

На правах рукописи

**Якушев Дмитрий Алексеевич**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ  
ИНФРАСТРУКТУРЫ Ж/Д В ВЫСОКОТОЧНОМ КООРДИНАТНОМ  
ПРОСТРАНСТВЕ ПО ДАННЫМ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО  
СКАНИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики.

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном Учреждении «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук».

Научный руководитель: **Дулин Сергей Константинович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кукушкин Сергей Сергеевич**  
Доктор технических наук, профессор,  
АО «Российские космические системы»,  
Заместитель начальника отдела

**Манойло Дмитрий Сергеевич**  
Кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Геодезия, геоинформатика и навигация» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II"

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

Защита состоится “\_\_” \_\_\_\_\_ 2017 года в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.073.05 при Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН) Российской Академии Наук по адресу: 119333, Москва, ул. Вавилова, дом 40, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного Учреждения «Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук и на сайте [www.frccsc.ru](http://www.frccsc.ru).

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ 2017 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д002.073.05  
доктор физико-математических наук, профессор

Рязанов В.В.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Обусловлена следующими обстоятельствами:

- Необходимостью перехода к описанию железнодорожного пути как трехмерного пространственного объекта («цифровая ж.д.»).
- Необходимостью автоматизации процесса создания цифровой модели пространства и перевод в цифровой вид массива точечных измерений (интеллектуальная обработка информации).

Основной формой проведения мониторинга инфраструктуры железнодорожного транспорта являются периодические съемки и наблюдения. Система мониторинга является важнейшим, связующим звеном всех подсистем обеспечивающих гарантированную безопасность железнодорожного транспорта и надежность перевозочного процесса.

В настоящее время в соответствующих службах передовых стран мира стали разрабатываться технологии текущего содержания пути, проектирования и строительства на основе описания железнодорожного пути как трехмерного пространственного объекта. Для этого созданы и поддерживаются на уровне современных требований цифровые модели пути (ЦМП) и объектов инфраструктуры, обеспечивающие единый формат описания положения пути и других объектов ИЖТ, и используемые для дальнейшего анализа и сравнения проектных и фактических данных.

Наиболее перспективным способом сбора пространственных данных для формирования ЦМП является направление мобильного лазерного сканирования (МЛС), совмещающее в себе черты воздушного сканирования (мобильность) и наземного (плотность и точность измерений). Подобные системы могут единовременно собирать больше данных в день, чем команда геодезистов, использующая традиционные методы в течение недель или даже месяцев, хотя съемка протяженных (более 100км) объектов все равно занимает несколько дней. Основная проблема заключается в том, что ввиду сложной траектории прохождения GPS-сигнала и специфики движения системы по железной дороге, измерения, полученные даже в течение одного дня, имеют некоторый разброс. И задача состоит в разработке технологии, позволяющей использовать данный вид измерений для создания высокоточной цифровой модели пути и объектов близлежащей инфраструктуры.

Зарубежный опыт (применяемый, в частности, на ж.д. Германии и Франции) основан на использовании данных преимущественно исходного, точечного (не векторизованного) вида. В России реализуется масштабный проект который был запущен в 2011 году в интересах компании ОАО «РЖД» с упором на создание трехмерной векторной пространственной базы данных, охватывающей все видимые объекты инфраструктуры. Актуализация измерений (и выявление динамики изменений объектов) предполагает использование средств диагностики, установленной на пассажирский подвижной состав. По сравнению с аналогичными, применяемыми за

рубежом методами мониторинга, рассматриваемый в работе подход характеризуется масштабностью, масштабируемостью и возможностью адаптации к специфическим требованиям ОАО «РЖД».

Начиная с 2012 года, в рамках проекта создания Интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ), разрабатываемой ОАО НИИАС, велись собственные активные технологические разработки, позволяющие автоматизировать процесс формирования трехмерной пространственной базы данных ИЖТ в которых автор принимал активное участие.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в инновационном подходе к содержанию пути (согласно распоряжениям ОАО «РЖД» №1329р от 25.05.2015 и №3234р от 31.12.2015), а также решению задач, связанных с комплексной программой трансформации российской железнодорожной отрасли при помощи цифровых технологий:

- интеллектуальным управлением движением;
- комплексной безопасностью;
- трехмерным информационным моделированием объектов инфраструктуры;
- предсказательной аналитикой и интеллектуальным анализом данных;
- внедрение малолюдных технологий и цифровых сервисов для пассажирских и грузовых перевозок;

### **Описание текущего состояния использования пространственных данных об объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта в ОАО «РЖД»**

Использование пространственных данных об объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта (ИЖТ) характеризуется в настоящий момент следующим образом:

- сбор и формирование пространственных данных происходит недостаточно эффективно и децентрализовано, без четких планов и установленной системы стандартов;
- отсутствуют единые требования к формам представления объектового состава и точности хранения данных;
- данные, получаемые из разных источников, дублируются, противоречат друг другу и имеют низкую достоверность и точность. Формируемая на их основе проектная документация содержит коллизии;
- службы ж.д. используют различные методы для определения пространственной привязки объектов.

В результате отсутствует возможность:

- реализации единой для департаментов, служб и дирекций ОАО «РЖД» системы хранения и предоставления пространственных данных об объектах инфраструктуры;

- обеспечения эффективного проектного содержания пути и объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Все это приводит к низкой эффективности использования пространственных данных.

Наиболее проработанным методом сбора пространственных данных, с точки зрения технологии, является измерение координат железнодорожного пути, осуществляемые традиционными геодезическими способами с применением электронных тахеометров и цифровых нивелиров. Решение проверенное временем, обеспечивает миллиметровую точность, но требует существенных затрат на создание высокоточного координатного пространства в области где проводятся измерения.

Технология выполнения съемки с помощью МЛС является инновационной в области выполнения измерений для создания картографических материалов, паспортизации, мониторинга и фиксации состояния протяженных инфраструктурных объектов. В отличие от автодорог, съемка и последующая обработка собранной информации на ж.д. является нетривиальной задачей ввиду значительных ограничений по передвижению сканирующей системы и, как результат, возникающих при этом погрешностей измерений.

Отсюда **цель данного диссертационного исследования** - разработка эффективной технологии обработки пространственных данных и создания цифровой модели пути (ЦМП) в условиях неоднородности исходных данных или их частичного отсутствия.

Решение поставленной цели было найдено в не стандартном использовании технологии мобильного лазерного сканирования в части ее применения на железной дороге. В процессе диссертационной работы, были проанализированы практические материалы лазерного сканирования, полученные в результате работ на 8887км ж.д., и сформулированы рекомендации по получению исходных данных, пригодных для дальнейшей обработки; проведен поиск и апробация аналогичных (или похожих) решений; адаптированы алгоритмы по распознаванию типовых объектов инфраструктуры на основе непрерывно поступающей информации; формализовано описание ЦМП и отработана технология по ее формированию с привязкой к внедряемой в ОАО «РЖД» высокоточной системе координат (ВКС).

В качестве прототипа метода вычисления оси пути (базовый элемент инфраструктуры, лежащий в основе ЦМП), было использовано программное обеспечение немецкой компании TechNet Rail 2010, адаптированное под российские условия и что самое важное – под абсолютно другое (худшее) качество исходных данных. Сама технология создания ЦМП по данным МЛС уникальна.

### **Методы исследования.**

Для достижения поставленных целей предлагается оригинальный комплексный подход к приведению геоинформационных ресурсов в соответствие с современными требованиями к научно-техническим разработкам на основе создания и актуализации геоинформационного пространства, основные модели которого должны быть встроены в централизованную базу данных.

Предлагаемые в данной работе методы обработки и интеграции разнородной информации соответствуют последним мировым достижениям в этой области ведущих производителей ГИС, таких как компания AutoDesk, компания ESRI, компания Bentley Systems, и др., а методы организации техногенных объектов железнодорожного транспорта являются новаторскими в области интеллектуальных систем обеспечения аналитической деятельности специалистов РЖД.

Поскольку любые измерения параметров железнодорожных объектов (мониторинг) должны производиться в единой координатной системе, то в качестве таковой рассмотрена высокоточная координатная система РЖД, позволяющая производить точную привязку данных вне зависимости от принадлежности к субъекту РФ.

Основной акцент работы сделан именно на способах, методике, технологии получения качественной, непротиворечивой исходной информации, являющейся фундаментом для последующих аналитических задач.

Существенное внимание уделено правильной трактовке такой дефиниции, как точность. Рассмотрены сущности паспортных и реальных погрешностей используемых при создании ЦМП технических и программных средств.

Теоретические и практические исследования базируются на методах распознавания образов (алгоритмы классификации, вероятностный генетический алгоритм), системного программирования, локальном методе выделения краев изображений и дискриминантной функции.

**Научная новизна.** В диссертационной работе приводится описание уникальной технологии обработки данных мобильного лазерного сканирования с целью получения высокоточной трехмерной ЦМП и объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, а также математические алгоритмы распознавания (идентификации) отдельных ее элементов.

В качестве новых решений:

- Впервые предлагается использование данных мобильного лазерного сканирования для создания на уровне современных требований цифровых моделей пути и объектов инфраструктуры, используемых для сбора, хранения пространственных данных о текущем состоянии пути, выработки рекомендаций по устранению выявленных неисправностей, а

также для позиционирования подвижного рельсового транспортного средства на железнодорожном пути в реальном режиме времени.

- На основе дискриминантной функции разработан и апробирован на реальных данных (полученных в результате МЛС) метод определения фактической геометрической формы земляного полотна и сравнения с проектной формой профиля.

- Алгоритм Хафа (обнаружение прямых линий на бинарном изображении) адаптирован под задачи автоматического определения местоположения и идентификацию опор контактной сети в облаке точек лазерного отражения, что позволяет проводить автоматическую оценку критических параметров ПТЭ.

- Разработан метод полуавтоматического вписывания трехмерной фигуры рельсы в облако точек лазерного отражения с последующей проверкой качества векторизации, позволивший создавать точную параметрическую модель оси пути и заменить используемое ранее коммерческое программное обеспечение.

- Разработана структура базы геоданных объектов железнодорожной инфраструктуры и правил их семантического описания, позволяющая работать со следующими типами данных: векторные данные для представления пространственных объектов, растровые данные для представления непрерывных полутонных изображений, сеточных тематических данных и поверхностей, нерегулярные триангуляционные сети для представления поверхностей, адреса и локаторы для нахождения географического положения.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

- Разработанная технология создания трехмерной цифровой модели инфраструктуры пространственных данных железных дорог и методы автоматизации построения отдельных объектов используются в технологической цепочке работ для анализа и сравнения проектных и фактических данных.

- Разработан метод полуавтоматического вписывания шаблона рельсы определенного формата (R65) в облако точек лазерного отражения с последующей автоматической проверкой качества векторизации рельсовой нити.

- Дискриминантная функция (поиск краевых точек) реализована в алгоритмах идентификации опор контактной сети и восстановления геометрической формы земляного полотна.

- Данные, получаемые на основе трехмерных цифровых моделей инфраструктуры железнодорожного транспорта используются автоматизированной географической системой формирования и актуализации единой электронной карты РЖД для бортовых устройств подвижного состава (ЕГИС ТПС).

- Классификатор пространственных объектов железных дорог ОАО «РЖД», используется во внедряемой в АО «РЖД» комплексной системе пространственных данных (КСПД ИЖТ).

- Разработанная технология внедрена в комплекс высокоточных съемочных работах, проводимых в интересах АО «РЖД», по ней в частности сформированы и загружены в комплексную систему пространственных данных (КСПД ИЖТ) модели инфраструктуры на более чем 8887 км трассы. ЦМП используется при проведении работ по обеспечению безопасности движения ж.д. транспорта, в частности для расчета негабаритных объектов на участках Московской, Октябрьской, Горьковской, Северо-Кавказской, Юго-Восточной железных дорог (всего 16000 км по главным путям), составления электронных карт безопасности движения локомотивов на участке Москва-Рязань I, формирования ведомостей расстояний до объектов инфраструктуры.

**На защиту выносятся следующие результаты:**

- Методы и алгоритмы автоматического и полуавтоматического распознавания и моделирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, нивелирующие ошибки, возникающие в процессе сбора исходных данных;

- Состав объектов ЦМП в виде классификатора пространственных данных железных дорог ОАО «РЖД»;

- Технология создания высокоточной трехмерной цифровой модели пути, обеспечивающая единый формат описания положения пути и других объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта с заданной точностью;

- Структура базы геоданных объектов железнодорожной инфраструктуры и правил их семантического описания.

- Метод полуавтоматического вписывания трехмерной фигуры рельсы в облако точек лазерного отражения с последующей проверкой качества векторизации, позволивший создавать точную параметрическую модель оси пути и заменить используемое ранее коммерческое программное обеспечение.

- Методические рекомендации к организационным и техническим условиям проведения измерений методом МЛС для получения субсантиметровой точности геопространственных данных на основе обобщения 6-летнего опыта проведения мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры методом мобильного лазерного сканирования.

**Апробация.** Основные положения диссертации докладывались на конференциях в период с 2012 по 2016 годы:



- на II Межотраслевой научно-практической конференции «Трёхмерное проектирование жизненного цикла объектов инфраструктуры. Строительство. Эксплуатация». Санкт-Петербург, 2013;
- на первой конференции Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2012), Москва, 2012;
- на второй конференции Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2013), Москва, 2013;
- на 5-й международной конференции «Pattern Recognition and Machine Intelligence» (PReMI 2013), Калькутта, Индия, 2013;
- на научной сессии НИЯУ МИФИ, Москва 2013;
- на конференции «Машинное зрение», выставка All-over-IP, Москва 2013;
- на третьей ежегодной конференции пользователей Bentley Systems: "Инфраструктура будущего. Расширяем горизонты" Москва, 2014;
- на конференции Bentley CONNECTION. Москва, 2015;
- на пятой конференции Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2016), Москва, 2016.

По результатам, полученным в ходе выполнения данной работы 30.01.2015г был получен патент на изобретение № 2579606 «Способ позиционирования подвижного рельсового транспортного средства на железнодорожном пути».

Результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, вошли в ежегодные отчеты по успешно завершённому проекту Российского фонда фундаментальных исследований № 11-07-00225 «Интеллектуализация методов описания геоинформационных объектов и технологических процессов», а также в ежегодные отчеты по выполняющемуся проекту Российского фонда фундаментальных исследований № 14-07-00040 «Разработка методов обеспечения семантической геоинтероперабельности при решении задач концептуального поиска геоданных».

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликованы 11 печатных работ, 5 из них в изданиях по перечню ВАК.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (наименований) и приложения. Работа изложена на 191 странице, включающих 78 рисунков и 11 таблиц. Список использованной литературы включает в себя 62 наименования.

## **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, изложена его научная новизна, раскрыты теоретическое значение и практическая ценность полученных результатов, кратко излагается содержание диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена обзору компонентов, на основе которых строится ЦМП, их характеристикам и анализу зарубежного опыта их

использования. По результатам данного обзора сформулированы следующие предложения:

1. Предложен последовательный, 2-х стадийный метод формирования ЦМП, позволяющий с одной стороны достаточно быстро проводить сравнения проектных и фактических данных по состоянию пути, с другой стороны - обеспечивающий единый формат описания положения пути и других объектов ИЖТ для дальнейшего камерального анализа.

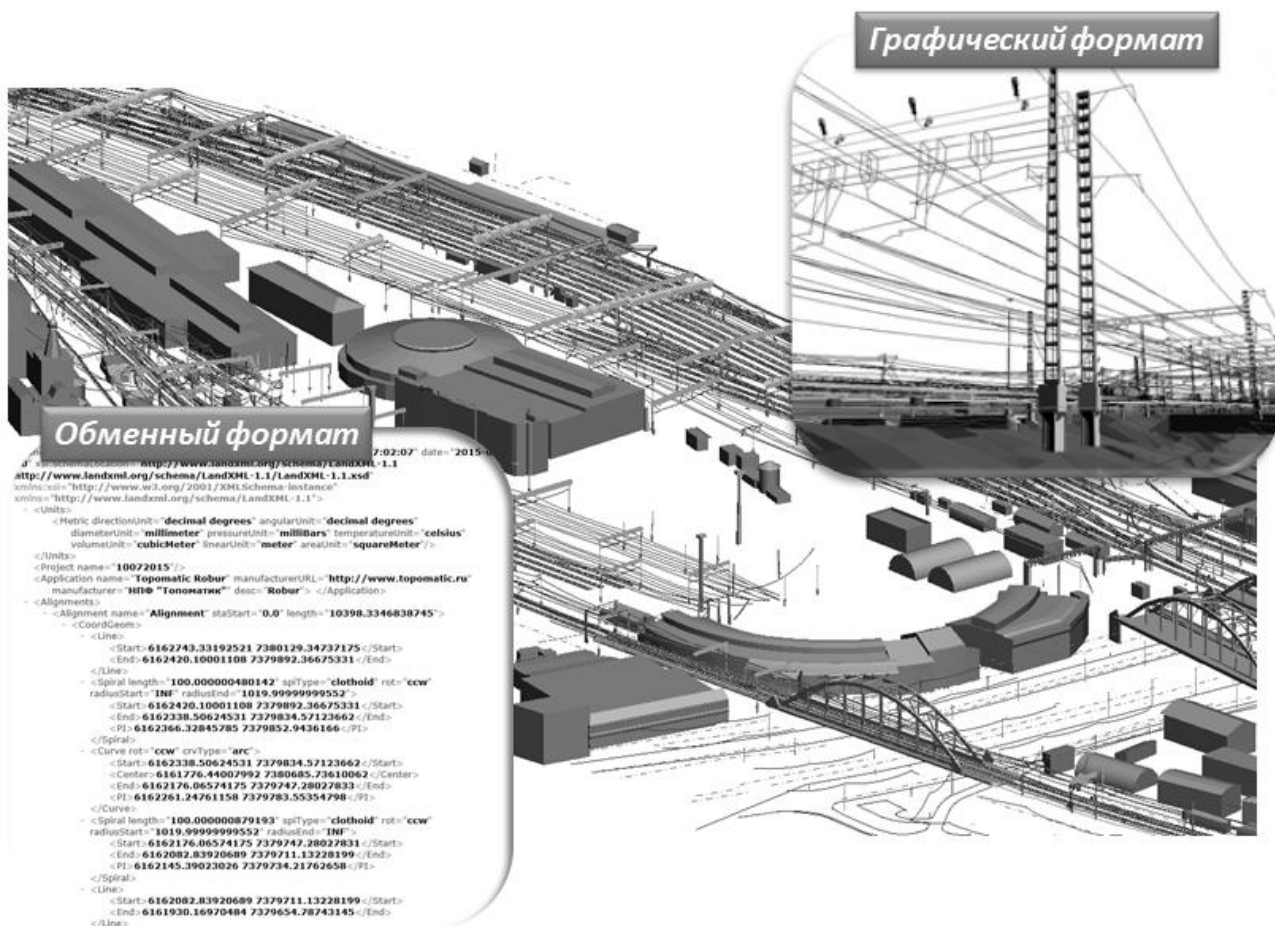


Рис.1 Полный состав ЦМП

2. Установлено что мониторинг инфраструктуры ж.д. транспорта (ИЖТ) невозможно проводить без привязки к высокоточной координатной сети (ВКС), которая должна охватывать все направление целиком, без деления по административным границам. Примечание - это нашло отражение в постановлении Правительства №861 от 27.08.2014 о внесении изменений в Правила установления местных систем координат.

3. Доказано, что имея высокоточную координатную сеть (ВКС) вдоль трасс железных дорог, можно производить инженерные изыскания с уверенностью, что результаты повторных измерений будут лежать в одном координатном пространстве и поколения данных, собранных в разное время на одном участке можно будет сравнить между собой.

4. Определено, что в качестве элементов высокоточной координатной сети, наиболее пригодных для точной идентификации

объектов ИЖТ могут быть использованы анкера и фундаменты опор контактной сети.

**Во второй** главе рассмотрены варианты систем лазерного сканирования и особенности их использования для задач построения ЦМП и инфраструктуры ж.д. На основе реального опыта эксплуатации систем лазерного сканирования проведен анализ факторов, влияющих на абсолютную и относительную точность измерений. Это позволяет избирательно и более осмысленно подходить к информации, поступающей с системы МЛС и загружаемой в алгоритмы по автоматическому и интерактивному распознаванию объектов инфраструктуры с заданной точностью.

В результате:

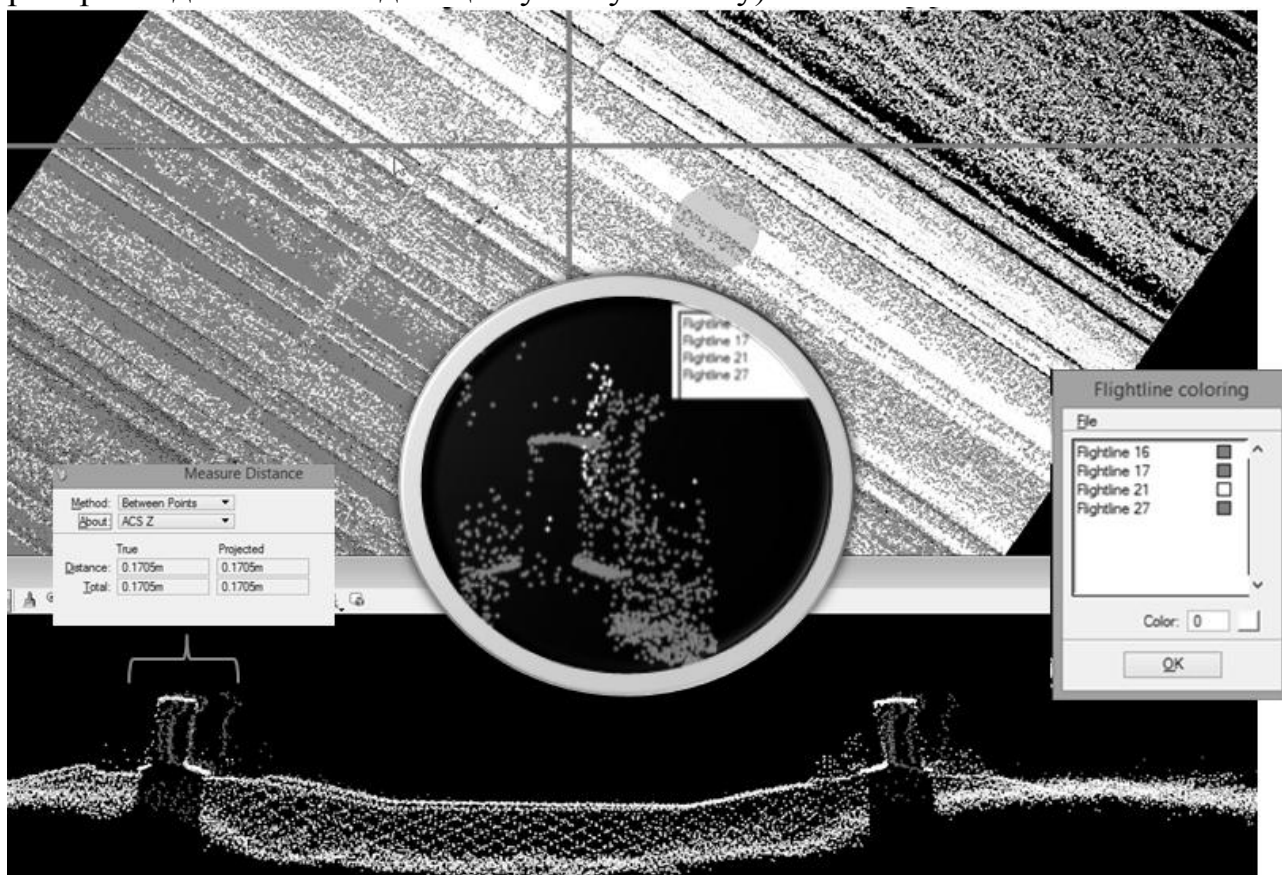
1. Была проведена работа по анализу практического опыта проведения съемки методом МЛС на 8887 км ж.д., обозначены все потенциальные проблемы организационного характера и даны рекомендации по их преодолению. Выявлены ограничения обусловленные спецификой использования технологии мобильного лазерного сканирования на ж.д., препятствующие получению качественного результата и разработаны практические рекомендации по их устранению (обходу).

2. Разработаны основные положения экспресс-анализа результатов первичной обработки данных съемки методом МЛС. Поскольку процесс последующей камеральной обработки занимает гораздо большее время по отношению к процессу получения исходных данных, предложена методика оперативной оценки качества съемки. Главным результатом экспресс-анализа является определение степени доверия к полученным данным (пригодны данные для камеральной обработки или нет). По существу сформулировано предложение по организации обратной связи между 2-мя разнесенными в организационном, временном пространстве процессами.

3. Полученные в результате практических работ данные проанализированы с точки зрения происхождения ошибок измерений вызванных спецификой использования МЛС на железной дороге. Определены условия минимизации как абсолютных (влияющих на пространственное расположение измеренного объекта на местности), так и относительных (влияющих на взаимное положение объектов) ошибок измерений.

4. Определены требования к качеству репера - ключевого объекта, используемого для сведения (уравнивания) данных разных проходов между собой. В частности установлено, что для исключения геометрических искажений, репера должны располагаться не попарно (как это практиковалось в начале работ), а последовательно и равномерно вдоль ж.д. пути. Кроме этого экспериментально подтверждена недостаточная точность координирования существующих реперных объектов для точного позиционирования данных МЛС. Автором предложены альтернативные

методы координирования (по трем плоскостям, проведенным по поверхности репера и однозначно задающих угловую точку).



*Рис.2 Пример неоднородности исходных данных*

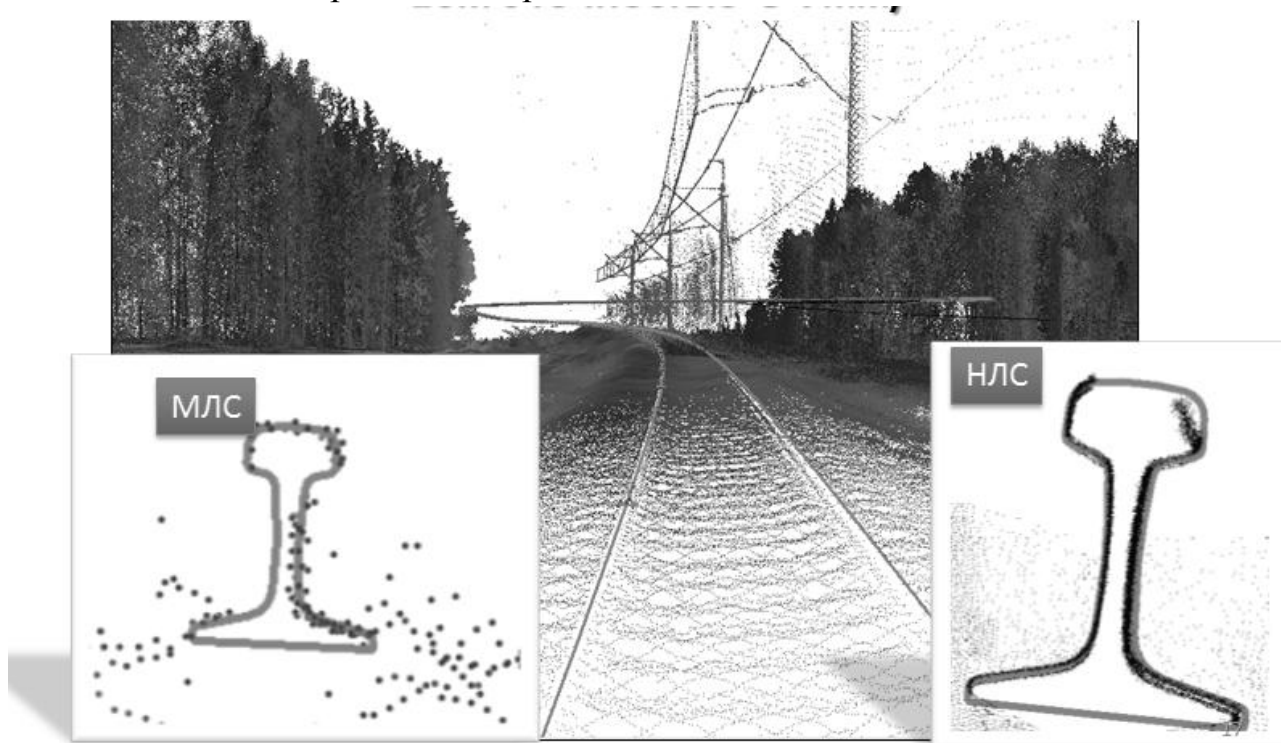
**Третья глава** посвящена описанию предложенных алгоритмов и методов автоматической/полуавтоматической идентификации элементов ИЖТ в облаке точек лазерного сканирования и результатам тестирования разработанных методов и алгоритмов. На основании общих требований были разработаны классификатор объектов ИЖТ и технология обработки данных мобильного лазерного сканирования, используемая для создания высокоточной трехмерной цифровой модели пути и объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта АО «РЖД».

Одним из ключевых моментов распознавания объектов ИЖТ по материалам мобильного лазерного сканирования является преобразование входной информации (представленной в виде точек лазерного сканирования) в векторный вид (трехмерная модель) позволяющий однозначно идентифицировать любой видимый объект инфраструктуры. Векторная модель в данном случае выступает в роли «носителя» семантической и пространственной информации о каждом конкретном объекте ИЖТ.

Применяемое геодезическое оборудование постоянно совершенствуется и это приводит к валлообразному увеличению входной информации. В связи с этим, предложенная технология обработки пространственных данных становится все более актуальной, поскольку предусматривает распараллеливание операций и возможность автоматизации

каждой конкретной операции по моделированию, что минимизирует время от проведения съемки до получения конечного результата, в виде пространственной базы данных элементов ИЖТ.

В части автоматизации моделирования объектов инфраструктуры ИЖТ были разработаны алгоритмы автоматического распознавания опор контактной сети, характерных точек земляного полотна (бровки/подошвы балластной призмы и земляного полотна) и метод векторизации рельсовой нити по точкам лазерного сканирования.



*Рис.3 Векторизация рельсовой нити и построения оси путя по точкам лазерного сканирования*

Приведем краткое описание разработанных алгоритмов и методов автоматической/полуавтоматической идентификации элементов ИЖТ на примере опор контактной сети ж.д.:

Предлагается решение трех задач. Первая задача состоит в автоматическом поиске опор контактной сети внутри облака точек или в обнаружении точек, которые являются откликами от опор контактной сети. Вторая задача состоит в выборе подходящих 3D моделей опор контактной сети, позволяющих осуществлять их автоматическую детекцию и идентификацию. Третья задача состоит в нахождении оценок параметров положения объектов типа «опора контактной сети» и связана с применением алгоритмов оптимизации. Для решения указанных задач предлагается использовать обобщенное преобразование Хафа для предварительного обнаружения опор контактной сети, а в качестве 3D-моделей использовать аналитические функции расстояния. Задачу оценки параметров пространственного положения опоры контактной сети предлагается решать с помощью вероятностных генетических алгоритмов.

Будем считать, что точки, полученные в результате сканирования, заданы в декартовой системе координат и ось  $O_z$  выбрана перпендикулярно поверхности земли, тогда точки, лежащие на одной прямой, перпендикулярной поверхности земли, будут иметь одинаковые координаты по оси  $O_x$  и оси  $O_y$ . Очевидно, что каждая такая прямая однозначно определяется координатами  $x$  и  $y$  и данное преобразование можно рассматривать как обобщение преобразования Хафа для обнаружения прямых одной направленности в облаке трехмерных точек. С учетом этого, имеем множество точек  $(x_i, y_i, z_i)_{i=1}^N$  и поиск точек, расположенных на прямых параллельных оси  $O_z$  можно осуществлять с помощью следующей процедуры:

1. Построение гистограммы в плоскости  $O_{xy}$ :

$$x_{\min} = \min_{i=1, \dots, N} x_i, \quad x_{\max} = \max_{i=1, \dots, N} x_i, \quad y_{\min} = \min_{i=1, \dots, N} y_i, \quad y_{\max} = \max_{i=1, \dots, N} y_i;$$

выбор  $N_x$  - числа ячеек гистограммы вдоль оси  $O_x$ ;

выбор  $N_y$  - числа ячеек гистограммы вдоль оси  $O_y$ ;

построение гистограммы, которая описывается с помощью целочисленного массива чисел  $(q_{ij})_{N_x \times N_y}$ :

$$q_{ij} := 0, \quad i = 1, \dots, N_x, \quad j = 1, \dots, N_y, \quad k := 1, \dots, N$$

$$i := \text{floor}\left(\frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} N_x\right), \quad j := \text{floor}\left(\frac{y_k - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} N_y\right),$$

$$q_{ij} := q_{ij} + 1.$$

2. Нахождение локальных максимумов в гистограмме  $q_{ij}$ .

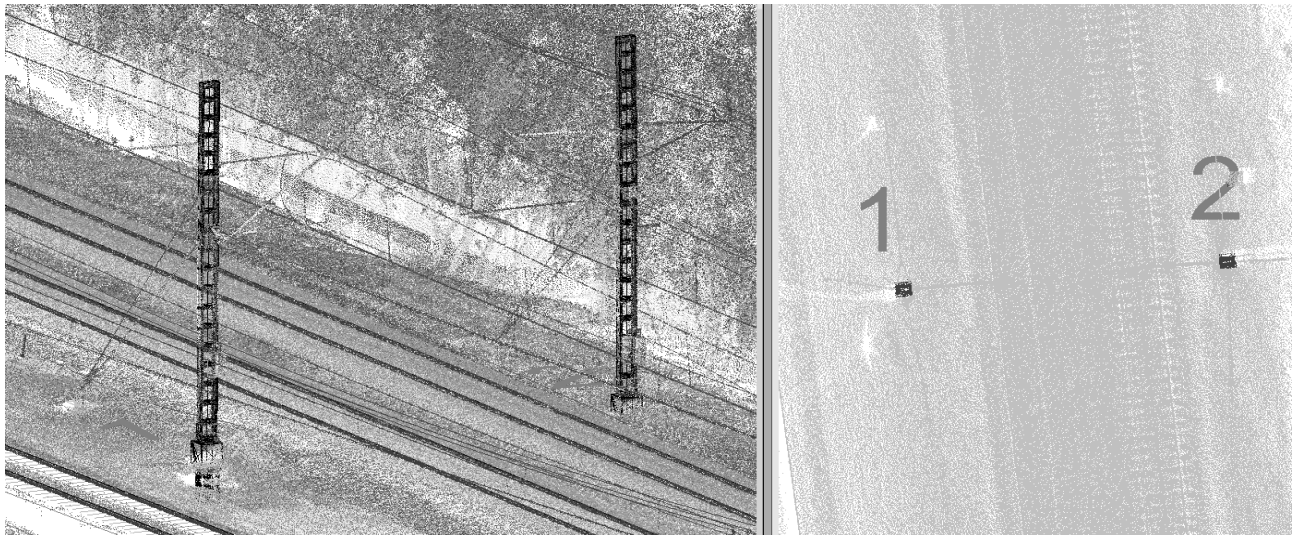
3. Пусть  $q_{ij}$  - это локальный максимум гистограммы, тогда соответствующие координаты точки в плоскости  $O_{xy}$  можно найти по

$$x_{line} = \frac{i(x_{\max} - x_{\min})}{N_x} + x_{\min}, \quad y_{line} = \frac{j(y_{\max} - y_{\min})}{N_y} + y_{\min}.$$

По найденным прямым можно выделить точки, относящиеся к опорам контактной сети. Для этого вводится параметр  $h$ , с помощью которого выделяются все точки, которые расположены на расстоянии не большем, чем  $h$  от найденной прямой:

$$x_i, y_i, z_i \mid x_i - x_{line}^2 + y_i - y_{line}^2 \leq h^2.$$

На рис. 4 (правое окно) показана полученная гистограмма. Темные точки на ней соответствуют положению опор контактной сети. Видно, что по гистограмме явно выделяются 2 опоры контактной сети.



*Рис.4 Точки отражения лазерного сканирования (слева) и гистограмма распределения точек относительно найденной по Хафу прямой (справа).*

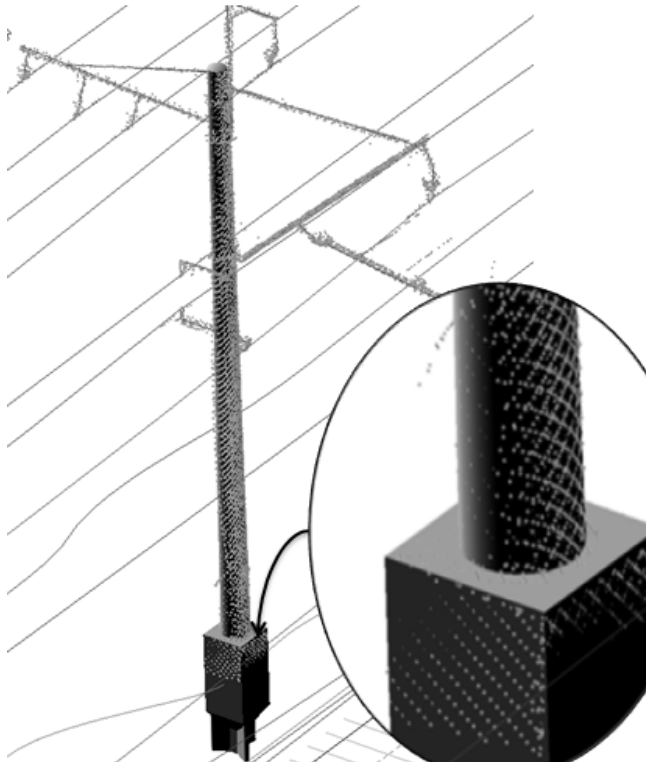
После рассмотренной процедуры обнаружения опор контактной сети требуется провести их идентификацию и уточнить параметры их пространственного положения. Это делается с помощью трехмерных моделей, базирующихся на аналитических функциях расстояния, а также метода глобальной оптимизации, основанного на принципах построения генетических вероятностных алгоритмов.

Будем считать, что у нас есть трехмерная модель опоры контактной сети, заданная функцией расстояния  $f(\mathbf{x}, \mathbf{a})$ , которая дает расстояние от точки  $\mathbf{x}$  до объекта, пространственное положение которого, а также другие характеристики определяет вектор параметров  $\mathbf{a}$ . Тогда оценивание вектора параметров по множеству точек  $X = \{\mathbf{x}_i\}$  может быть получено как решение следующей оптимизационной задачи относительно вектора параметров  $\mathbf{a}$ :

$$F(X, \mathbf{a}) = \sum_{\mathbf{x}_i \in X} f^2(\mathbf{x}_i, \mathbf{a}) \rightarrow \min$$

Поскольку функционал  $F(X, \mathbf{a})$ , как правило, имеет неважные дифференциальные свойства, которые желательны для применения классических методов оптимизации, предлагается метод оптимизации, основанный на идее, используемой при построении вероятностных генетических алгоритмов. Данная идея заключается в следующем. Предположим, что имеется вероятностное распределение вектора параметров  $\mathbf{a}$ , отражающее информацию о возможных отклонениях  $\mathbf{a}$  от нормативных показателей. По этому распределению генерируется выборка (популяция) решений. Далее проводится селекция выборки, заключающаяся в том, что из нее удаляются менее оптимальные решения. После этого по усеченной выборке оценивается новое вероятностное распределение решений и рассмотренные выше этапы повторяются. Теоретически получаемая последовательность вероятностных распределений должна сходиться к точечному вероятностному распределению Дирака, которое и определяет искомый глобальный экстремум. При этом рассматриваемая задача

значительно упрощается, если предположить независимость параметров в генерируемых выборках. Такое предположение является достаточно правдоподобным, если считать, что искомые параметры незначительно отклоняются от нормативных. Пользуясь предположениями, описанными выше, можно формализовать предлагаемую схему вычислений с помощью следующей процедуры.



**Таблица 1. Параметры утилиты автоматического вписывания опор контактной сети в облако точек**

Переменная (значение по умолчанию)	Описание
<code>middleGround</code>	Средний уровень земли внутри области поиска
<code>trueHeight</code>	«Истинная» высота опоры
<code>sectionCount</code>	Кол-во сечений
<code>sectionHeight = 0.30</code>	Высота\глубина сечения по Z
<code>sectionStep=0.15</code>	Промежуток между сечениями
<code>stdReduceTolerance=2.5</code>	Коэффициент фильтрации при вычислении стандартного отклонения, 2.5 - отбросить все что в 2.5 раза больше среднего
<code>RmaxL = 0.45</code> <code>RmaxH = 0.32</code>	Ограничения на радиусы столбов, если алгоритм определения радиуса сработает неверно. <code>RmaxL</code> – нижний радиус, <code>RmaxH</code> – верхний радиус
<code>deltaR = 0.01,</code> <code>stepR = 0.003,</code> <code>limX = 0.15, limY = 0.15</code>	Разница между внешней и внутренней окружностями вписывания Шаг, с которым происходит вписывание (точность вписывания)
<code>badPointsCount</code>	Пределы вписывания по X и Y, образуют прямоугольник [-0.15.. 0.15; -0.15.. 0.15] Кол-во «плохих» точек – за пределами окружностей

*Рис. 5. Пример использования параметров положения опор контактной сети определенных с помощью вероятностного генетического алгоритма*

0. Входные данные: функция расстояния  $f(\mathbf{x}, \mathbf{a})$ ,  $\mathbf{a}^{(0)}$  - начальное значение вектора параметров,  $\sigma^{(0)}$  - начальный вектор среднеквадратических отклонений параметра  $\mathbf{a}$ ,  $i := 0$ .

1. Генерация выборки возможных решений  $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_N$  и ее упорядочивание таким образом, чтобы  $F(X, \mathbf{a}_1) \leq F(X, \mathbf{a}_2) \leq \dots \leq F(X, \mathbf{a}_N)$ .

2. Усечение выборки, которое заключается в том, что мы в ней оставляем наиболее оптимальные решения до некоторого индекса  $N_1$  ( $N_1$  - это параметр алгоритма и выбирается равным  $0.3N$ ).

3. Нахождение оценок математического ожидания и среднеквадратических отклонений по усеченной выборке  $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_{N_1}$ :

$$\mathbf{a}^{(i+1)} = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} \mathbf{a}_k, \quad \sigma^{(i+1)} = \sqrt{\frac{1}{N_1 - 1} \sum_{k=1}^{N_1} \mathbf{a}_k - \mathbf{a}^{(i+1)}{}^2},$$

причем в последней формуле операции возведения в степень и извлечения корня предполагаются по координатам.



4.  $i := i + 1$ . Если  $|\sigma^{(i)}| \leq \varepsilon$ , то в качестве решения выбирается  $\mathbf{a}^{(i)}$ , иначе переход к шагу 1.

Приведенный выше алгоритм (совместно с другими) использован в сквозной технологии обработки пространственных данных, позволяющей с одной стороны минимизировать затраты обработки, а с другой - повысить контролируемость процесса и точность моделирования.

Полная технологическая цепочка разбита на 6 отдельных этапов, которые достаточно независимы, операции могут быть распараллелены между отдельными исполнителями. Результат выполнения каждого этапа формализован.

Разработанная технология была внедрена в АО «Транспутьстрой», специализирующейся на работах, основанных на использовании геоанных.

Пример практического использования ЦМП на станции московской кольцевой железной дороги «Пресня» приведен на рис.6.



Рис.6 Формирование ведомости расстояний до объектов инфраструктуры (СЦБ), находящихся в пределах станции в системе координат ВКС.

Общая блок-схема формирования трехмерных пространственных моделей приведена на рисунке 7.

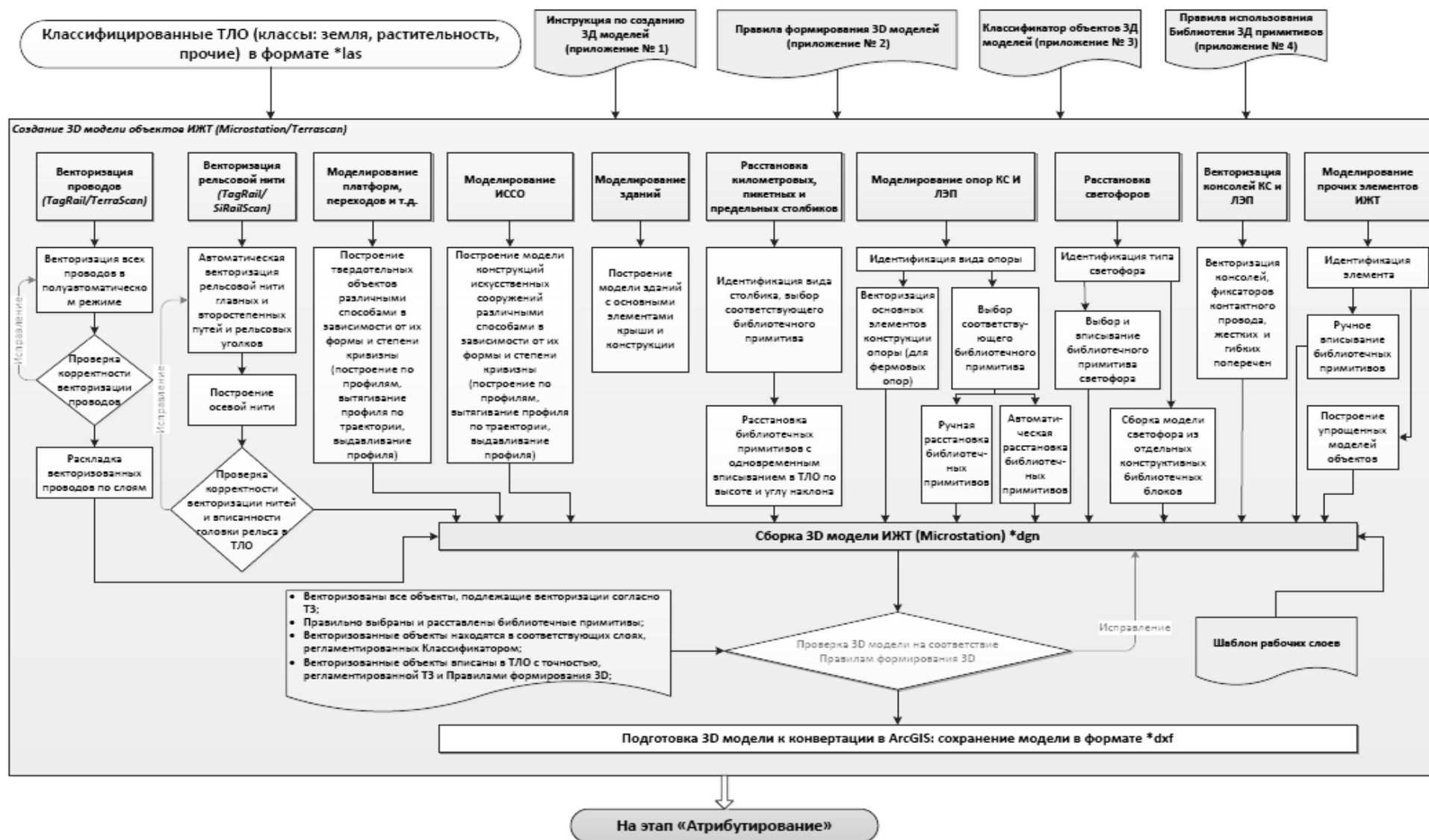


Рис. 7. Блок- схема формирования трехмерных пространственных моделей

За время выполнения данной работы были созданы трехмерные ЦМП, покрывающие 8887 км линий ОАО «РЖД».

Таблица 1. Результаты внедрения технологии и средств автоматизации

Параметр	Значение	Описание
Количество производимых цифровых моделей пути <b>до использования</b> разработанной технологии	24 км/мес	Указанное значение получено экспериментально в результате анализа производительности собственных подразделений компании, а также привлеченных сторонних организаций
Количество производимых цифровых моделей пути <b>при использовании</b> разработанной технологии	88 км/мес	В указанное значение входит трудоемкость 5-ти этапов камеральной обработки данных МЛС, необходимых для построения ЦМП.

**В заключение** диссертации приведены основные результаты работы.

- Методы и алгоритмы автоматического и полуавтоматического распознавания и моделирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, нивелирующие ошибки, возникающие в процессе сбора исходных данных;
- Состав объектов ЦМП в виде классификатора пространственных данных железных дорог ОАО «РЖД»;
- Технология создания высокоточной трехмерной цифровой модели пути, обеспечивающая единый формат описания положения пути и других объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта с заданной точностью;
- Структура базы геоданных объектов железнодорожной инфраструктуры и правил их семантического описания.
- Методические рекомендации к организационным и техническим условиям проведения измерений методом МЛС для получения субсантиметровой точности геопроанственнных данных на основе обобщения 6-летнего опыта проведения мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры методом мобильного лазерного сканирования.

#### Список статей, опубликованных в журналах из списка ВАК

1. Броневи́ч А.Г., Карки́щенко А.Н., Уманский В.И., Якушев Д.А. Применение локального метода обнаружения краев изображений для восстановления профиля земляного полотна // Проблемы управления, № 6, 2012. С. 56-62.

2. Дулин С.К., Дулина Н.Г., Якушев Д.А. Организация лазерной съемки в информационно телекоммуникационной системе мобильного лазерного сканирования // Системы высокой доступности, №1, т.11, 2015. С. 3-17.
3. Уманский В.И., Духин С.В., Якушев Д.А. Автоматизация формирования электронных карт для локомотивных устройств безопасности и систем управления движением по данным видеопаспортизации и мобильного лазерного сканирования (МЛС) // Вестник ВНИИЖТ, № 4, 2015. С. 8-11.
4. Дулин С.К., Дулина Н.Г., Якушев Д.А. Адаптивная идентификация пространственных объектов в информационно-измерительной системе мобильного лазерного сканирования // Информационно-измерительные и управляющие системы, № 8, т. 14, 2016. С. 26-35.
5. Bronevich, A.G., Lepskiy, A.E., Umansky, V.I., Yakushev, D.A. Recognition of cross profiles of roadbed based on polygonal representations //Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), Volume 8251 LNCS, 2013, Pages 270-27, Scopus to ORCID <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=23102270900>

#### **Список статей, опубликованных в других журналах**

1. Дулин С. К., Якушев Д. А. Автоматизированные дистанционные методы анализа состояния протяженных инфраструктурных объектов //Вестник МГТУ МИРЭА (Herald of MSTU MIREA), № 2, вып. 3, 2014. С. 156-175.
2. Якушев Д.А. Высокоточное трехмерное моделирование инфраструктуры железнодорожного транспорта с помощью ПО Bentley Systems // Геопрофи, №4, 2015. С. 4-8.
3. Дулина Н.Г., Якушев Д.А. Анализ ошибок измерений при использовании мобильного лазерного сканера – М.: ВЦ РАН, 2013. 27 с.

#### **Список докладов на конференциях**

1. Броневи́ч А.Г., Иванов Ю.А., Уманский В.И., Якушев Д.А. Детекция и идентификация опор контактной сети по данным лазерного сканирования // Труды Первой научно-техн. конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2012)» - М: ОАО НИИАС, 2012. С. 182-185.
2. Дулин С.К., Дулина Н.Г., Якушев Д.А. Методология адаптивного экспресс-анализа результатов мобильного лазерного сканирования. // Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ-2013 – М.: НИЯУ МИФИ, том 2, 2013. –С. 299.
3. Andrey G. Bronevich, Alexander E. Lepskiy, Vladimir I. Umansky , and Dmitry A. Yakushev. Recognition of Cross Profiles of Roadbed Based on

Polygonal Representations // Pattern Recognition and Machine Intelligence 5th International Conference, PReMI 2013 Kolkata, India, December 10-14, 2013 Proceedings (P. Maji et al. (Eds.): PReMI 2013, LNCS 8251. Pp. 270–276.

4. Уманский В.И., Якушев Д.А., Духин С.В. Автоматизация формирования электронных карт для локомотивных устройств безопасности и систем управления движением поездов путем комплексной обработки данных мобильного лазерного сканирования (МЛС). Труды второй научно-техн. конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2013)» - М: ОАО НИИАС, 2013. С. 133-135.

5. Уманский В.И. Дулин С.К., Якушев Д.А. Автоматизированные дистанционные методы распознавания протяженных инфраструктурных объектов системой мобильного лазерного сканирования // Труды пятой научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2016). – М.: ОАО НИИАС, 2016. С.176-179.