

На правах рукописи

Никитин Андрей Вячеславович



Теория и методы геодезического обеспечения  
дорожной транспортной инфраструктуры

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора  
технических наук

Новосибирск – 2018

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

Научный консультант – доктор технических наук, профессор  
Карпик Александр Петрович.

Официальные оппоненты:

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»;

Столбов Юрий Викторович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», профессор кафедры «Проектирование дорог»;

Ключин Евгений Борисович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», советник проректора по научной работе.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (г. Новосибирск).

Защита состоится 22 ноября 2018 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 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»: <http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/nikitin-andrey-vyacheslavovich/>

Автореферат разослан 31 августа 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аврунёв Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 20.08.2018. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 109.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Одной из приоритетных целей Транспортной стратегии Российской Федерации (РФ) на период до 2030 года является формирование единого транспортного пространства России.

В настоящее время на Дальнем Востоке активно развивается строительство новых и реконструкция существующих объектов дорожной транспортной инфраструктуры. Это федеральная автомобильная дорога «Чита – Хабаровск – Находка», уникальный вантовый и низководный мосты в г. Владивостоке. Усиливается мощност Транссибирской магистрали, входящей в международный транспортный коридор «Запад-Восток».

Важнейшим фактором для создания транспортного пространства будет качественное обеспечение геопространственными данными изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных, железных дорог и мостов.

При этом методы получения геопространственных данных (ГПД) и технология выполнения инженерно-геодезических работ для объектов дорожной транспортной инфраструктуры обуславливаются конструктивными особенностями автомобильных и железных дорог.

Для контроля геометрических параметров применяют различные геодезические средства измерений (электронные тахеометры, приемники глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), системы наземного и воздушного лазерного сканирования, референцные станции, беспилотные летательные аппараты).

В современных условиях отсутствует единая система геопространственного обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры с учетом достижений науки, техники и технологий.

Кроме того, необходимо разрабатывать методы геодезических работ, основанные на новых теоретических положениях и позволяющие получать более качественные геопространственные данные.

В РФ проводятся работы по внедрению в производство BIM (Building Information Modeling) технологии трехмерного проектирования инженерных объектов.

Однако современные средства измерений и методики производства геодезических работ не всегда корректно применяются для новых методов проектирования и строительства.

Поэтому существует проблема, вызванная необходимостью разработки базы данных методов геодезических работ для автомобильных, железных дорог и мостов, базирующейся на новой информационной основе и позволяющей принимать правильные решения для процессов управления, мониторинга и технического контроля на объектах дорожной инфраструктуры.

*Степень разработанности темы.* В производстве и науке накоплен большой объем геодезических знаний для автомобильных, железных дорог и мостов. Разработке способов получения геопространственных данных для автомобильных и железных дорог посвящены работы ученых и специалистов в области геодезии и транспорта. Значительный вклад в развитие теории и практики инженерно-геодезических работ при изысканиях и строительстве железных дорог и мостов внесли Бронштейн Г. С., Коугия В. А., Лютц А. Ф., Матвеев С. И., Райфельд В. Ф. Совершенствованию теории определения площадей земельных участков по геодезическим данным посвящены труды известных ученых: Батракова Ю. Г., Брынь М. Я., Маркузе Ю. И., Неумывакина Ю. К., Москвина В. Н. Разработки в области геодезического контроля и геомониторинга инженерных сооружений приведены в работах Уставича Г. А., Хорошилова В. С., Ямбаева Х. К. Геодезическое информационное обеспечение инженерных изысканий и проектирования автомобильных дорог рассмотрено в научных трудах ведущих отечественных ученых: Бойкова В. Н., Величко Г. В., Карпика А. П., Поспелова П. И., Столбова Ю. В., Скворцова А. В., Федотова Г. А. и др.

Современные ГИС-технологии для автомобильных и железных дорог, основанные на использовании передовых отечественных и зарубежных про-

граммных продуктах, разработаны ведущими организациями, такими как Credo\_Dialogue, IndorCAD, Robur.

Вместе с тем, в результатах исследований этих и других разработчиков и ученых в недостаточной степени решены вопросы точности линейных измерений при определении пространственной длины трассы, определения площадей водосбора при проектировании водопропускных сооружений, оптимального определения осей опор мостов с надежных геодезических пунктов.

На данный момент отсутствует единый подход к систематизации научных и практических знаний в области методов геодезических работ для автомобильных, железных дорог и мостов. Создание базы данных методов геодезических работ дает возможность принимать правильные инженерные и управленческие решения при выборе геодезических способов и средств измерений.

*Цель и задачи исследований.* Целью работы являются теоретические и прикладные исследования по развитию теории и методов геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры.

Для достижения цели исследования были *поставлены следующие основные задачи:*

- провести анализ современного состояния методов инженерно-геодезических работ для автомобильных, железных дорог и мостов;
- на основе систематизации знаний разработать базу данных (базу знаний) теории и методов геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры;
- разработать способ определения пространственной длины трассы при проектировании и строительстве автомобильных дорог;
- разработать способ уточнения физической площади земельных участков для определения площадей водосбора;
- разработать способы определения крена и контроля планового положения опор мостов с одного пункта наблюдений при их возведении;
- разработать рекомендации по применению оптимальных методов геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры на железнодоро-

рожных станциях, которые в дальнейшем можно использовать при создании высокоточной координатной системы (ВКС) с учетом специфики конкретной станции, природно-климатических условий и существующих опорных геодезических сетей.

*Объектом исследований* являются методы геодезических работ для объектов дорожной транспортной инфраструктуры.

*Предмет исследования* – методологические и теоретические разработки и решения для базы данных методов геодезических работ при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных, железных дорог и мостов.

*Научная новизна:*

– предложена база данных (база знаний) методов геодезических работ для объектов дорожной транспортной инфраструктуры, включающая в себя существующие методы, средства и нормативную базу в дорожной отрасли при выполнении инженерно-геодезических изысканий, проектировании и строительстве автомобильных, железных дорог и мостов. База данных доступна для широкого круга пользователей через сеть Интернет и позволяет интерактивно решать ряд локальных задач при развитии дорожной транспортной инфраструктуры;

– разработан способ определения фактической длины трассы при проектировании автомобильных дорог, отличающийся тем, что пространственную длину трассы определяют как сумму пространственных длин прямолинейных участков, горизонтальных и вертикальных кривых;

– разработанный способ определения площадей земельных и водосборных участков позволяет уточнять физическую поверхность территорий на основе учета продольных и поперечных углов наклона участков по взаимно-перпендикулярным направлениям;

– разработанные способы контроля планового положения и определения крена опор моста с одного пункта наблюдений позволяют во время строительства оперативно корректировать их пространственное положение.

*Теоретическая и практическая значимость работы.* Теоретическая значимость работы заключается в разработке теории новых способов и методик производства геодезических работ для автомобильных, железных дорог и мостов.

*Практическая значимость работы* заключается в том, что разработанные в диссертации новые способы и методики повышают качество получения геопространственных данных при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации объектов дорожной инфраструктуры, а также:

– способ определения пространственной длины трассы на стадии проектирования автомобильных дорог реализует более высокую точность, достигаемую в процессе изысканий, тем самым улучшая качество данных проектирования;

– способ определения физической площади позволяет более надежно определять площадь водосбора;

– при строительстве малых и средних мостов способы разбивки опор мостов и определения крена оперативно определяют пространственное положение конструкций.

Предложенные методы, сочетающие применение традиционных и современных технологий геодезических работ на железнодорожных станциях и узлах, реализованы на производстве. Они учитывают специфику конкретной станции, природно-климатические условия, наличие геодезических пунктов, количество объектов инфраструктуры и поэтому увеличивают производительность и эффективность работ.

*Методология и методы исследований.* Методологической базой исследования являются методы инженерно-геодезических работ и методы получения геопространственных данных. Теоретической базой исследования служат методы математической обработки результатов измерений и математического моделирования. Эмпирическая база исследования включает продольные профили автомобильных дорог, материалы инженерно-геодезических изысканий при строительстве и эксплуатации мостов, нормативно-технические документы,

регламентирующие геодезические работы, экспериментальные и производственные работы на железнодорожных станциях и узлах Дальневосточного региона.

*Положения, выносимые на защиту:*

– модель базы данных методов геодезических работ для объектов дорожной транспортной инфраструктуры, включающая в себя существующие методы, средства и нормативную базу в дорожной отрасли при выполнении инженерно-геодезических изысканий, проектировании и строительстве автомобильных, железных дорог и мостов, реализованная в электронном виде и доступная широкому кругу специалистов и ученых через сеть Интернет;

– теория способов определения пространственной длины трассы при проектировании и строительстве автомобильных дорог и уточнения физической площади земельных участков для точного определения площадей водосброса;

– теория способов разбивки и определения крена опор моста с одного пункта наблюдений позволяет значительно сократить время на выполнение полевых работ и повысить точность выноса опоры моста в натуру и определения ее крена;

– экспериментальные и производственные исследования предложенных автором разработок в области теории и методов геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры подтвердили их новизну и эффективность.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Диссертационная работа по содержанию и характеру полученных результатов соответствует области исследования: 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов паспорта научной специальности 25.00.32 –

Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

*Степень достоверности и апробация результатов исследований.* Основные концептуально-теоретические положения, рекомендации и результаты исследований диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и научных конгрессах: научно-практические конференции, проходившие в Дальневосточном государственном университете путей сообщений (ДВГУПС), Хабаровск, 2004–2016 гг.; Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы инженерной геодезии», Санкт-Петербург, 2009 г.; VIII Международная выставка и научный конгресс «ГЕО-Сибирь-2012», Новосибирск, 2012 г.; IX Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013» Новосибирск, 2013 г.

Результаты исследований по разработке методов инженерно-геодезических работ на железнодорожных станциях и узлах и способ контроля геометрических параметров прирассовых дорог были внедрены в производство при выполнении хоздоговорных работ, проводимых кафедрой «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог» ДВГУПС (2005–2012 гг.) на Забайкальской (ЗабЖД) и Дальневосточной железных дорогах (Двост.жд). Автор принимал непосредственное участие в выполнении геодезических работ для съемки более 15 железнодорожных станций и узлов, а также в геодезических изысканиях на участках железных дорог общей протяженностью около 400 км в Забайкальском, Приморском, Хабаровском крае и Амурской области, о чем свидетельствует акт о внедрении результатов исследования.

Материалы исследований внедрены в учебный процесс в Тихоокеанском государственном университете для студентов специальностей «Землеустройство и кадастры», «Автомобильные дороги» и в Дальневосточном государственном университете путей сообщения для специальности «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей». По результатам исследований были изданы две монографии и четыре учебных пособия.

*Публикации по теме диссертации.* Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 43 публикациях, из них 18 – в изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук: 10 статей – в российских рецензируемых научных изданиях, три статьи – в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, и пять патентов РФ на изобретения.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 230 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 204 наименований, содержит 20 таблиц, 69 рисунков, два приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы исследования, показана степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации и реализации результатов работы, ее структура, а также научные положения, выносимые на защиту.

*Первый раздел* посвящен аналитическому обзору современного состояния методов инженерно-геодезических работ для объектов дорожной транспортной инфраструктуры.

При исследовании материалов производственных работ, научных статей, нормативных документов по вопросам применения геодезии при проектировании, изысканиях, строительстве и эксплуатации объектов автомобильных, железных дорог и мостов были сформулированы следующие выводы и намечены пути решения возникающих геодезических задач.

В настоящее время отсутствует единая база данных методов инженерно-геодезических работ для автомобильных, железных дорог и мостов. Следова-

тельно, необходимо разработать базу данных (базу знаний) методов геодезических работ, базирующуюся на новой информационной основе.

Так как совершенствуются технологии инженерных изысканий, проектирования и строительства автомобильных, железных дорог и мостов, необходимо разработать соответствующие им новые методы геодезического контроля:

- способ определения пространственной длины трассы при проектировании автомобильных дорог;

- способ определения геометрических параметров автомобильных дорог с использованием приемников ГНСС, позволяющий оперативно получать данные для обеспечения строительства и эксплуатации;

- методики производства геодезических работ, учитывающие специфику железнодорожных станций, природно-климатические условия, количество объектов инфраструктуры с применением спутниковых и традиционных технологий;

- способы производства геодезических работ в мостостроении, позволяющие оперативно получать геопространственные данные с одного пункта наблюдений и принимать инженерные решения по корректированию их пространственного положения;

- способ уточнения физической площади участков для корректного определения площадей объектов автомобильных, железных дорог и водосбора.

В диссертационной работе рассматриваются только некоторые объекты дорожной транспортной инфраструктуры, а именно автомобильные, железные дороги и мосты. Выбор этих объектов обусловлен несколькими причинами. Автор диссертации в течение 25 лет участвовал в выполнении инженерно-геодезических работ на участках автомобильных и железных дорог Дальнего Востока и накопил большой объем производственного материала. Кроме того, дороги относятся к категории линейных сооружений, однако методы выполнения инженерно-геодезических работ на них отличаются в связи с конструктивными особенностями. При этом мосты служат связующим звеном между объек-

тами транспортной системы. В перспективе необходимо создание единого геопространства для линейных сооружений. Поэтому задача разработки базы данных методов геодезических работ для автомобильных и железных дорог является актуальной.

Во *втором разделе* разработана база данных (база знаний) методов геодезических работ для автомобильных, железных дорог и мостов.

На основе анализа многочисленных научных публикаций, нормативных документов, производственных материалов в диссертации была разработана база данных (база знаний) методов инженерно-геодезических работ для автомобильных, железных дорог и мостов (рисунок 1).

Основной целью при создании базы данных (базы знаний) будет геодезическое обеспечение принятия решений для выбора и оптимизации методов и технологий производства геодезических работ для автомобильных, железных дорог и мостов в условиях открытости и достоверности используемой информации. При принятии инженерных и управленческих решений используют различные методы.

При принятии решений возможно использовать, в том числе, эвристический метод, основанный на новых методах производства геодезических работ и получения ГПД (геометрических параметров). Выбор методики и технологии геодезических работ обусловлен различными научно-производственными задачами.

Адекватность модели базы данных получают путем проверки качества (точности) получаемых геометрических параметров объектов дорожной инфраструктуры в соответствии с нормативными требованиями. К таким объектам могут быть отнесены продольные профили автомобильных и железных дорог, электронные планы железнодорожных станций и координаты железнодорожного пути, исполнительные схемы мостов и др.

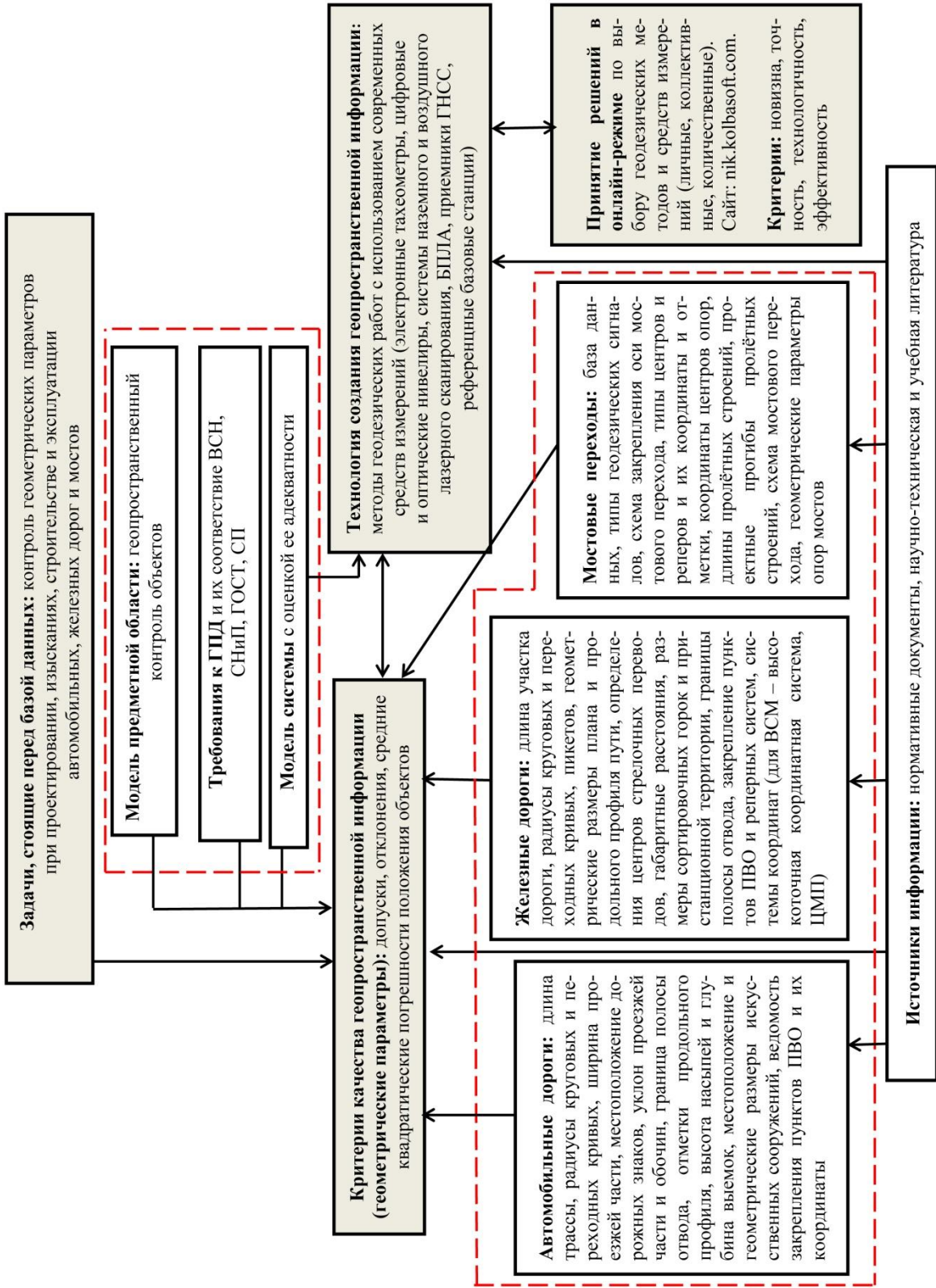


Рисунок 1 – База данных методов геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры

Разработанная база данных является поисковой, справочной, аналитической и базируется на *новой информационной основе*, так как:

– впервые создана единая база данных (база знаний) в области контроля геометрических параметров автомобильных, железных дорог и мостов. Достоверность приведенной информации гарантируется ссылками на источники информации и данными, опубликованными автором в научных статьях и патентах РФ на изобретения;

– приведен сравнительный анализ методов производства геодезических работ для различных объектов дорожной инфраструктуры;

– представлены разработанные автором новые научно обоснованные способы и средства для производства геодезических работ на стадиях изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений (рисунок 2);

– позволяет в онлайн-режиме (интерактивно) принимать инженерные и управленческие решения по выбору геодезических методов работ.

Открытость базы данных подтверждается размещением ее на сайте <http://nik.kolbasoft.com>, а также возможностью дальнейшего дополнения информации пользователями.

В настоящее время в РФ внедряют технологии информационного трехмерного моделирования зданий BIM в области промышленного и гражданского строительства. Поэтому при проектировании автомобильных дорог и для качественного получения ГПД необходимо учитывать пространственную длину трассы. Также следует определять пространственную длину при автоматизированном проектировании. В диссертационной работе разработан способ определения пространственной длины трассы на стадии проектирования автомобильных дорог, позволяющий повысить точность линейных геодезических измерений при выносе трассы на местность (стадия строительства).

В отличие от существующих, этот способ позволяет определить пространственную длину трассы, учитывая при этом пространственные длины прямолинейных участков, горизонтальных и вертикальных кривых.

Для получения достоверной информации при проектировании искусственных сооружений предложен способ определения площадей водосборных участков, позволяющий уточнять физическую поверхность территорий на основе учета продольных и поперечных углов наклона участков по взаимно-перпендикулярным направлениям.

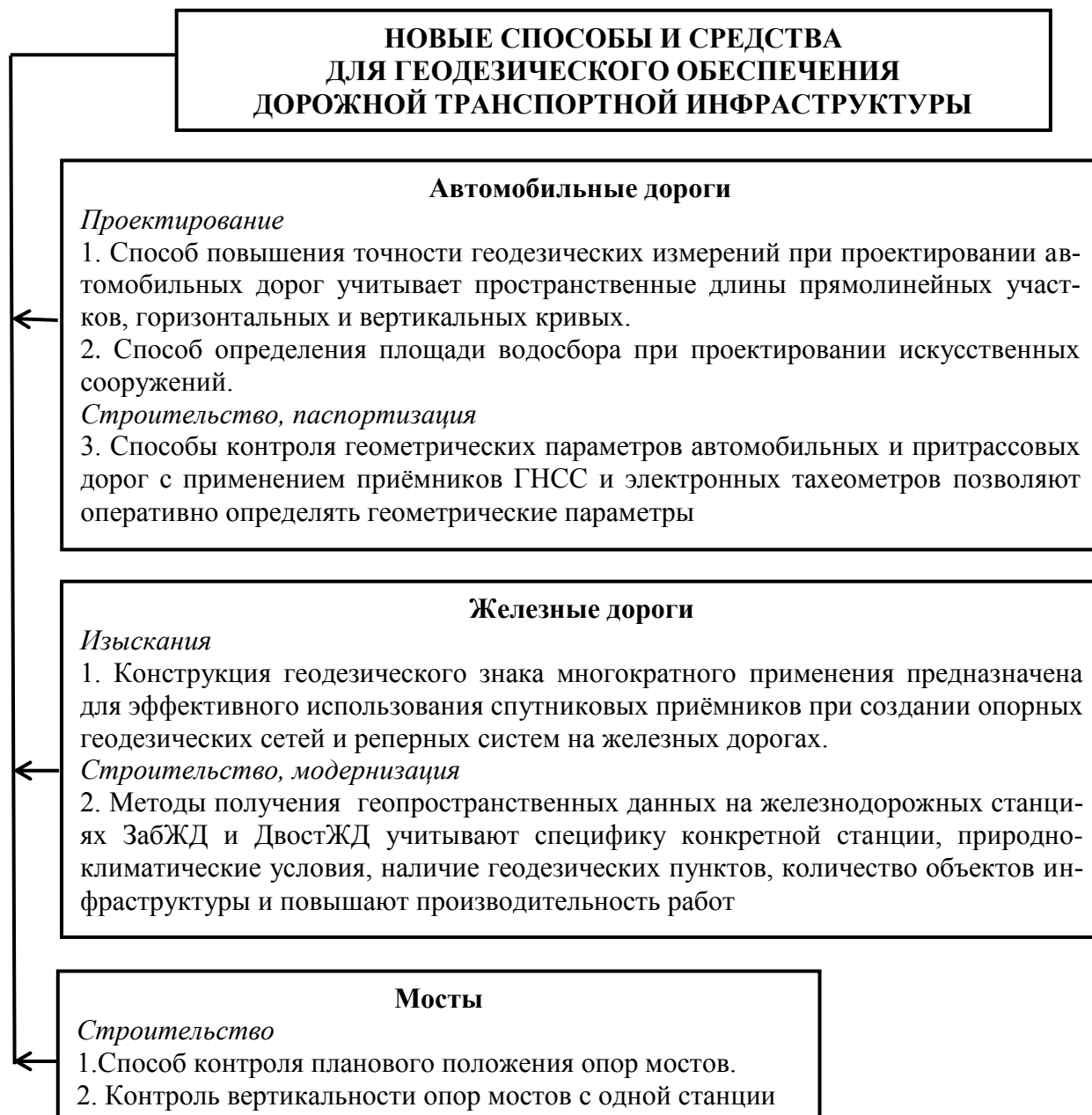


Рисунок 2 – Новые способы и средства для производства инженерно-геодезических работ

Рассмотрены новые способы, контролирующие плановое положение при возведении опор мостов и определяющие крен конструкций с одной станции, позволявшие значительно повысить производительность при выполнении геодезических разбивочных работ.

Основу базы данных составляют ГПД, полученные на участках железных дорог Дальнего Востока. В результате приведенных исследований и обработки результатов измерений рекомендовано проектировать расстояние между пунктами установки приемников ГНСС на участках железных дорог в ходах планово-высотного обоснования в интервале 2 500–3 500 м. Полученные результаты следует рекомендовать для ВКС при строительстве высокоскоростных магистралей (ВСМ) на железных дорогах.

В онлайн-режиме возможно определять физическую площадь земельных участков и площадь водосбора на основе разработанного автором способа.

На способы и средства инженерно-геодезических работ получены пять патентов РФ на изобретения, что подтверждает научную новизну результатов.

В диссертационной работе проанализированы производственные материалы для обоснования необходимости учета пространственной длины трассы для повышения точности геодезических измерений. Доказано, что для автомобильных дорог III–V категории при неучете пространственной длины, точность линейных измерений при выносе трассы (стадия строительства) на местность будет значительно меньше нормативных требований (на 40–60 %).

В реальных производственных условиях нельзя сделать однозначный вывод, каким образом такая неточность в измерениях повлияет на неправильное определение местоположения инженерных объектов. Возможны случаи, когда при больших продольных уклонах дорог в холмистой местности некорректное определение положения водопропускной трубы даже на 1–2 м может значительно изменить и величину стока воды, и режим работы трубы. А это приведет к аварийной ситуации. В связи с этим необходимо для повышения точности геодезических измерений учитывать пространственную длину трассы.

Вопросы, связанные с теорией и практикой автоматизированного проектирования автомобильных дорог, рассмотрены в работах Бойкова В. Н., Величко Г. В., Пуркина В. И., Скворцова А. В., Федотова Г. А. и др.

Проектирование плана и продольного профиля автомобильных дорог выполняют с помощью двух методов полигонального трассирования и сплайн-трассирования.

Для аналитического решения поставленной задачи автор разработал теорию способа повышения точности геодезических измерений на стадии проектирования.

Фактическая длина трассы будет равна

$$D_{\Pi} = \sqrt{d^2 + h^2} = \sqrt{d^2 + (id)^2} = d\sqrt{1+i^2}, \quad (1)$$

где  $D_{\Pi}$  – пространственная длина трассы;

$d$  – горизонтальное проложение;

$i$  – проектнй уклон.

Пространственную (фактическую) длину трассы находят так:

$$L_{\Phi} = \sum(D)_{\Pi} + \sum(\Gamma\text{К})_{\Pi} + \sum(\text{ВК})_{\Pi}, \quad (2)$$

где  $L_{\Phi}$  – фактическая (пространственная) длина трассы;

$\sum(D)_{\Pi}$ ,  $\sum(\Gamma\text{К})_{\Pi}$ ,  $\sum(\text{ВК})_{\Pi}$ , – суммы пространственных длин прямолинейных участков, горизонтальных и вертикальных кривых.

Формулу (2) используют, чтобы определить фактическую длину трассы.

В качестве кривых при проектировании используют круговые кривые, кло-тоиды, сплайны, кривые Безье и др.

В случае применения простых алгебраических кривых их длины вычисляются по известным методикам, а в случаях применения трансцендентных кривых – методами численного интегрирования.

В диссертации приведена математическая модель трассы и рассмотрены возможные случаи использования различных геометрических кривых. Пространственная длина трассы будет определяться по формулам:

$$L_{\Phi} = \sum d\sqrt{1+i^2} + \sum \left( \frac{\pi R \alpha}{180} \sqrt{1+i^2} \right)_{\Pi} + \sum (R_{\text{В}} \Delta i)_{\Pi}; \quad (3)$$

$$L_{\Phi} = \sum d\sqrt{1+i^2} + \sum \left( \left( 2\left(\frac{A^2}{R}\right) + \frac{\pi R(\alpha - 2\beta)}{180} \right) \sqrt{1+i^2} \right)_{\Pi} + \sum \left( \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2} \right)_{\Pi}; \quad (4)$$

$$L_{\Phi} = \sum d\sqrt{1+i^2} + \sum \left( a_i + b_i(x_i - x_{i-1}) + c_i(x_i - x_{i-1})^2 + d_i(x_i - x_{i-1})^3 \right)_{\Pi} \sqrt{1+i^2} + \sum \left( \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2} \right)_{\Pi}; \quad (5)$$

$$L_{\Phi} = \sum d\sqrt{1+i^2} + \sum \left( a_i + b_i(x_i - x_{i-1}) + c_i(x_i - x_{i-1})^2 + d_i(x_i - x_{i-1})^3 \right)_{\Pi} \sqrt{1+i^2} + \sum \left( \left( 2\left(\frac{A^2}{R}\right) + \frac{\pi R(\alpha - 2\beta)}{180} \right) \sqrt{1+i^2} \right)_{\Pi} + \sum \left( \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2} \right)_{\Pi}, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус горизонтальной кривой;

$R_{\text{В}}$  – радиус вертикальной кривой;

$\Delta i$  – алгебраическая разность уклонов сопрягающихся кривых;

$\alpha$  – угол поворота;

$\beta$  – угол между касательной в конце переходной кривой и тангенсом;

$L$  – длина переходной кривой (клотоиды), имеющая параметр  $A$ ;

$a, b, c, d$  – коэффициенты сплайна.

В диссертационной работе были выполнены математические расчеты и проведено моделирование для оценки точности определения пространственной длины трассы. В качестве математической модели была принята трасса автомобильной дороги протяженностью 10 км и имеющая максимальные пре-

дельные уклоны для автомобильных дорог соответствующих категорий. На участке дороги были расположены три вертикальные кривые.

В таблице 1 показаны данные точности линейных геодезических измерений по определению пространственной длины трассы.

В представленной геометрической модели использовались круговые кривые в качестве горизонтальных и вертикальных кривых. В случае применения парабол, клотоид, сплайнов, кривых Безье методология способа и принцип вычислений не будут принципиально изменяться. Кроме того, длина круговой кривой меньше, чем длины сложных кривых, значит пространственная длина трассы в сравнении с горизонтальным проложением соответственно будет иметь большее значение.

Таблица 1 – Точность определения пространственной длины трассы

Продольный уклон, ‰	Горизонтальная длина трассы, м	Пространственная длина трассы, м	Пространственная длина вертикальных кривых, м	Итоговая пространственная длина трассы, м	Относительная погрешность
50	10 000	10 012,49	1,65	10 014,14	1/707
60	10 000	10 017,98	2,55	10 020,53	1/487
70	10 000	10 024,47	2,97	10 027,44	1/364

Приведенные расчеты, моделирование и производственные материалы доказывают необходимость учета пространственной длины трассы при проектировании автомобильных дорог.

Так как данные продольного профиля служат основой для выноса трассы на местность, то неправильное определение длины трассы на стадии проектирования для автомобильных дорог III–V категорий будет значительно превышать погрешность линейных измерений и не соответствовать нормативным значениям (1/2000).

Среднюю квадратическую погрешность (СКП) определения длины трассы вычисляют так:

$$m_{D_n} = \sqrt{m_d^2 (1 + i^2) + m_i^2 \left( \frac{di}{\sqrt{1 + i^2}} \right)^2}, \quad (7)$$

где  $m_{D_n}$ ,  $m_d$ ,  $m_i$  – СКП определения пространственной длины трассы, горизонтального проложения линий, уклонов.

При уклонах более 50 ‰  $m_{D_n} = 3$  м (для расчетной модели, таблица 1). Следовательно, надо учитывать пространственную длину как систематическую погрешность для последующих разбивочных работ (в соответствии с рекомендациями Конусова В. Г. как коэффициент систематического влияния).

То есть на стадии проектирования автомобильных дорог необходимо внести соответствующие изменения в продольный профиль.

В конкретных производственных случаях возможно составление специальных разбивочных данных, взятых с продольного профиля для выноса трассы на местность (при больших уклонах).

В *третьем разделе* разработана теория нового способа повышения точности гидрологических характеристик при проектировании водопропускных сооружений.

При проектировании объектов автомобильных и железных дорог выполняют гидрологические расчеты для труб и мостов. На сегодняшний день в практике проектирования применяют несколько автоматизированных систем расчета (Credo, Robur, IndorCAD и др.). При вычислении гидрологических характеристик (расхода и объема стока) необходимо определять площадь водосбора. Поэтому необходимо исследовать, как влияет на достоверность расчетов неопределение физической поверхности.

В настоящее время в геодезии разработано достаточное количество способов определения физической поверхности земельных участков. При этом общим недостатком всех способов, в том числе и по цифровой модели местности (ЦММ) является то, что они не могут в полном объеме определять площади сложных и криволинейных объектов, таких как водосборы. Кроме того, суще-

ствующие формулы для определения физической площади применимы для участков, имеющих небольшие уклоны (спокойный рельеф), а для участков с уклонами более  $5^\circ$  они некорректны.

В связи с этим автором был разработан способ определения площади земельных и водосборных участков, который позволяет уточнять физическую поверхность путем аппроксимирования территории системой, включающей продольные и поперечные углы наклонов участка по взаимно-перпендикулярным направлениям. За счет этого достигается максимальная степень приближения к физической поверхности. При этом площадь вычисляют с учетом суммарной поправки за переход на поверхность эллипсоида и на поверхность нормальной отметки участка, а также за влияние рельефа.

Физическую площадь находят из выражения

$$P_{\Phi} = \frac{P_{\Gamma}}{\cos v_1 \cdot \cos v_2} \cdot \left( 1 - \frac{y^2}{R^2} + \frac{2H}{R} - \frac{2y^2 H}{R^3} \right), \quad (8)$$

где  $P_{\Phi}$  – физическая площадь земельного участка или секции;

$P_{\Gamma}$  – геодезическая площадь участка;

$v_1$  – средний продольный угол наклона участка;

$v_2$  – средний поперечный угол наклона участка;

$H$  – средняя нормальная отметка участка;

$R$  – радиус эллипсоида для данной широты, который при вычислении поправки принимают приближенным и равным 6 371,1 км;

$У$  – средняя ордината участка (расстояние от осевого меридиана).

Количество и величина линий будут определяться конкретными размерами участков и частотой изменения форм рельефа. Соответственно, меньшие по площади участки будут аппроксимированы с большей точностью. Поэтому большие по площади участки следует разделять на секции, имеющие достаточно однородный продольный и поперечный уклон.

Предложенный способ возможно использовать для земельных участков любой конфигурации, в том числе для объектов в виде треугольников и  $n$ -угольников. На основе предложенной математической модели в диссертации разработаны методики для определения физической поверхности по ЦММ.

В диссертации также исследовано влияние поправок за переход на поверхность эллипсоида и на поверхность нормальной отметки участка. Полученные результаты показывают необходимость учета физической земной поверхности для получения достоверных геопространственных данных с целью определения границ и площадей объектов автомобильных и железных дорог. Для упрощения алгоритма и увеличения скорости решения задач автором предложено определять площади пространственных треугольников в ЦММ по пространственным длинам сторон, и разработана программа, которую можно применять для различных электронно-цифровых карт.

Площадь водосбора после преобразования формулы (8) будет определяться так:

$$A_{\phi} = A_{\Gamma} \sqrt{1+i_1^2} \sqrt{1+i_2^2} - A_{\Gamma} \frac{y^2}{R^2} + A_{\Gamma} \frac{2H}{R}, \quad (9)$$

где  $A_{\phi}$  – физическая площадь водосборного участка;

$A_{\Gamma}$  – геодезическая площадь водосборного участка;

$i_1$  – средний продольный уклон участка водосбора;

$i_2$  – средний поперечный уклон участка водосбора.

В работе выполнены расчеты, оценивающие степень влияния определения величины стока (с учетом поправок за площадь водосбора) по различным общепринятым методикам, применяемым в РФ.

Использовались методики, рекомендуемые строительными нормами и правилами (СНиП), ведомственными строительными нормами (ВСН), метод «Союздорпроекта» и региональные нормы стока, предложенные для юга Дальнего Востока институтом «Дальгипротранс». Известно, что редукция стока умень-

шается с увеличением площади бассейна. Чтобы проследить влияние этого фактора, в расчетах рассматривались водосборы различной величины – 5, 10 и 30 км<sup>2</sup>. Для названных водосборов учитывались склоны разной крутизны: для водосбора 5 км<sup>2</sup> – 5, 10 и 30°, для 10 км<sup>2</sup> – 5 и 10°, для 30 км<sup>2</sup> – 5°. У более крупных водосборов принимались менее крутые склоны. На Дальнем Востоке преобладает гористый рельеф местности, поэтому трассы автомобильных и железных дорог здесь на значительном протяжении уложены долинным ходом. В таких условиях частым случаем являются небольшие односкатные бассейны со значительной крутизной склона. В данном исследовании этот расчетный случай представлен водосбором площадью 5 км<sup>2</sup> и крутизной склона 30°. Известно, что климат на юге Дальнего Востока меняется с востока на запад с муссонного на континентальный. Это сопровождается изменением модуля стока от повышенного в бассейне р. Уссури (12–17 л/с км<sup>2</sup>) до пониженного и умеренного в бассейне Шилки (0,1–10 л/с км<sup>2</sup>). Можно ожидать, что поправка, вносимая в измеренную по карте площадь бассейна с учетом крутизны склонов, по-разному отразится на величине стока в различных регионах Дальнего Востока. Поэтому расчеты стока выполнялись для двух районов: Владивостока на юге Приморья и Сковородино в Амурской области. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Относительное увеличение стока (в процентах), с учетом поправок к площади бассейна со склонами разной крутизны

A, км <sup>2</sup>	Угол	Владивосток				Сковородино			
		Союздор- проект	СНиП	ВСН	ДГТ	Союздор- проект	СНиП	ВСН	ДГТ
5	5°	6,8	3,8	10	1,8	6,8	1	10	4,2
	10°	12,5	7,5	20	3,6	12,5	15	20	12,5
	30°	28,1	30,3	32	37,5	28,1	29,6	33	41,7
10	5°	8,4	3,5	0,4	6,7	8,4	1,8	14	5
	10°	16,5	9,4	13,4	10,1	16,5	6,5	13,1	12,5
30	5°	5,6	3	10	5,6	5,6	2	10	5,6

Анализ результатов расчетов показывает, что:

- независимо от применяемой расчетной методики и условий, в которых расположен водосбор, увеличение его площади с учетом физической площади всегда сопровождается увеличением стока;
- для всех методик расчета установлено, что относительный прирост стока пропорционален крутизне склонов водосбора;
- результаты, полученные по разным методикам для одинаковых условий стока, существенно расходятся;
- климатические условия сказываются на абсолютных значениях величины стока, которые заметно увеличиваются ближе к Тихоокеанскому побережью, однако влияние изменения модуля стока в меридиональном направлении на относительное изменение величины стока, вызванное приростом площади водосбора, неочевидно;
- размеры бассейна не влияют на соотношение прироста площади бассейна и соответствующего относительного увеличения стока.

Таким образом, данное исследование показывает безусловное влияние определения физической площади водосбора на результаты вычислений величины стока. И если для сравнительно пологих склонов степень этого влияния сопоставима с разбросом результатов, получаемых по разным методикам расчета стока, то на крутых склонах ( $10^\circ$  и более) поправка к площади бассейна сказывается на величине стока значительно (от 12 до 32 %) и обязательно должна учитываться независимо от используемой методики расчета.

В диссертации был проведен сравнительный анализ способов определения физической поверхности водосбора при проектировании железных дорог в программе «Топоматик Robur – Железные дороги».

Полученные данные свидетельствуют о том, что способ, разработанный автором, дает увеличенное значение физической площади (20 %) по сравнению с другими. Это объясняется тем обстоятельством, что появляется возможность уточнять площади в местах, не покрытых сетью треугольников для криволи-

нейных поверхностей в электронно-цифровой модели карты. В данное время измерение площадей разработанным автором способом уступает в производительности представленным в цифровых моделях местности. Однако он позволяет получать более надежные результаты для сложного рельефа местности.

СКП определения физической площади земельного участка будет равна

$$m_{P\Phi} = \sqrt{m_{P\Gamma}^2 \left( \frac{1}{(\cos(v_1) \cdot \cos(v_2))} \right)^2 + m_{V_1}^2 \left( \frac{P_{\Gamma} \sin(v_1)}{\cos(v_2) \cos(v_1)^2} \right)^2 + m_{V_2}^2 \left( \frac{P_{\Gamma} \sin(v_2)}{\cos(v_1) \cos(v_2)^2} \right)^2}, \quad (10)$$

где  $m_{P\Phi}$  – СКП определения физической площади;

$m_{V_1}$  – СКП определения продольного уклона;

$m_{V_2}$  – СКП определения поперечного уклона;

$m_{P\Gamma}$  – СКП определения геодезической площади.

При условии что  $m_{V_1} = m_{V_2}$ , формула (10) примет вид

$$m_{P\Phi} = \sqrt{m_{P\Gamma}^2 \left( \frac{1}{(\cos^2(v))} \right)^2 + m_V^2 \left( \frac{2P_{\Gamma} \sin(v)}{\cos^3(v)} \right)^2}. \quad (11)$$

При определении площади водосбора погрешность будет вычисляться следующим образом:

$$m_{A\Phi} = \sqrt{m_{A\Gamma}^2 \left( K(1+i^2) \right)^2 + m_i^2 \left( 2A_{\Gamma} i K \right)^2}, \quad (12)$$

где  $m_{A\Phi}$ ,  $m_i$  – СКП определения физической площади водосбора и уклона;

$$K = \left( 1 - \frac{y^2}{R^2} + \frac{2H}{R} - \frac{2y^2 H}{R^3} \right).$$

В четвертом разделе рассмотрены вопросы геодезического контроля при строительстве мостов.

При возведении автодорожных и железнодорожных мостов используют фундаменты, состоящие из металлических и железобетонных свай-оболочек. Конструкции могут предполагать строительство опор в извлекаемом и в неизвлекаемом положении. Диаметр оболочек может находиться в пределах от 0,8 до 10 м.

Для контроля геометрических параметров при возведении опор мостов и получения оперативной информации для принятия инженерных решений по корректированию пространственного положения конструкции в работе предложены новые способы геодезического контроля и определения крена цилиндрических оболочек.

Контроль планового положения цилиндрических оболочек опор мостов состоит из следующих технологических операций.

Создают мостовую разбивочную сеть и определяют координаты специальных восьми контрольных точек, которые будут расположены на внешних и внутренних поверхностях оболочки. Данное количество точек является оптимальным, так как на оболочке расположено технологическое оборудование, кроме того, необходимо надежно контролировать пространственное положение оболочки в условиях неблагоприятного размещения пунктов наблюдения и определять вертикальность конструкций (рисунок 3).

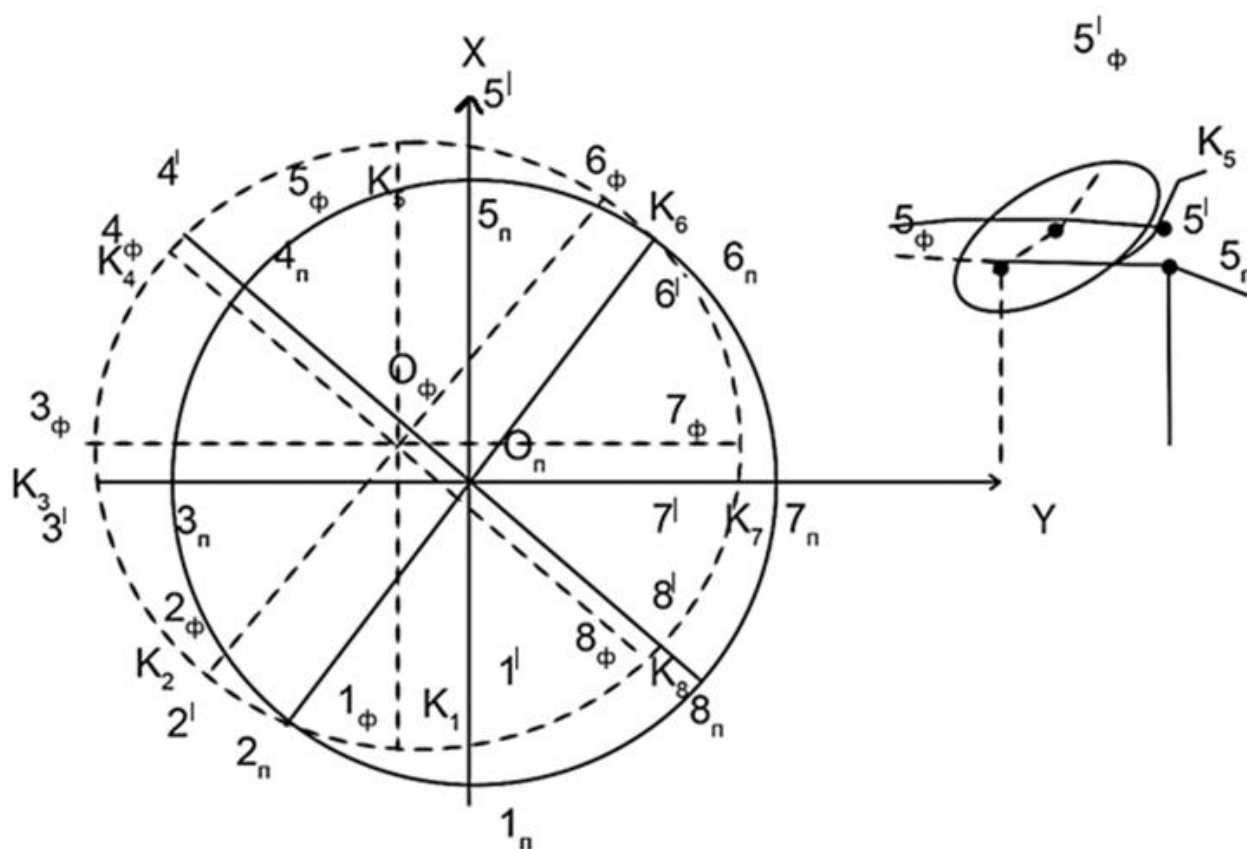
Последовательность работ при определении планового положения оболочки и корректировании положения конструкций будет следующей:

- следует определить местоположение и координаты оболочки, используя при этом приемники ГНСС или электронные тахеометры;

- при монтаже оболочки совмещают контрольные точки, расположенные на поверхности оболочки с точками на искусственном острове. Контролируют установку колец оболочки с геодезического пункта, расположенного на оси мостового перехода, а если отсутствует видимость, то с построенной опоры моста. Для определения координат контрольных точек необходимо разработать средства крепления отражателей на оболочке при ее изготовлении;

– следующим этапом будет определение координат точек и выполнение уравнивания, которое будет проводиться в реальном режиме времени. В этом случае возможно оперативное принятие решений для корректирования положения конструкции, определения центра оболочки и разворота осей.

Железобетонные или металлические сваи-оболочки конструктивно являются достаточно жесткими конструкциями. То есть они могут считаться условно недеформируемыми. Значит, при контроле за положением оболочки необходимо определять координаты главных осей колец оболочки и их разворот относительно проектного положения.



$1_n - 8_n$  – проектное положение точек;  $1_φ - 8_φ$  – фактическое положение точек;

$1_φ - 8_φ$  – положение точек, полученное после уравнивания;

$K_1 - K_8$  – смещение точек с новым положением относительно проектных направлений по дуге;  $1^l - 8^l$  – положение точек на проектных направлениях

Рисунок 3 – Контроль планового положения свай-оболочек

В геодезии способы для определения и оптимизации положения осей различных объектов и форм (круглой, сферической, прямоугольной) рассмотрены в большом количестве научных и производственных работ. Предложенный в диссертации способ значительно упрощает алгоритм оптимизации и позволяет корректно решить проблему для производства.

Контроль определения координат осей оболочки, оценка точности при разработке и принятии решений по корректированию планового положения конструкций состоят в следующем.

На определенных этапах строительства опор мостов определяют фактические контрольных координаты точек  $(1_{\phi}^I - 8_{\phi}^I)$ , показанных на рисунке 3. После чего одновременно для всех контрольных точек в визуальном режиме изображения на экране компьютера осуществляется построение эллипса средних квадратических погрешностей, элементы которого рассчитывают по стандартным формулам.

В онлайн-режиме перемещают (вписывают) проектную окружность при условии минимального отклонения всех точек и их нахождения в пределах эллипса ошибок, после чего получают новые уравненные координаты точек  $(1_{\phi} - 8_{\phi})$ .

Такой алгоритм действий позволяет определить величин  $(K_1 - K_8)$  – смещения точек и определить разворот осей и смещение центра оболочки относительно проектного положения.

Чтобы оценить точность, полученную при определении смещения и разворота осей, необходимо учитывать погрешность величины смещения  $L$  и разворота  $\alpha_L$ , зависящих от погрешностей  $m_x$  и  $m_y$  определения координат контрольных точек

$$m_L = \sqrt{\frac{4L_x^2 m_x^2 + 4L_y^2 m_y^2}{L_x^2 + L_y^2}}; \quad m_{\alpha_L} = \sqrt{\frac{L_y^2 m_x^2 + L_x^2 m_y^2}{(L_x^2 + L_y^2)^2}}, \quad (13)$$

где  $m_L$ ,  $m_{\alpha_L}$  – СКП определения смещения центра оболочки и определения разворота осей.

На основе предложенной системы контроля в работе проведены исследования с использованием методов математического моделирования для различных данных (расстояний между опорами, диаметра оболочки, параметров эллипса СКП). Полученные результаты ( $m_L = 5$  мм,  $m_{\alpha_L} = 8$  мм) говорят о том факте, что разработанная система контроля планового положения оболочки соответствует требованиям нормативных документов, предъявляемым при выполнении геодезических работ в мостостроении.

В диссертации выполнен расчет размерных цепей для строительства опор мостов с применением свай-оболочек большого диаметра и согласования точностей геодезических работ. На основании данных сделан вывод о том, что принятые геодезические способы разбивки опорных колец, способы контроля положения контрольных точек, способы контроля взаимного положения и вертикальности конструкций научно обоснованы и достаточны с позиции точности.

При строительстве мостов на фундаментах из свай-оболочек одним из этапов геодезических работ будет контроль по определению крена конструкций в процессе монтажа оболочки. Для определения кренов конструкций и сооружений применяют различные способы и технологии. Для конкретных производственных задач необходимо выбрать оптимальный способ, который должен учитывать технические параметры сооружения, условия местности и предъявляемые требования к точности геодезических работ.

Для этих целей в диссертационной работе был предложен способ, позволяющий определять крен с одной станции наблюдений и основанный на вычислении разности вертикальных углов. Схема способа показана на рисунке 4. Цилиндрическая оболочка имеет высоту  $H$  и радиус  $R$ .

Так как по конструктивным особенностям свай-оболочки относятся к условно недеформированным сооружениям и минимально подвержены деформациям, то в случае наклона оболочки (крена) ее вертикальная и горизонтальная оси также будут наклонены на угол  $\gamma_x$  (угловая составляющая крена), показан-

ный на рисунке 4. Линейную величину составляющей крена  $S_x$  получают путем проецирования вертикальной оси  $OO_x$  в наклонном положении на горизонтальную плоскость и находят по формуле

$$S_x = \frac{K_x \cdot H}{R} = H \cdot \frac{\gamma_x}{\rho}, \quad (14)$$

где  $S_x$  – линейная величина крена;

$H$  – высота оболочки;

$\gamma_x$  – угловое выражение составляющей крена.

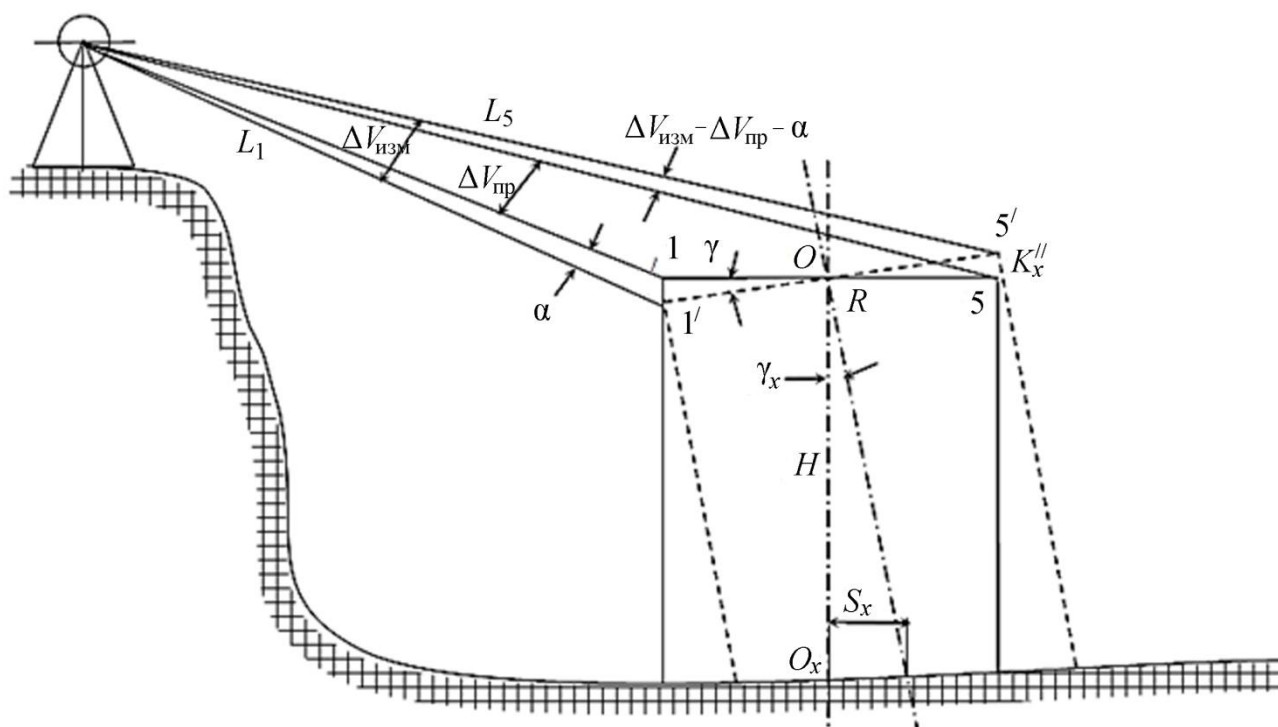


Рисунок 4 – Определение крена цилиндрической оболочки с одной станции

Высотная величина крена  $K$  получается проецированием точки центра конструкции  $O$  в измененном состоянии на вертикальную плоскость, которая проходит через соответствующие точки.

Величину  $K$  определяют из выражений:

$$\begin{aligned} K_x' &= L_1 \cdot \frac{\alpha}{\rho}; & K_x'' &= L_5 \frac{(\Delta v_{\text{изм}} - \Delta v_{\text{пр}}) - \alpha}{\rho}; \\ K_x &= K_x' + K_x'' = \frac{(L_1 + L_5)}{2} \cdot \frac{(\Delta v_{\text{изм}} - \Delta v_{\text{пр}})}{\rho}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $K_x$  и  $K_y$  – высотные составляющие крена;

$\Delta v_{\text{изм}}$  – измеренная разность вертикальных углов;

$\Delta v_{\text{пр}}$  – проектная разность вертикальных углов (по оси  $y$   $L_3 = L_7$ , а  $\Delta v_{\text{пр}} = 0$ );

$L_1 - L_7$  – расстояния до контрольных точек.

Из рисунка 4 следует, что величина  $K_x'$  перпендикулярна визирной оси тахеометра и наклонена к составляющей крена на угол  $v$  наклона визирной оси к горизонту, поэтому с учетом преобразований окончательно получим

$$K_x = \frac{(L_1 + L_5)}{2} \frac{(\Delta v_{\text{изм}} - \Delta v_{\text{пр}})}{\cos v \cdot \rho}; \quad K_y = L_{3,7} \frac{\Delta v_{\text{изм}}}{\cos v \cdot \rho}. \quad (16)$$

Общую величину крена  $K$  определим по формуле

$$K = \sqrt{K_x^2 + K_y^2}. \quad (17)$$

То есть значение крена в угловом, линейном и высотном выражении можно получить путем измерения разности вертикальных углов и ее сравнения с проектным значением, полученным по данным горизонтальных проложений и превышений.

В практике определения крена высоту прибора можно не учитывать, так как при вычислении разности вертикальных углов превышения увеличиваются на одну величину высоты тахеометра и не имеют значения при определении разности углов.

Для доказательства эффективности разработанного экспресс-способа в диссертации выполнен сравнительный анализ с известными способами определения крена (способ Раинкина, способ Зеленского). Результаты исследований показывают, что способ для определения крена опор мостов в большинстве случаев имеет большую производительность с известными способами, а в определенных производственных условиях является единственно возможным.

Средняя квадратическая погрешность  $m_{k,x,y}$  определения составляющих крена определяют из уравнения

$$m_{k,x,y} = \sqrt{m_L^2 \left( \frac{\Delta v}{\rho \cos v} \right)^2 + m_{\Delta v}^2 \left( \frac{L}{\rho \cos v} \right)^2 + m_k^2 \left( \frac{L}{2R} \right)^2}, \quad (18)$$

где  $m_L$ ,  $m_{\Delta v}$ ,  $m_k$  – СКП определения длин линий, разности вертикальных углов и коэффициента рефракции.

В предложенном способе измерения выполняют на равной высоте относительно водной поверхности, и они проходят в одном временном интервале, поэтому для определения крена конструкций и превышений поправку за кривизну Земли и рефракцию можно не учитывать. Из анализа формулы следует, что для вертикальных углов до  $\pm 10^\circ$  величина неравенства в расстояниях до контрольных точек может составлять более 1 м.

К задачам технического контроля при возведении опор мостов относятся не только определение геометрических параметров, но и оперативное устранение крена.

При этом угловая и линейная составляющая крена не содержат информации, позволяющей устранить крен. В отличие от существующих способов, только высотное выражение крена может рассчитать необходимую величину, на которую необходимо сместить оболочку с помощью вибропогружателей, установленных на поверхности оболочки.

Также в диссертации разработаны способы контроля вертикальности для различных объектов автомобильных и железных дорог с взаимно-перпендикулярных пунктов.

В практику проектирования и строительства искусственных сооружений внедряются технологии информационного трехмерного моделирования зданий и сооружений BIM. Перспективным является проектирование мостов и искусственных сооружений в проекте IFC-Bridge, позволяющем осуществить процесс трехмерного проектирования мостов.

На основе способа определения крена по измеренной разности вертикальных углов была создана трехмерная модель объекта, представленная на рисунке 5. Применение пространственной модели позволит оперативно и в реальном режиме времени принимать инженерные решения по корректированию положения конструкций и сооружений.

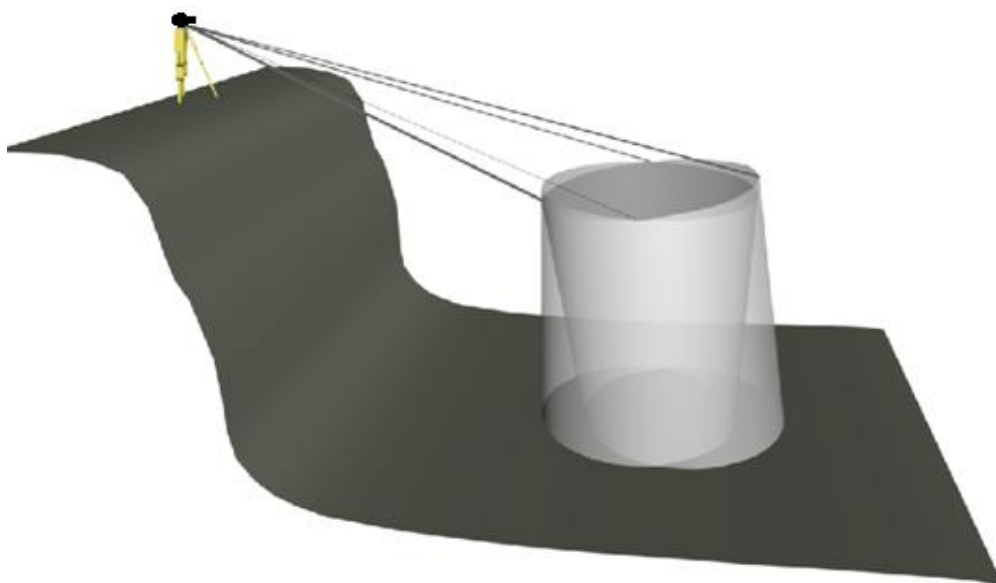


Рисунок 5 – Трехмерная модель способа определения крена

В *пятом разделе* рассмотрено развитие методов инженерно-геодезических работ для автомобильных и железных дорог Дальнего Востока.

К перспективным задачам геодезии в области инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта относится создание высокоточной координатной системы (ВКС). Основопологающим звеном в создании единого геопространства железных дорог будет геодезическая съемка железнодорожных станций и узлов.

Целью съемки (см. рисунок 1) существующих железнодорожных станций и узлов является получение планов, продольных и поперечных профилей, координат элементов станционной ситуации, ведомостей стрелочных переводов, путей, зданий, сооружений и других технических документов и данных, необходимых для эксплуатации, а также для разработки комплексного проекта переустройства станций и узлов и выноса проекта в натуру.

Автор диссертации принимал участие в выполнении инженерно-геодезических работ на железнодорожных станциях Забайкальской и Дальневосточной железных дорог с 2005 по 2012 г. Основные методы и принципы инженерно-геодезических изысканий на железнодорожных станциях были эффективно использованы при выполнении производственных работ.

За данный период изыскательской партией ДВГУПС была выполнена съемка более 15 станций и узлов. При этом изыскания проводились как классическими методами, так и с применением современных средств измерений (электронные тахеометры, приемники ГНСС).

Например, для определения уклона железнодорожного пути длиной 21 км (в районе нового Кузнецовского тоннеля, 2012 г.) наиболее эффективным и производительным оказалось применение технического нивелирования. Это определялось несколькими факторами: путеизмерительный вагон ЦНИИ-4 не всегда дает надежные данные по высоте, отвечающие нормативным требованиям; применение приемников ГНСС не представлялось возможным из-за условий местности; жесткие временные ограничения. Поэтому оптимальным методом для данных условий оказалось классическая технология геометрического нивелирования. При этом для контроля измерений использовали два нивелира.

В данном разделе приведены результаты геодезических работ при создании планово-высотного обоснования для модернизации Шилкинской дистанции пути Забайкальской железной дороги (40 км). Для контроля планового положения геодезической сети применяли приемники ГНСС. После обработки результатов спутниковых измерений в программе TGO (2008 г.) были получены координаты точек и определены параметры планового высотного обоснования (ПВО), приведенные в таблице 3.

Таблица 3 – Геодезические параметры планово-высотного обоснования

ГНСС-пункты (от)	ГНСС-пункты (до)	Расстояния, м	Точки ПВО	Переходы с коротких на длинные расстояния	Относительная погрешность, $f_{отн}$
1–2	11–12	3 826	10	4	1/1 562
11–12	24–25	5 216	13	1	1/5 372
24–25	33–34	3 767	9	2	1/4 808
33–34	42–43	4 210	8	1	1/5 806
42–43	53–54	5 204	11	4	1/1 646
53–54	58–59	2 357	5	2	1/4 124
58–59	65–66	3 286	7	2	1/3 877
70–71	78–79	3 829	8	1	1/5 951

Анализируя полученные данные и результаты, можно сделать следующие выводы о методах создания опорных геодезических сетей для проектирования модернизации участков железных дорог:

– применение приемников ГНСС при создании и контроле геодезического съемочного обоснования позволяет оперативно получать надежные геопространственные данные;

– при создании планово-высотного обоснования (ПВО) с использованием электронных тахеометров и приемников ГНСС увеличение расстояний между пунктами относительно нормативных требований в два раза не влияет на качество построений;

– погрешность измерений увеличивается, если в геодезическом обосновании присутствует значительное количество переходов с коротких на длинные расстояния;

– расстояния между ГНСС-пунктами в ходах рекомендуется проектировать в интервале 2 500–3 500 м.

В диссертации рассмотрена технология геодезических работ на примере станции Ландыши Дальневосточной железной дороги (2011 г.). В пределах района работ создали ПВО, включающее 19 точек сети, что позволило проводить дополнительный геодезический контроль за счет избыточных измерений.

Работы выполнялись на функционирующей железнодорожной станции в условиях интенсивного движения подвижного состава.

На основной площадке для определения отметок поперечников надежнее применять геометрическое нивелирование. Это объясняется тем, что для определения отметок на поперечниках необходимо установить рейку на головку рельса в момент остановки подвижного состава и отсутствия видимости. Технологически практически невозможно применять для этих целей метод тригонометрического нивелирования.

Использование кинематического метода измерений на железнодорожных станциях не всегда эффективно в связи с наличием большого количества инфраструктурных объектов, в том числе опор контактной сети. Определенные сложности в измерениях возникают и на залесенных территориях Дальнего Востока.

Для получения электронного плана использовали программный комплекс составления масштабных планов станций, разработанный в ДВГУПС для открытого акционерного общества Российские железные дороги ОАО «РЖД» под руководством профессора, д-ра техн. наук Шварцфельда В. С.

Основываясь на производственных результатах, можно сделать следующие выводы:

– применение двухчастотных спутниковых приемников Trimble 5700 повышает качество работ, в том числе за счет контроля пространственного положения точек геодезического обоснования;

– оптимальное сочетание оптико-механических и современных электронных средств измерений позволяет решать задачи для различных производственных условий;

– увеличение количества точек ПВО улучшает надежность опорной геодезической сети (ОГС), так как производятся дополнительные избыточные измерения;

– использование кинематического метода измерений на железнодорожных станциях не всегда эффективно;

– геометрическое нивелирование возможно использовать при нивелировании на основной площадке и нивелировании поперечников, в том числе на неэлектрифицированных участках железных дорог.

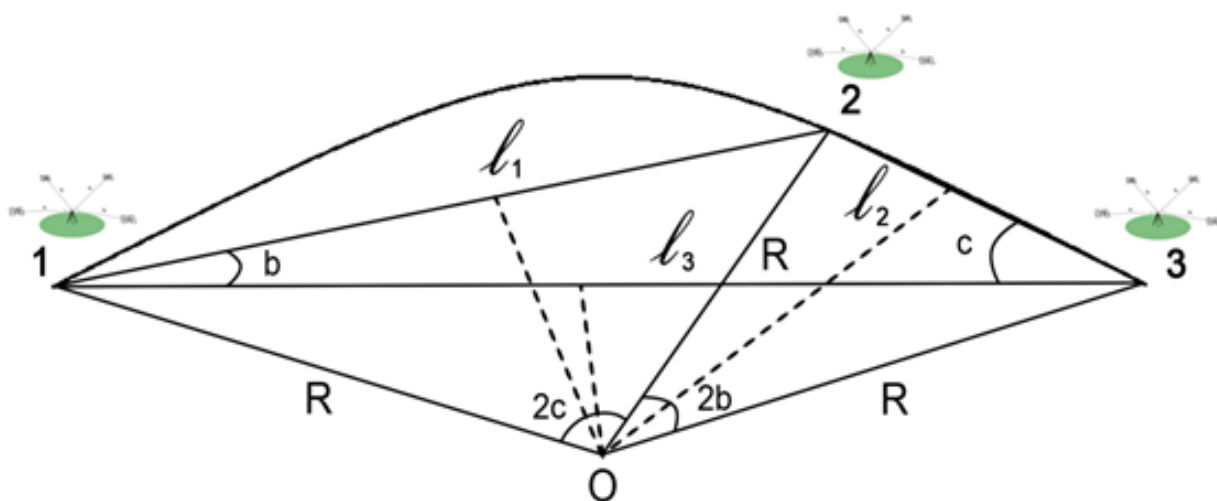
В диссертации выполнен расчет, показывающий повышение производительности труда при выполнении инженерно-геодезических изысканий на 15 % за счет использования оптимальных методов производства геодезических работ.

В процессе выполнения геодезических работ при строительстве, реконструкции и паспортизации автомобильных дорог определяют геометрические параметры, в том числе элементы круговых и переходных кривых (радиус, длину кривой, тангенс). В данное время решают эту задачу разными методами, в том числе и с применением специальных механизированных устройств (Росдортех, СГУПС). Так как при выполнении работ для реконструкции дорог требуется проводить геодезические измерения за пределами дороги, необходимо разработать способ контроля геометрических параметров, который позволяет оперативно определять параметры дороги и выполнять другие задачи.

В диссертационной работе разработан новый способ контроля геометрических параметров автомобильных дорог с использованием приемников ГНСС (рисунок 6).

Преимущество данного способа заключается в том, что геометрические параметры определяются непосредственно на поверхности дороги. В то же время его применение эффективно как в процессе строительства, так и при эксплуатации.

Данная методика применима и может быть реализована при использовании режима RTK (Real Time Kinematic). В этом случае прямоугольные координаты определяются на местности в реальном режиме времени и появляется возможность оперативного вычисления геометрических параметров.



1, 2, 3 – пункты установки приемников ГНСС для определения координат;

$l_1, l_2, l_3$  – хорды, соединяющие месторасположения пунктов;

$R$  – радиус круговой кривой

Рисунок 6 – Определение радиусов кривых по трем точкам

Последовательность действий при определении геометрических параметров автомобильных дорог показана на рисунке 7.

Координаты определяют в системе WGS-84, после чего преобразуют (трансформируют) их в прямоугольные координаты в программах (LGO, TBC, Topcon Tools). Для контроля измерений необходимо решить обратную геодези-

ческую задачу в определенном программном модуле и получить соответствующие углы и длины линий.

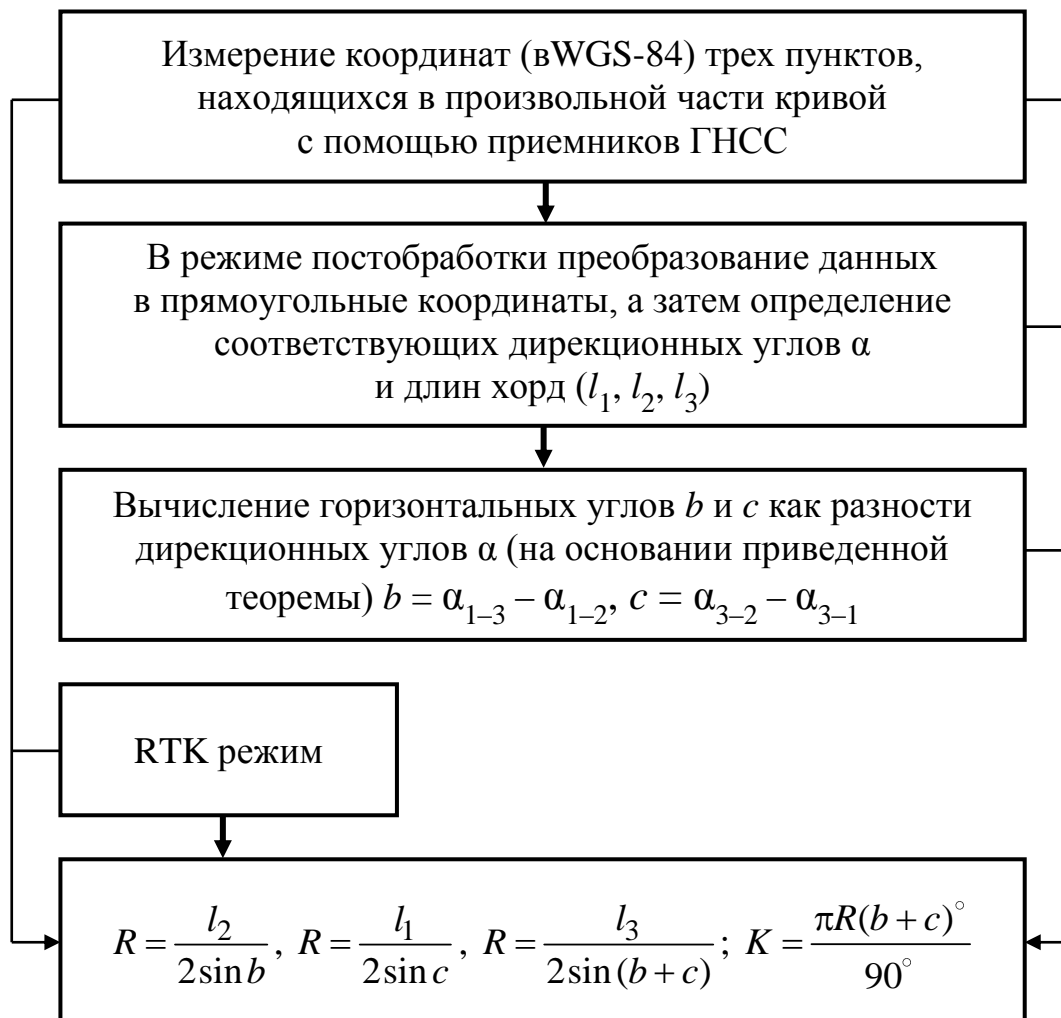


Рисунок 7 – Алгоритм производственных действий

На основании формул, приведенных на рисунке 7, средняя квадратическая погрешность определения радиусов будет равна

$$m_R = \sqrt{m_l^2 \left( \frac{1}{2 \sin(b)} \right)^2 + m_b^2 \left( \frac{\cos(b)l}{2 \rho \sin^2(b)} \right)^2}, \quad (19)$$

где  $m_R$  – СКП определения радиуса;

$m_l$  – СКП определения длины хорды (точность позиционирования приемниками ГНСС геодезического класса – плановая от 0,5 до 3 см);

$m_b$  – СКП определения горизонтальных углов (5–10").

СКП длины кривой определится из выражения

$$m_K = \sqrt{m_R^2 (0,035 \beta)^2 + m_\beta^2 \left( \frac{0,035 R}{\rho \beta} \right)^2}, \quad (20)$$

где  $m_K$  – СКП определения длины кривой;

$m_\beta$  – СКП определения (измерения горизонтальных углов);

$\beta$  – величина горизонтальных углов.

В соответствии с нормативными документами точность определения радиусов горизонтальных и вертикальных кривых на автомобильных дорогах должна составлять  $\pm 10\%$   $R$ . При расчете точности определения радиусов (от 100 до 3 000 м) для различных категорий дорог выявлено, что СКП находятся в пределах от 0,1 до 1 м, что значительно точнее рекомендуемых требований.

В диссертации разработана конструкция геодезического знака многократного применения, предназначенная для эффективного использования спутниковых приемников при создании опорных геодезических сетей и реперных систем на железных дорогах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследований достигнута поставленная цель – проведены теоретические и прикладные исследования по развитию теории и методов геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры.

Сформулированные задачи для реализации поставленной цели решены.

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ современных методов геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры, который показал, что существует противоречие между совершенствующимися технологиями инженерных изысканий, проектирования и строительства автомобильных, железных дорог и мостов и уровнем соответствующего им геодезического обеспечения и нормативной базой, на основании анализа сформулированы задачи диссертационного исследования;

– предложена база данных (база знаний) методов геодезических работ для объектов дорожной транспортной инфраструктуры, позволяющая принимать эффективные инженерные и управленческие решения по выбору методов получения геопространственных данных при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных, железных дорог и мостов в зависимости от решаемых научно-производственных задач. В перспективе база данных может быть использована для создания системы искусственного интеллекта геодезического обеспечения транспортного развития страны, что вписывается в концепцию развития цифровой экономики России;

– разработан способ определения фактической длины трассы при проектировании автомобильных дорог, отличающийся тем, что пространственную длину трассы определяют как сумму пространственных длин прямолинейных участков, горизонтальных и вертикальных кривых. Применение данного способа для автомобильных дорог III–V категорий повышает точность линейных геодезических измерений при выносе трассы на местность (стадия строительства) на 40 %;

– разработан способ определения площадей земельных и водосборных участков, позволяющий уточнять физическую поверхность территорий на основе учета продольных и поперечных углов наклона участков по взаимно-перпендикулярным направлениям. В сравнении с существующими способами при проектировании водопропускных сооружений на автомобильных и же-

лезных дорогах повышает точность определения физической площади водосбора на 20 %;

– разработаны способы оперативного контроля планового положения опор мостов и их крена с одного пункта наблюдений, которые позволяют сократить время на выполнение полевых работ и повысить точность геодезических разбивочных работ;

– разработаны методики производства геодезических работ на железнодорожных станциях Забайкальской и Дальневосточной железных дорог (15 станций), учитывающие специфику конкретной станции, природно-климатические условия, существующие геодезические пункты. Выполнен расчет, показывающий повышение производительности труда при выполнении инженерно-геодезических изысканий на 15 % за счет использования оптимальных методов производства геодезических работ.

Разработанные в диссертации новые способы производства геодезических работ подтверждены пятью патентами РФ на изобретения и в совокупности составляют научную новизну базы данных методов геодезических работ.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые теоретические, технические и технологические решения по развитию теории и методов геодезического обеспечения дорожной транспортной инфраструктуры, внедрение которых внесет значительный вклад в развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности.

Перспективы научных исследований заключаются в том, что полученные результаты диссертации должны быть внедрены в производство и учтены при создании новых нормативных документов в области инженерно-геодезических изысканий для автомобильных и железных дорог.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ  
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Никитин, А. В. Способ определения крена сооружений цилиндрической формы [Текст] / А. В. Никитин // Геодезия и картография. – 2002. – № 7. – С. 15–17.

2 Никитин, А. В. Определение фактической площади земельных участков [Текст] / А. В. Никитин // Геодезия и картография. – № 1. – 2005. – С. 37–39.

3 Никитин, А. В. Повышение точности измерения трассы [Текст] / А. В. Никитин // Мир транспорта. – 2006. – № 1. – С. 22–24.

4 Никитин, А. В. Оперативное определение радиусов кривых на автомобильных дорогах [Текст] / А. В. Никитин // Геодезия и картография. – № 11. – 2010. – С. 8–9.

5 Никитин, А. В. Определение фактической площади земельных участков по пространственной геометрической модели местности [Текст] / А. В. Никитин // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2010. – № 12. – С. 103–107.

6 Шварцфельд, В. С. Проблемы совершенствования методов инженерно-геодезических изысканий для развития инфраструктуры мультимодальных транспортных коридоров [Текст] / В. С. Шварцфельд, А. В. Никитин, А. Р. Едигарян // Транспорт Урала. – 2010. – № 4 (27). – 2010. – С. 32–35.

7 Никитин, А. В. Инженерно-геодезическая съемка на станциях [Текст] / А. В. Никитин // Мир транспорта. – 2011. – № 3. – С. 46–49.

8 Карпик, А. П. Информационная система построения инфраструктуры геопространственных данных для автомобильных и железных дорог [Текст] / А. П. Карпик, А. В. Никитин // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 4 (36). – С. 7–15.

9 Никитин, А. В. Оптимальные методы повышения эффективности геодезических работ на железных дорогах, станциях и узлах [Текст] / А. В. Никитин // Геодезия и картография. – 2016. – № 12. – С. 3–6.

10 Никитин, А. В. Геодезический контроль строительства опор мостов [Текст] / А. В. Никитин // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 70–80.

11 Никитин, А. В. Способ определения крена объектов инфраструктуры железных дорог [Текст] / А. В. Никитин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 9 (51). – Ч. 2. – С. 149–153.

12 Никитин, А. В. Система контроля пространственной информации в мостостроении [Текст] / А. В. Никитин, В. С. Хорошилов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 11 (53). – Ч. 5. – С. 95–98.

13 Никитин, А. В. Координатный способ определения радиусов кривых на автомобильных дорогах [Текст] / А. В. Никитин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 02 (56). – Ч. 2. – С. 49–52.

14 Пат. 2077027 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 C 15/00. Способ разбивки опоры моста [Текст] / Никитин А. В. ; заявитель и патентообладатель Хабаровский гос. техн. ун-т ; заявл. 09.03.93 ; опубл. 10.04.97, Бюл. № 10. – 6 с. : ил.

15 Пат. 2141622 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 C 1/00, 15/00. Способ определения крена [Текст] / Никитин А. В. ; заявитель и патентообладатель Хабаровский гос. техн. ун-т ; заявл. 01.10.97 ; опубл. 20.11.99, Бюл. № 32. – 16 с. : ил.

16 Пат. 2164972 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> E 01 C 1/00. Способ определения пространственной длины трассы [Текст] / Никитин А. В. ; заявитель и патентообладатель Хабаровский гос. техн. ун-т ; заявл. 01.06.99 ; опубл. 10.04.01, Бюл. № 10. – 8 с.

17 Пат. 2166731 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 C 15/00. Способ определения физической площади земельного участка [Текст] / Никитин А. В. ; заявитель и патентообладатель Хабаровский гос. техн. ун-т ; заявл. 06.05.00 ; опубл. 10.05.01, Бюл. № 13. – 8 с.

18 Пат. 2172933 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 C 15/00. Геодезический знак [Текст] / Никитин А. В. ; заявитель и патентообладатель Хабаровский гос. техн. ун-т ; заявл. 04.08.99 ; опубл. 27.08.01, Бюл. № 24. – 6 с. : ил.

19 Никитин, А. В. Автоматизация геодезических измерений при выполнении землеустроительных и кадастровых работ [Текст] : учеб. пособие / А. В. Никитин. – Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2000. – 83 с.

20 Никитин, А. В. Геодезические работы при изысканиях автомобильных дорог и мостовых переходов [Текст] : учеб. пособие / А. В. Никитин. – Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2000. – 87 с.

21 Никитин, А. В. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог и мостов [Текст] : учеб. пособие / А. В. Никитин. – Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2001. – 207 с.

22 Никитин, А. В. Определение площадей земельных участков [Текст] : учеб. пособие / А. В. Никитин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2003. – 60 с.

23 Никитин, А. В. Особенности геодезических изысканий железных дорог и искусственных сооружений с применением электронных тахеометров [Текст] / А. В. Никитин, В. И. Никитин // Проблемы развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2003. – С. 118–128.

24 Никитин, А. В. Способ контроля монтажа цилиндрических оболочек при возведении опор железнодорожных мостов [Текст] / А. В. Никитин // Проблемы развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2003. – С. 177–185.

25 Никитин, А. В. Учет фактической длины трассы в проектной документации строительства железных и автомобильных дорог [Текст] / А. В. Никитин // Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона : межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2004. – С. 190–193.

26 Никитин, А. В. Демаркация границ и определение площади полосы отвода земель при строительстве железных дорог [Текст] / А. В. Никитин, В. И. Никитин // Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона : межвуз сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2004. – С. 202–207.

27 Методологические основы теории проектирования изменения мощности региональной сети железных дорог [Текст] : монография / В. С. Шварцфельд, В. А. Анисимов, Вл. А. Анисимов, А. В. Никитин и др. ; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2005. – 344 с.

28 Никитин, А. В. Повышение точности гидрологических расчетов для малых водопропускных сооружений [Текст] / А. В. Никитин // Соискатель. Прил. к журн. Мир транспорта. – 2005. – № 2. – С. 105–109.

29 Никитин, А. В. Геодезический знак [Текст] / А. В. Никитин, В. И. Никитин, А. В. Хлебородов // Проблемы развития сети железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – С. 145–150.

30 Метод повышения точности расчетов гидрологических характеристик при проектировании малых водопропускных сооружений [Текст] / А. В. Никитин, В. И. Никитин, А. Б. Солодовников, А. Р. Едигарян // Проблемы развития сети железных дорог: межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – С. 150–156.

31 Никитин, А. В. Совершенствование методов геодезических работ в транспортном строительстве [Текст] : монография / А. В. Никитин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2007. – 152 с.

32 Никитин, А. В. Определение фактической площади земельного участка по пространственной геометрической модели местности на основе электронно-цифровой карты [Текст] / А. В. Никитин // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока : межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. – С. 109–115.

33 Никитин, А. В. Определение радиусов кривых при паспортизации автомобильных дорог электронными тахеометрами и приемниками спутниковых навигационных систем [Текст] / А. В. Никитин // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока: межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. – С. 115–120.

34 Никитин, А. В. Совершенствование методики геодезического контроля при эксплуатации сооружений радиорелейной линии связи [Текст] / А. В. Никитин, А. Р. Едигарян, В. И. Никитин // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока : межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. – С. 104–109.

35 Шварцфельд, В. С. Особенности создания геодезического обоснования для проектирования реконструкции верхнего строения пути участков Забайкальской железной дороги с применением двухчастотных GPS-приемников TRIMBLE 5700 [Текст] / В. С. Шварцфельд, А. В. Никитин, А. Р. Едигарян // Современные проблемы инженерной геодезии : тр. междунар. науч.-практ. конф. ; под ред. М. Я. Брыня. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – С. 80–87.

36 Никитин, А. В. Определение радиусов кривых при паспортизации автомобильных дорог с использованием приемников спутниковых навигационных систем [Текст] / А. В. Никитин // Современные проблемы инженерной геодезии : тр. междунар. науч.-практ. конф. ; под ред. М. Я. Брыня. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – С. 165–181.

37 Никитин, А. В. Разработка и исследование способа определения пространственной (фактической) длины трассы [Текст] / А. В. Никитин // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : междунар. сб. науч. тр. ; под ред. П. А. Пегина. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010. – № 10. – С. 423–428.

38 Никитин, А. В. Геодезический мониторинг объектов цилиндрической формы [Текст] / А. В. Никитин, В. И. Никитин // Проблемы проектирования и строительства железных дорог : сб. науч. тр. ; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2011. – С. 93–97.

39 Карпик, А. П. Технология обеспечения геопространственными данными инфраструктуры транспортных коридоров [Текст] / А. П. Карпик, А. В. Никитин, А. Р. Едигарян // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 7–18.

40 Карпик, А. П. Теория моделирования пространственной длины трассы [Текст] / А. П. Карпик, А. В. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Ме-

ждународ. науч. конгр. : Международ. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 49–53.

41 Никитин, А. В. Теория способа определения пространственной длины трассы [Текст] / А. В. Никитин, В. И. Никитин // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. ; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС.– 2013.– Вып. 1.– С. 111–115.

42 Никитин, А. В. Контроль пространственного положения сооружений башенного типа [Текст] / А. В. Никитин, В. И. Никитин // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. ; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. – 2014. – Вып. 2. – С. 193–198.

43 Никитин, А. В. Оптимальные методы построения инфраструктуры геопространственных данных для транспортных коридоров [Текст] : монография / А. В. Никитин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – 159 с.