль-М» позволяет не использовать другие геодезические приборы на всех этапах съемки железных дорог.

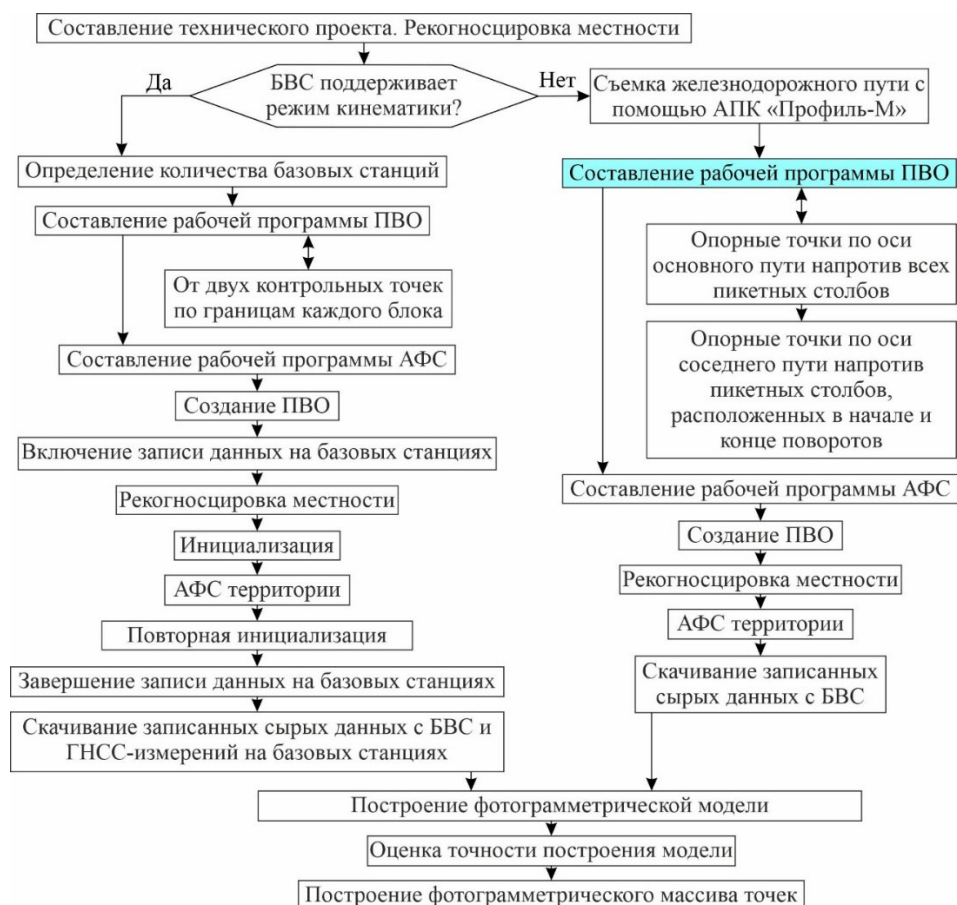


Рисунок 6 – Технологическая схема сбора и предварительной обработки данных АФС с БВС для объектов железнодорожного транспорта

В четвертом разделе приводятся разработанная система методик интеграции данных ДЗЗ для формирования гибридных точечных ПИМ и ГПИМ ОТИ. С применения этой системы начинается этап тематической обработки технологии геопространственного моделирования. В рамках такой системы были разработаны методики интеграции между данными НФС и МЛС, АФС и МЛС, ВЛС и НЛС. Получаемые по этим методикам гибридные ПИМ и ГПИМ представляются в виде трехмерных векторных или растровых моделей. Во всех точечных моделях выполняется автоматический анализ перекрытий с целью заполнения теневых зон одного вида данных другими и осуществляется распознавание объектов.

На рисунке 7 представлена разработанная методика интеграции данных АФС и МЛС, которая подходит для застроенных территорий или территорий с растительностью.

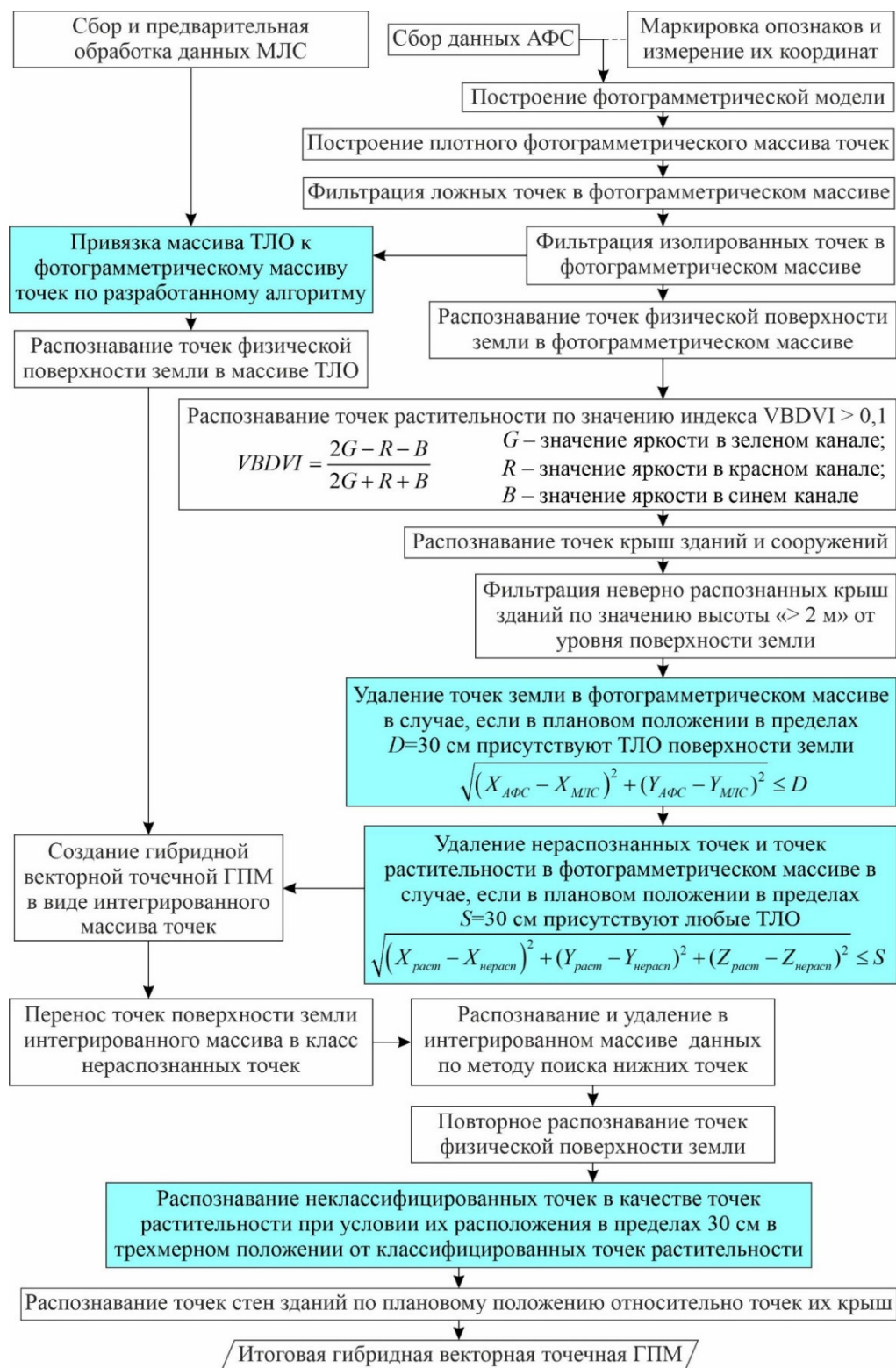


Рисунок 7 – Методика интеграции данных АФС и МЛС

Согласно разработанной методологии интеграции данных ДЗЗ, результаты АФС и МЛС могут быть совместно обработаны по двум стратегиям: результаты фотосъемки используются как опорные для привязки данных ЛС или наоборот. Для незастроенных территорий методика будет отличаться тем, что фотограмметрический массив точек будет привязываться к массиву ТЛО. Для осуществления привязки был разработан соответствующий алгоритм, заключающийся в предварительном разделении массива ТЛО на фрагменты определенного размера (рисунок 8).



Рисунок 8 – Алгоритм привязки данных МЛС к результатам АФС на основе трехмерного подхода

Представленная методика интеграции данных АФС и МЛС была адаптирована для данных ВЛС и НЛС. Основные изменения новой методики заключаются в способе привязки и содержатся в этапах, связанных с распознаванием точек земли и растительности в интегрированном массиве. 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.

В рамках предложенной системы была разработана методика построения ортофотопланов и ЦМР по данным АФС и МЛС. В этом случае основным источником данных, по которым строится ортофотоплан, является метод АФС, а метод МЛС применяется для повышения его точности путем создания точной ЦМР вблизи с точкой или траекторией съемки и применения большего количества опознаков. В свою очередь, АФС способна предоставить более точную информацию о рельефе в теневых для данных МЛС зонах.

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 АФС 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 НЛС 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.

В пятом разделе приводится усовершенствованная технологическая схема создания трехмерных векторных ГПМ объектов, методика мониторинга технического состояния автомобильных дорог и технологическая схема применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта.

Создание ГПМ в виде геометрических примитивов, твердых тел и поверхностей выполняется на основе отдельных ПИМ или на основе точечных ГПМ. Данные ДЗЗ, полученные с целью последующего моделирования, должны удовлетворять требованиям точности определения пространственных координат, измерения геометрических величин и детальности. Поэтому в диссертации дополнительно рассматривается вопрос подбора определенных моделей геодезического оборудования, что необходимо при выборе оптимальных методов сбора пространственных данных с помощью функции F_g – оценивается точность данных НЛС различных моделей лазерных сканеров в контексте решения определенных задач сферы ТИ: создание обмерных чертежей и цифровой модели поверхности (ЦМП) дорожного полотна. Показано, что не все модели геодезического оборудования подходят для их решения. Усовершенствованная технологическая схема создания трехмерных векторных ГПМ учитывает особенности применяемого программного обеспечения и современные тенденции трехмерного моделирования, заключающиеся в возросшей роли ВМ и появлении ряда дополнительных программных модулей для ВМ и САПР, позволяющих автоматизировать процесс вписывания объектов в массив точек и построения ЦМР. Исследования схемы выполнялись по данным различных объектов, относящихся к сфере ТИ – АЗС и одно из складских помещений г. Новосибирска.

Для решения задачи мониторинга технического состояния автомобильных дорог была разработана соответствующая методика, где ПИМ и ГПМ выступают в качестве исходных материалов (рисунок 9).

Предложенная методика позволяет построить ЦМП дорожного полотна, ЦМР придорожной полосы и полосы отвода. Разработанная методика была применена к данным МЛС участка автомобильной дороги между поселками 8 марта и Верх-Тула в пригороде г. Новосибирска. Исследования показали, что на основе построенных по массивам ТЛЮ ПИМ и ГПМ разработанная методика позволяет 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.

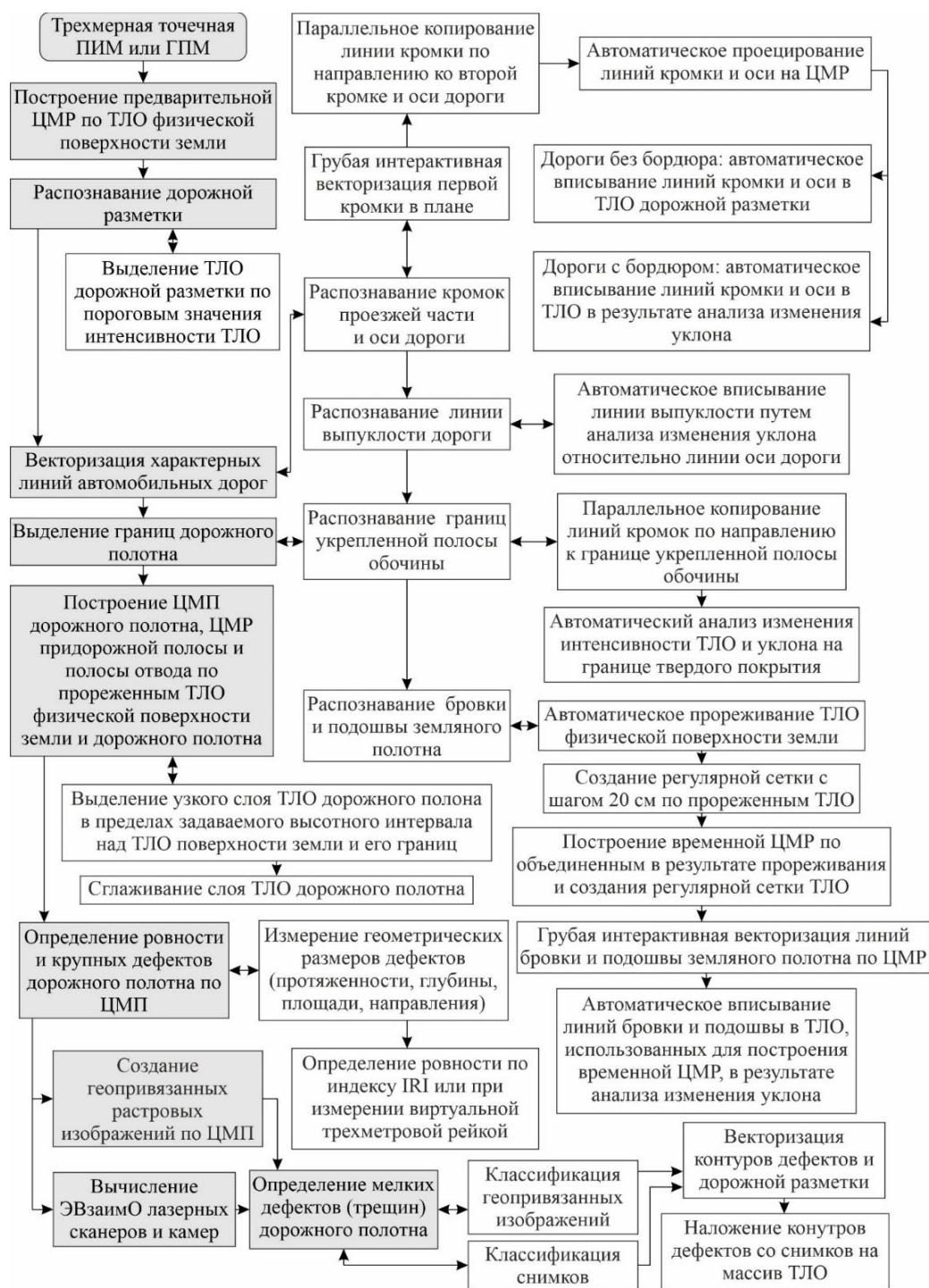


Рисунок 9 – Методика мониторинга технического состояния автодорог

Для территории железнодорожного транспорта была разработана технологическая схема применения данных ДЗЗ (рисунок 10).

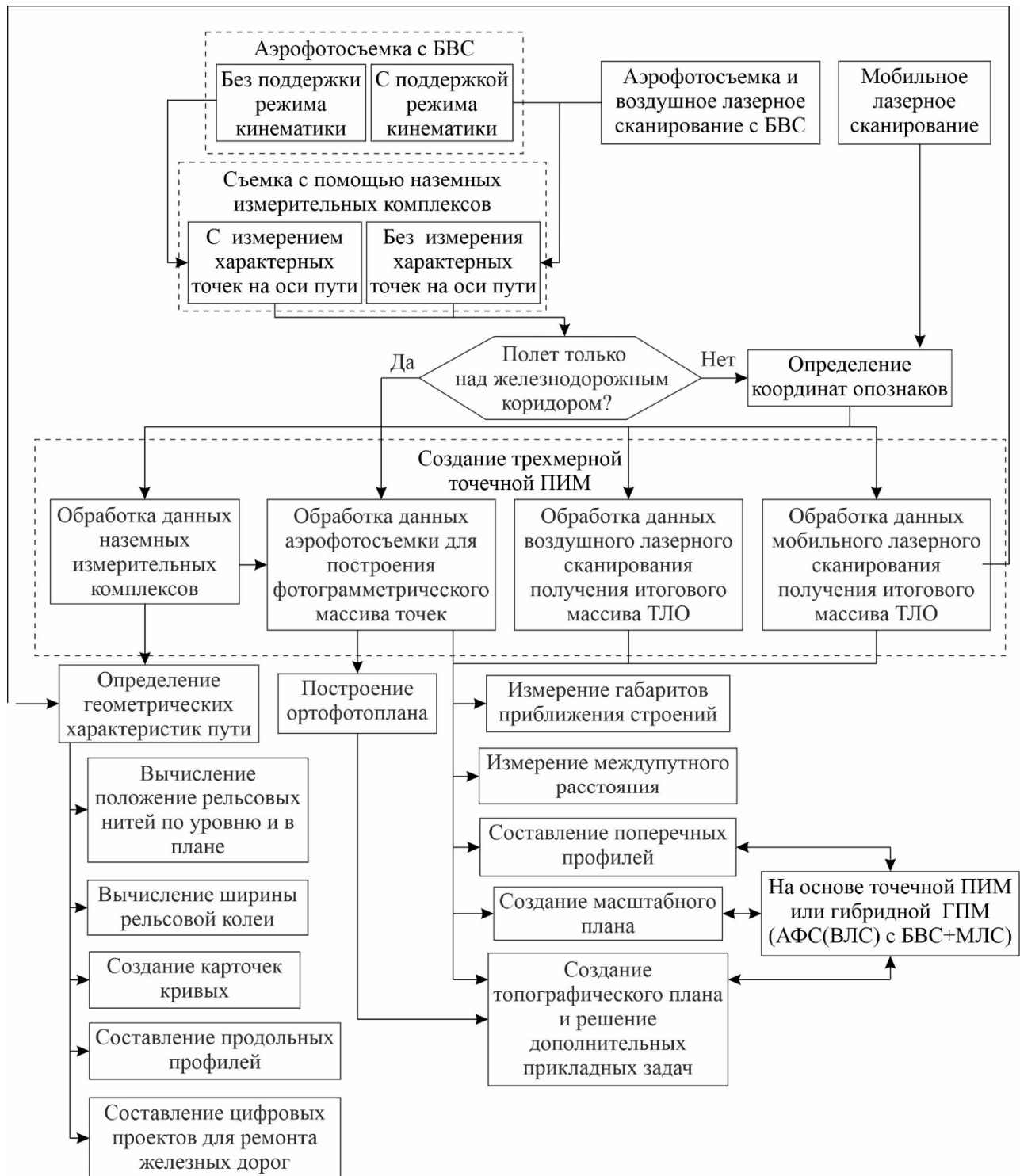


Рисунок 10 – Технологическая схема применения данных ДЗЗ для решения задач сферы железнодорожного транспорта

Эта схема включает решение следующих задач: исполнительная съемка железных дорог, создание масштабных и топографических планов, мониторинг зон затопления. Согласно этой схеме, по данным МЛС могут решаться все эти задачи, а при применении ВЛС или АФС с БВС те из них, которые не связаны напрямую с созданием цифровой модели пути. Создаваемый по данным АФС ортофотоплан также упрощает процесс создания топографического плана и решения других метрических задач. Апробация технологической схемы по данным АФС с БВС выполнялась при исполнительной съемке железных дорог перегона Тягун-Алаumbai; 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.

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 создания 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 НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Исследование достоверности определения лесотаксационных характеристик по данным воздушного лазерного сканирования / В. И. Кузин, Р. А. Попов, М. А. Алтынцев, С. А. Арбузов. – Текст : непосредственный // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2013. – № 4/С. – С. 54–57.

2 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 // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2015. – № 5/С. – С. 66–71.

3 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.

4 Гук, А.П. Автоматическая идентификация соответственных точек на аэро- снимках лесных массивов / А. П. Гук, М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 68–77.

5 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.

6 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.

7 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.

8 Алтынцев, М. А. Методика автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркоккли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 5–19. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19.

9 Алтынцев, М. А. Методика автоматизированного уравнивания данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркоккли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 5–23. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-4-5-23.

10 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.

11 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.

12 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.

13 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.

14 Алтынцев, М. А. Методика интеграции данных наземного и воздушного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2023. – Т.67, № 1. – С. 26–41. – DOI: 10.30533/GiA-2023-007 (К 1).

15 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 (К 1).

16 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 (К 1).

17 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 (К 1).

18 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 образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Текст : непосредственный.

19 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.

20 UAV aerial survey: accuracy estimation for automatically generated dense digital surface model and orthothoto plan / М. А. Altyntsev, S. А. Arbuzov, R. А. Popov., G. V. Tsoi, М. О. Gromov. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2016. – Vol. XLI(B6). – P. 155–159.

21 Application of laser scanning in the REDUS layout / М. А. Altyntsev, А. V. Ivanov, О. Schuster, Н. 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.

22 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.

23 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 Международ. конф. / Издательство Московского университета. – Москва, 2020. – Т. 26, № 1. – С. 447–463. – DOI 10.35595/2414-9179-2020-1-26-447-463.

24 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.

25 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.

26 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 Международ. конф. / Издательство Московского университета. – Москва, 2021. – Т. 27, № 1. – С. 377–393. – DOI 10.35595/2414-9179-2021-1-27-377-393.

27 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.

28 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.

29 Altyntsev, M. A. The challenge of automation for large scale topographic tmapping of oil and gas deposits based on terrestrial laserscanning 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.

30 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». – С. 96–100.

31 Алтынцев, М. А. Автоматизированное определение характерных линий автомобильных дорог по данным мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016 : сборник материалов в 2 томах XII Международного научного конгресса, Новосибирск, 18 – 22 апреля 2016 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016 – Т. 2 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 109–117.

32 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.

33 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.

34 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.

35 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.