

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I»

На правах рукописи

Баширова Динара Ринатовна



**ВЫСОТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ОСАДОК НА
ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Специальность 1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Брынь М.Я.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ	12
1.1 Общие сведения об автомобильных дорогах	12
1.2 Анализ требований к точности высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог	13
1.3 Анализ методов высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог	18
1.4 Использование спутниковых определений при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог	21
1.5 Анализ методов наблюдения за осадками оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей.....	25
1.5.1 Анализ способов контроля устойчивости опорных реперов.....	27
1.5.2 Анализ предложений по совершенствованию методов контроля осадок оснований автомобильных дорог на основе использования комплексной геомеханической модели.....	28
1.5.3 Анализ способов прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог по геодезическим данным	31
1.5.4 Анализ предложений по совершенствованию прогнозной модели.....	35
1.6 Выводы по главе 1	36
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ОСАДОК ОСНОВАНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	39
2.1 Постановка задачи.....	39

2.2 Обоснование требований перехода от геодезических высот к системе нормальных высот при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог	40
2.3 Разработка методики преобразования геодезических высот в систему нормальных высот.....	41
2.3.1 Общее описание методики создания локальной модели квазигеоида	43
2.3.2 Моделирование локальной модели квазигеоида на основе интерполяционных методов.....	48
2.3.3 Оценка точности выполняемого моделирования	52
2.4 Обоснование требований к точности определения осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей.....	53
2.5 Разработка методики определения осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах на основе геометрического нивелирования.....	55
2.5.1 Создание высотной опорной сети	55
2.5.2 Определение высот деформационных марок геометрическим нивелированием.....	60
2.5.3 Оценка возможности определения высот деформационных марок тригонометрическим нивелированием	63
2.5.4 Уравнивание высот деформационных марок.....	66
2.5.5 Комплексный подход к наблюдению за осадками оснований автомобильных дорог	67
2.6 Прогнозирование осадок оснований автомобильных дорог на основе машинного обучения по геодезическим и иным данным	70
2.7 Создание прогнозной модели на основе нейронной сети по данным геотехнического мониторинга	77
2.8 Выводы по главе 2.....	81

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ОСАДК НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	86
3.1 Определение нормальных высот пунктов по результатам спутниковых определений на основе построения локальной модели квазигеоида	86
3.2 Экспериментальные исследования разработанной методики наблюдений за осадками оснований автомобильных дорог на основе геометрического нивелирования на грунтах с низкой несущей способностью	93
3.3 Экспериментальные исследования комплексного подхода на основе интеграции данных инженерного-геологических изысканий и геодезических работ.....	98
3.4 Выполнение прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог на основе методов машинного обучения по геодезическим данным	102
3.5 Выполнение прогнозирования осадок оснований автодорог на основе нейронной сети.....	109
3.6 Выводы по главе 3.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А Техническая классификация автомобильных дорог общего пользования.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Ведомость осадок.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт внедрения.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. На протяжении всего жизненного цикла автомобильных дорог большое значение имеет геодезическое обеспечение, в результате которого проводятся инженерно-геодезические изыскания, геодезическое сопровождение процессов строительства, эксплуатации и реконструкции. При этом геодезическое обеспечение часто выполняется с применением ГНСС-технологий, что значительно ускоряет процесс измерений.

Однако, если получение плановых координат по результатам спутниковых измерений исчерпывающе обосновано, то вопрос определения высот еще требует дополнительного изучения.

Вместе с тем, при строительстве автомобильных дорог необходимо также определять вертикальные смещения оснований автомобильных дорог, к точности определения которых предъявляются высокие требования. При этом геодезический мониторинг автомобильных дорог может выполняться не только в течение всего процесса возведения, но и в период эксплуатации до момента стабилизации земляного полотна. В то же время, в условиях строительства в сложной инженерно-геологической обстановке, в том числе на слабых грунтах, такой контроль может проводиться постоянно. Однако методики определения осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и возведении высоких насыпей не разработано. Вместе с тем, нет требований по комплексному подходу к проведению мониторинга, в том числе с учетом сложной инженерно-геологической обстановки объекта строительства.

Наряду с этим, для обеспечения безопасности строящихся и эксплуатируемых автомобильных дорог, а также для снижения производственных издержек требуется оценивать развитие деформационных процессов и выполнять прогнозную экстраполяцию. Однако на сегодняшний день требований к созданию прогнозной модели не представлено. В то же время, для выполнения прогнозирования все большее применение находят методы машинного обучения,

которые обладают простотой реализации, способны выявлять нелинейные зависимости между определяемыми величинами.

Таким образом, разработка методики высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог с применением ГНСС-технологии, которая бы включала преобразование геодезических высот в систему нормальных высот на основе создания локальной модели квазигеоида для линейного объекта, а также разработка методики наблюдений за осадками оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью на основе нивелирования, представляется актуальной. Также в качестве перспективного направления выделим разработку методики прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей на основе методов машинного обучения.

Тема диссертации соответствует пунктам 4 и 12 паспорта специальности 1.6.22. Геодезия.

Степень разработанности темы исследования. Усовершенствованием существующих и разработкой новых методик преобразования геодезических высот в систему нормальных высот занимались многие известные как отечественные, так и зарубежные ученые, среди которых: В.Н. Баландин, В.Н. Баранов, Е.Б. Ключин, К.К. Насретдинов, В.Б. Непоклонов, А.Н. Майоров, М.М. Машимов, М.Г. Мустафин, Н.К. Щендрик, P. Banasik, E. Mysen, W. Godah и др.

Вопросами совершенствования и разработки методов инженерно-геодезического мониторинга занимались известные ученые: Ю.П. Гуляев, В.Н. Гусев, Б.Н. Жуков, А.И. Зайцев, В.И. Кафтан, Б.Т. Мазуров, М.Г. Мустафин, В.В. Ознамец, Л.А. Пронина, В.В. Симонян, Ю.В. Столбов, Г.А. Уставич, В.С. Хорошилов, А.А. Шоломицкий, Г.А. Шеховцев, В.В. Щербаков, Х.К. Ямбаев и др.

Целью работы является разработка методики выполнения высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог с исследованием осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой

несущей способностью, обеспечивающей нормативную точность их определения, и последующим прогнозированием осадок на основе методов машинного обучения.

Идея работы заключается в том, что для высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог предлагается использовать ГНСС-методы, при этом преобразование геодезических высот в систему нормальных высот выполнять на основе создания локальной модели квазигеоида для линейного объекта. Наряду с этим, для прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог применять методы машинного обучения, в том числе нейронные сети для оценки возможности долгосрочного прогнозирования.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ современного состояние вопроса высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

2. Обоснованы требования к точности перехода от геодезических высот в систему нормальных высот и на их основе разработана методика построения модели локального квазигеоида для линейного объекта.

3. Разработана методика определения осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей с использованием геометрического нивелирования.

4. Создана прогнозная модель осадок на основе методов машинного обучения по данным геодезических измерений.

5. Создана прогнозная модель осадок на основе нейронной сети по данным геотехнического мониторинга.

Объектом исследования выступают автомобильные дороги.

Предмет исследования – локальная модель квазигеоида, как элемент перехода от геодезических высот к системе нормальных высот, методы машинного обучения, как способ прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика определения нормальных высот пунктов по результатам спутниковых определений путем введения переменных поправок на основе построения локальной модели квазигеоида для линейного объекта и даны рекомендации по определению необходимого и достаточного числа пунктов для создания модели.

2. Обоснована и разработана методика определения осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей с использованием геометрического нивелирования, обеспечивающая нормативную точность их определения.

3. Предложено осуществлять проектирование схемы размещения деформационных марок на основе анализа предварительно созданной комплексной геомеханической модели грунта основания объекта исследования.

4. Создана методика выполнения прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог на основе машинного обучения по данным геодезических измерений и выбора предпочтительной.

5. Разработана методика по выполнению прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью по данным геотехнического мониторинга на основе нейронной сети с оценкой возможности долгосрочного прогнозирования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты в ходе разработки методики определения нормальных высот пунктов по результатам спутниковых измерений на основе создания локальной модели квазигеоида для линейного объекта позволяют определять нормальные высоты на уровне точности, необходимом при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог. В то же время, методика определения осадок оснований автомобильных дорог и полученные результаты прогнозирования осадок дают возможность повысить точность измерений и уточнить периодичность выполнения циклов нивелирования. Практическая значимость работы состоит в том, что

разработанные методики применены при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог.

Методология и методы исследования. При выполнении исследования обосновано применялись теоретические и экспериментальные методы, среди которых: теория ошибок геодезических измерений, метод наименьших квадратов, методы машинного обучения, методы сравнительного анализа, методы моделирования геодезических сетей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика определения нормальных высот пунктов по результатам спутниковых определений позволяет повысить их точность до уровня, необходимого при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог.

2. Разработанная методика определения осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей на основе геометрического нивелирования обеспечивает необходимую точность наблюдений.

3. Прогнозирование осадок оснований автомобильных дорог на основе методов машинного обучения по данным геодезических и иных измерений с созданием комплексной геомеханической модели позволяет получить предварительную оценку протекания деформационного процесса и обеспечить рациональное планирование частоты циклов геодезического мониторинга.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается: корректной постановкой целей и задач диссертационной работы, планированием экспериментальных исследований, использованием теоретических основ методов машинного обучения, обсуждением основных результатов исследования на научных конференциях. Результаты диссертационной работы согласуются с выводами, полученными другими отечественными и зарубежными исследователями.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях:

1. Конкурс национального объединения изыскателей и проектировщиков (НОПРИЗ) в номинации «Лучшая концепция нереализованного проекта» (г. Москва, 2020 г., октябрь).

2. Фестиваль «Неделя науки-2021», LXXXI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

3. Конкурс грантов Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук (победитель) (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

4. Международная конференция Transport Problems-2021: XIII International Scientific Conference, X International Symposium of Young Researchers (г. Катовице, 2021 г.).

5. IV Всероссийская научно-практическая конференция «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.).

6. XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (победитель) (г. Санкт-Петербург, 2022 г.).

7. IV Всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.).

8. XIV Международная научно-практическая конференция «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. Навигация» (г. Москва, 2023 г.).

Практическая реализация

Разработанные методики использованы при высотном обосновании строительства и эксплуатации автомобильной дороги на грунтах с низкой несущей способностью. Методика по определению осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью с их последующим прогнозированием на основе методов машинного обучения внедрена в производственный процесс при проведении геотехнического мониторинга деформаций компанией ООО «АЕМ Гео» при разработке проекта

«Скоростная автомагистраль Москва-Санкт-Петербург на участках 543 км-646 км (Участок 7) и 646 км-684 км (Участок 8)», что подтверждается актом внедрения №6 от 10.09.2022. (Приложение Г).

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач диссертационного исследования, разработке методики преобразования геодезических высот, полученных с помощью ГНСС-методов, в систему нормальных на основе создания локальной модели квазигеоида, разработке методики наблюдений за осадками оснований автомобильных дорог, возводимых на слабых грунтах и высоких насыпях, разработке методики по выполнению прогнозирования осадков на основе методов машинного обучения, анализе и обобщении полученных экспериментальных результатов.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах (пункты списка литературы № 6-10, 13, 15, 16, 125), в том числе в 4 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункт списка литературы № 85).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, трех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 166 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков и 15 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Брыню М.Я. за всестороннюю помощь на каждом этапе исследования, преподавателям и сотрудникам кафедры «Инженерная геодезия» ФГБОУ ВО ПГУПС, а также кафедры геотехники ФГБОУ ВО СПбГАСУ.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

1.1 Общие сведения об автомобильных дорогах

Согласно государственному стандарту [27] под автомобильной дорогой принято понимать инженерное сооружение, используемое для осуществления движения с назначенными скоростями, нагрузками и габаритами транспортных средств, и участки земель, предназначенные для его размещения. На рисунке 1.1 представлены основные конструктивные элементы автомобильных дорог, которыми являются: земляное полотно, дорожная одежда, проезжая часть, обочины, искусственные и линейные сооружения [26, 27].

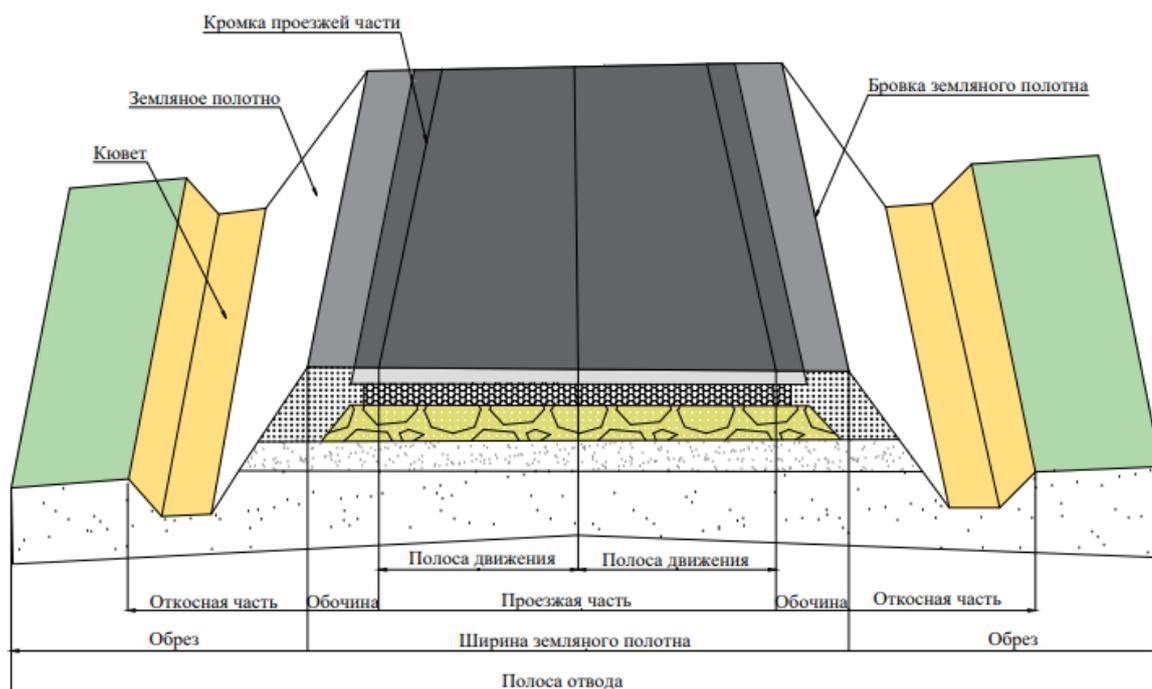


Рисунок 1.1 – Основные конструктивные элементы автомобильной дороги

Идентифицировать автомобильные дороги можно по классам (в зависимости от условий доступа) и по категориям (в соответствии с их транспортно-эксплуатационными показателями). Согласно государственному стандарту [27] выделяют три класса автомобильных дорог:

– автомобильные магистрали (автомобильные дороги, предназначенные для движения на дальние расстояния транспортных потоков большой интенсивности с высокими скоростями);

– дороги для скоростного движения (скоростные дороги, на которых отсутствует пересечение транспортных потоков прямого направления);

– обычные дороги (автомобильные дороги необорудованные разделительной полосой, движение по которым осуществляется с малой и средней интенсивностью).

Разделение автомобильных дорог на категории предполагает предъявление соответствующих технических требований, в том числе к геометрическим параметрам, условиям эксплуатации, типу пересечения дороги с другими инженерными коммуникациями и выбору технических средств организации дорожного движения. В Приложении А представлена классификация автомобильных дорог в соответствии с основными техническими параметрами.

1.2 Анализ требований к точности высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог

Важным аспектом обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог является геодезическое сопровождение, при котором выполняются инженерно-геодезические изыскания, разбивочные работы, исполнительные съемки, а на стадии эксплуатации, кроме этого, и мониторинг деформаций объектов [8, 13, 32, 33, 78, 113].

Вопросу обеспечения норм точности при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог уделяется особое внимание [4, 6, 22, 28, 55, 61, 81, 87, 98, 100, 101, 103, 119, 166], о чем, в свою очередь, свидетельствует обновление нормативно-технической документации [28, 31, 86].

В настоящее время требования к геодезическому обеспечению и порядку создания геодезических сетей на этапах проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации автомобильных дорог установлены в государственном стандарте [31]. В данном документе рассмотрены

основные требования к созданию опорной геодезической и каркасной сетей, геодезической разбивочной основе и геодезическому мониторингу. Кроме того, геодезическое обеспечение и выполнение инженерно-геодезических работ осуществляются в соответствии с рядом нормативно-технических документов [24, 29, 30, 31, 88, 90].

Согласно пункту 5.1.5 свода правил [90] при выполнении инженерно-геодезических изысканий в зависимости от протяженности автомобильной дороги высотную опорную геодезическую сеть (ОГС) создают методом геометрического нивелирования II, III и IV классов. Однако при обосновании программы создания высотных ОГС с точностью нивелирования IV класса, возможно применение ГНСС-методов. В этом случае необходимо использование не менее пяти исходных пунктов. Под исходными понимают пункты, высоты которых определены геометрическим нивелированием не ниже IV класса. Необходимо также отметить, что значения предельных погрешностей определения превышения на 1 км хода при выполнении инженерно-геодезических изысканий для строительства автомобильных дорог не должны превышать 10 мм [31].

Отдельно в пункте 6.7 государственного стандарта [31] отмечено, что высотное положение пунктов высотной ОГС также допускается определять с помощью ГНСС-методов в случае их удаления от исходных пунктов государственной нивелирной сети более 10 км. При этом точность выполненных измерений должна соответствовать методикам нивелирования II и III классов.

Дополнительно предъявляются требования к расположению и плотности закладки пунктов ОГС: на начальном и конечном километре дороги в пределах видимости должно находиться не менее двух пунктов, а на всем протяжении трассы требуется располагать пункты ОГС не реже чем через 1 км [31].

Для осуществления строительно-монтажных работ на автомобильных дорогах необходимо создание каркасной сети (КС), геодезической разбивочной основы (ГРО) и мостовой ГРО [31]. Отметим, что средние квадратические ошибки (СКО) определения высотного положения пунктов мостовой ГРО, в том

числе при измерении с помощью спутниковых определений, не должны превышать 3 мм.

Обратим внимание на то, что создание КС в подготовительный период строительства исключает возможные ошибки государственной геодезической сети (ГГС) и государственной нивелирной сети (ГНС) и переносит точность принятой системы координат и высот в непосредственную близость от объекта строительства [31]. На рисунке 1.2 представлена общая последовательность создания КС и ГРО.



Рисунок 1.2 – Общая последовательность создания КС и ГРО

Построение КС осуществляется с привязкой к пунктам ГГС и ГНС, при этом пункты сети должны быть расположены попарно за пределами зоны строительства. В таблице 1.2 представлены требования к расположению пунктов КС и предельному расстоянию между парами пунктов КС в зависимости от протяженности линейного объекта.

Таблица 1.2 – Требования к расположению пунктов КС

Протяженность линейного объекта, км	Расположение пунктов КС	Предельное расстояние между парами пунктов КС
Менее 5	Пункты КС в паре располагают на расстоянии не менее 350–700 м	Располагают в начале и конце объекта строительства
От 5 до 10		5 км
От 10 до 100 включительно		8 км
Свыше 100		По согласованию с заказчиком

В процессе строительства выполняется контроль точности геометрических параметров конструктивных элементов автомобильных дорог, что является

важным показателем качества возведения линейных сооружений. Основные требования к точности строительства и приемки автомобильных дорог регламентированы сводом правил [87] и государственным стандартом [28]. В частности, указано, что при устройстве оснований и покрытий строительными дорожными машинами с автоматической системой выдерживания отметок для всех категорий дорог менее 10% результатов определений отметок не должны иметь отклонения от проектных значений, превышающие ± 20 мм, остальные измерения не должны превосходить ± 10 мм.

Заметим, что для обеспечения проектного высотного положения оснований и покрытий важным этапом является обоснование норм точности следующих процессов:

- проложения нивелирных ходов вдоль автомобильной дороги вне зоны влияния земляных работ;
- выноса отметок пикетов от рабочих реперов;
- детальной разбивки отметок поверхностей слоев оснований и покрытий автомобильных дорог;
- геодезического контроля устройства слоев оснований и покрытий трассы [104].

Вопрос расчета точности и обоснования допусков на строительные работы и геодезический контроль высотного положения оснований и покрытий автомобильных дорог освещен в статьях профессора Столбова Ю.В. с соавторами [67, 100-104], в которых, в том числе, указывается на то, что уменьшение расходов на производство работ во многом зависит от правильного определения точности измерений. Для обоснования допусков на геодезические работы при строительстве автомобильных дорог необходимо руководствоваться следующими принципами: равного влияния отдельных источников погрешностей, ничтожного влияния отдельных источников погрешностей на окончательное положение и учет точности технологических процессов. Однако, при анализе методов расчета допусков на строительные работы и геодезический контроль было выявлено, что

допуски, полученные с учетом точности технологических процессов, являются наиболее обоснованными [101-104].

На этапе приемки и ввода автомобильной дороги в эксплуатацию выполняются, в том числе, контроль продольной и поперечной ровности слоев покрытия и основания дорожной одежды. Отметим, что продольную ровность и допустимые отклонения рекомендуется определять с помощью профилометрических установок. Наряду с этим, на промежуточном этапе допускается измерение продольной и поперечной ровности трехметровой рейкой, при этом для 5% измерений ширина просвета под рейкой не должна превышать 6 мм в продольном направлении и 10 мм в поперечном, а остальные результаты измерений не должны превосходить 3 мм в продольном и 5 мм в поперечном направлениях [28].

Отдельно подчеркнем, что в соответствии со сводом правил [86] при возведении насыпи на грунтах с низкой несущей способностью и при высоте насыпи более 12 м, к полученным результатам измерений предъявляются дополнительные повышенные требования. Кроме того, в качестве величин, характеризующих завершение осадки, приняты интенсивность осадки и степень консолидации основания.

Таким образом, в последнее время наблюдается обновление многих нормативно-технических документов, регламентирующих точность выполнения высотного обоснования строительства и эксплуатации автомобильных дорог. При этом требования к точности определения высот при строительстве автомобильных дорог существенно повышаются. Вследствие этого, возникает необходимость проведения исследований по выполнению высотного обоснования строительства и эксплуатации автомобильных дорог, в частности вопроса использования ГНСС-технологии при геодезическом сопровождении, а также исследования необходимой точности определения вертикальных перемещений оснований при возведении высоких насыпей, а также насыпей на грунтах с низкой несущей способностью.

1.3 Анализ методов высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог

На сегодняшний день приоритетным направлением в строительстве, в частности в дорожной отрасли, становится применение передовых технологий, в том числе информационного моделирования, которое позволит на любой стадии проекта контролировать основные характеристики линейного сооружения, а также повысит качество предоставляемых данных путем исключения противоречивой информации [9, 15, 16, 37, 73, 159, 160]. В связи с этим, активно применяются бесконтактные методы съемки местности, такие как лазерное сканирование [9, 15, 16, 37, 80, 126] и аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов [9, 15, 16, 126, 159].

Лазерное сканирование – современная технология высокоскоростного измерения множества точек, принадлежащих объекту съемки, с помощью лазерно-сканирующей системы [9, 15-17]. Вопрос применения лазерного сканирования в транспортной сфере очень актуален, например, в статье Середовича В.А. [91] обоснована возможность применения лазерного сканирования для решения проблем в транспортной сфере, в частности, подчеркивается возможность создания по данным лазерного сканирования не только топографических планов, но и цифровых моделей рельефа, ситуации и объектов. Также автор указывает на то, что лазерное сканирование будет сопровождать весь жизненный цикл объектов транспортной инфраструктуры. Применительно к линейно-протяженным объектам наибольшее распространение получило мобильное лазерное сканирование, которое позволяет существенно сократить время на проведение работ, обладает высокой степенью детализации данных, увеличивает производительность и безопасность выполнения съемки [9, 15, 16, 107]. Дополнительно в исследовании [92] отмечено, что результаты, полученные в ходе проведения мобильного лазерного сканирования, являются достоверным источником информации для оценки ровности дорожного покрытия.

Однако на сегодняшний день большая часть работ по обеспечению высотного обоснования строительства и эксплуатации автомобильных дорог выполняется геометрическим нивелированием [22, 67, 78, 79, 81, 100-104, 109]. Геометрическое нивелирование применяется, например, при съемке поперечников невысоких насыпей и выемок (высота насыпи не превышает 2 м) [109]. А в эксплуатационный период с помощью геометрического нивелирования устанавливают степень износа дорожного покрытия [109]. Однако, высотное обоснование строительства и эксплуатации автомобильных дорог, особенно съемку поперечников при высоте насыпи более 2 м [109], необходимо выполнять тригонометрическим нивелированием. Остановимся подробно на этом методе.

Отметим, что выполнение высотного обоснования строительства объектов и определение осадок сооружений допускается выполнять тригонометрическим нивелированием [52]. Отметим, что превышение h из одностороннего тригонометрического нивелирования можно вычислить по (1.1, 1.2) [52]:

$$h = d \operatorname{ctg}(z) + i - l + \frac{(1-k)d^2}{2R \sin^2(z)}, \quad (1.1)$$

$$h = d \operatorname{tg}(\alpha) + i - l + \frac{(1-k)d^2}{2R \sin^2(z)}, \quad (1.2)$$

где d – горизонтальное проложение;

z – зенитное расстояние;

α – угол наклона;

i – высота установки прибора;

l – высота визирной цели;

R – радиус Земли;

k – коэффициент вертикальной рефракции.

Вопрос исследования точности тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров освещен во многих исследовательских работах [1, 11, 21, 22, 52, 56, 64, 65, 75, 82, 101]. Например, в статье Никонова А.В. [65] отмечено, что тригонометрическим нивелированием можно достичь точности геометрического нивелирования II класса. Однако

применительно к линейным сооружениям, особенно к автомобильным дорогам на высоких насыпях, этот вопрос требует дополнительного рассмотрения.

Отдельно отметим применение комплексного подхода к геодезическому контролю укладки дорожного покрытия с применением геометрического и тригонометрического нивелирования [22]. Наибольшей составляющей ошибки определения высоты тригонометрическим нивелированием является погрешность определения коэффициента рефракции, которая возрастает при увеличении расстояния [22, 52, 64, 75]. Ослабление влияния этой ошибки сводится, в том числе, к выполнению избыточных измерений (синхронных двухсторонних наблюдений). Такой метод реализуется при передаче отметок на пункты ГРО, когда геометрическим нивелированием это осуществить невозможно [22]. Кроме того, еще одной значительной составляющей СКО определения высоты тригонометрическим нивелированием является погрешность определения высоты прибора [65]. Одним из методов уменьшения этой составляющей является установка нивелира между исходным пунктом и тахеометром и передача отметки исходного пункта на горизонтальную ось прибора [21].

В то же время, для определения высотного положения элементов линейных сооружений используются и ГНСС-методы [63, 119, 141]. В частности, в статье Прониной Л.А. с соавтором [78] рассмотрен комплекс топографо-геодезических работ при построении ОГС ГНСС-аппаратурой в процессе строительства автомобильной дороги. Авторами исследований [63, 119] разработаны методики по определению геометрических параметров автомобильных дорог с помощью ГНСС-технологии на основе координатного способа при строительстве, диагностике и паспортизации линейных сооружений. Помимо этого, в последние годы ГНСС-аппаратура находит свое применение и в мониторинге деформационных процессов [40], в том числе в суровых условиях [141]. В работе Jiang W. [141] отмечено, что для достижения миллиметрового уровня измерений необходимы отличные условия наблюдений, что, как правило, невозможно. В связи с этим предложено объединение наземных дальномерных наблюдений и

спутникового позиционирования: предлагается выполнять точное измерение длины базисной линии лазерными или электронными дальномерами.

В результате проведенного анализа установлено, что несмотря на развитие передовых технологий, включающих бесконтактную съемку, наибольшее применение при высотном обосновании строительства и эксплуатации автомобильных дорог все еще находит геометрическое нивелирование. Таким образом, перспективным направлением исследования становится анализ требований к точности определения высот, в том числе при выполнении измерений с помощью ГНСС-аппаратуры.

1.4 Использование спутниковых определений при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог

Как отмечалось выше, выполнение геодезического сопровождения строительства и эксплуатации автомобильных дорог требует определения высот, которые могут быть получены преимущественно геометрическим нивелированием. Однако в последнее время для определения высотного положения элементов линейных сооружений все большее распространение получила аппаратура, работающая по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем [8, 13, 18, 22, 32, 33, 51, 54, 68, 78, 108, 111, 113, 119, 120, 125, 130].

В качестве основных преимуществ использования спутникового позиционирования по сравнению с геометрическим нивелированием можно выделить следующие:

- метод не требует видимости между смежными пунктами [13, 78];
- не подвержен зависимости от погодных условий [13];
- дает возможность проводить измерения в труднодоступных районах [78, 111, 124, 129, 132];
- позволяет сократить сроки выполнения измерений и повысить производительность труда [13, 69, 78, 111, 124].

Следует отметить, что по результатам спутниковых определений получают геодезические высоты, а при геометрическом нивелировании – нормальные. Связь геодезических H и нормальных высот H^γ определяется следующей формулой 1.3:

$$H = H^\gamma + \xi^\gamma, \quad (1.3)$$

где ξ^γ – аномалия высоты.

Однако результаты геодезического обеспечения должны быть представлены в системе нормальных высот [8, 13, 32, 33, 125, 131, 153, 156], из этого вытекает вопрос преобразования геодезических высот в систему нормальных высот. На сегодняшний день выделяют несколько подходов к решению данного вопроса.

1. Способ Гаусса [112]. Предполагается наличие пунктов с известными нормальными и геодезическими высотами. Преобразование высот происходит по формуле среднего весового 1.4:

$$H^\gamma = H + \frac{\sum_{i=1}^n (H^\gamma - H)_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (1.4)$$

где $H^\gamma - H$ – разность нормальной и геодезической высот исходных пунктов;

P_i – вес аномалии высоты, который рассчитывается из следующего выражения 1.5:

$$P_i = \frac{1}{L_i}. \quad (1.5)$$

В формуле (1.5) L_i – расстояние от определяемой до исходного пункта в км.

2. Переход к ортометрическим высотам с помощью глобальных моделей геоида [97] и преобразование в систему нормальных высот путем введения постоянных поправок, учитывающих разницу высот между геоидом и квазигеоидом. Отметим, что такой подход, как и предыдущий, требует наличия в районе работ исходных пунктов.

Обратим внимание на то, что оба представленных метода не всегда достоверно отображают аномальность района работ [13, 112]. В частности, согласно стандарту организации [97] получаемые поправки являются постоянной величиной. При этом длина линий и диапазон изменения аномалии высоты

местности не учитываются в ходе её расчета. Кроме того, в рассмотренных выше методах не регламентировано количество пунктов, являющееся достаточным для выполнения преобразования высот.

3. Учет аномалии высоты в результате построения локальных моделей квазигеоида [8, 13, 18, 19, 32, 33, 39, 44, 51, 54, 60, 62, 69, 74, 105, 108, 111-114, 118, 120, 123-125, 129-133, 138, 143, 149, 151, 153, 155, 156, 163]. Отметим, что модели квазигеоида можно получить следующими методами: гравиметрическим [39, 130, 133, 151, 153] (сочетание вычислений по интегральной формуле Стокса при условии обеспеченности района работ гравиметрической съемкой), а также с использованием данных спутниковых определений и геометрического нивелирования на исходных пунктах. В исследованиях Medved K. с соавторами [151] и Godah W. с соавторами [133] отмечается, что региональная гравиметрическая съемка повышает точность рассчитанной модели квазигеоида. Однако районы работ не всегда обеспечены гравиметрической съемкой, поэтому в рамках исследования предлагается выполнять построение локальной модели квазигеоида на основе данных спутниковых определений и геометрического нивелирования.

В то же время, в диссертационном исследовании Шона Т.Ч. [113] разработана классификация построения моделей квазигеоида с учетом глобальной модели геоида (остаточный) и без коррекции глобальных моделей (волновой).

Отметим, что построение моделей аномалий высот, как правило, обусловлено необходимостью развития этих территорий: прибрежных городов Красного моря [122], Эфиопии [132], Польши [131], Словении [151], Словакии [130]. Авторами работ [60, 124, 129, 132] подчеркнута, что создание таких моделей в горных регионах является обязательным для точного определения высот при использовании спутниковых технологий. В исследовании [131] отмечено, что при построении локальной модели на территорию города Кракова была достигнута точность на уровне 5 мм, что значительно выше точности национальной модели.

Вместе с тем, учет локальной модели квазигеоида способствует уменьшению искажений информации о рельефе при построении цифровых моделей рельефа (ЦМР), особенно при съемке обширного участка работ [156].

Наряду с этим, в исследовании Астаповича А.В. с соавторами [42] отмечено, что для получения высот пунктов каркасной сети и геодезической разбивочной основы используют модель геоида EGM2008, однако для установления более надежной связи систем высот вдоль оси линейного объекта от ближайших реперов государственной высотной основы одиночными ходами геометрического нивелирования III класса определяются нормальные высоты отдельных пунктов каркасной сети и геодезической разбивочной основы. При этом полученные значения невязок на отдельных пунктах обусловлены ошибками модели глобального геоида и ошибками определения геодезических и нормальных высот. Подчеркнуто, что существенное влияние на значения невязок оказывают ошибки модели EGM2008, а погрешности определения высот представляются в виде шума.

В последнее время для построения локальной модели квазигеоида находят свое применение искусственные нейронные сети, например, адаптивные сети на основе системы нечеткого вывода (адаптивная нейро-нечеткая система вывода) [44, 123, 163], и интерполяционные методы [19, 123, 143, 155, 165], в частности, реализуемые в ПО Golden Software Surfer. Однако методы интерполяции показывают более точные результаты по сравнению с методами мягких вычислений [123], вследствие чего для построения модели квазигеоида предлагается использовать интерполяционные методы.

Отметим, что для создания поверхности целесообразно использовать ПО Golden Software Surfer, в котором осуществляется преобразование данных (набора точек с трехмерными координатами) в криволинейные контуры поверхностей на основе двенадцати интерполяционных методов, среди которых выделяют триангуляцию с линейной интерполяцией, методы минимальной кривизны, ближайшего соседа, естественной окрестности, радиальные базисные функции и

кригинг [13, 19, 165]. В качестве преимуществ рассматриваемого программного обеспечения можно выделить следующие:

- оперативное создание поверхностей [123, 142, 165];
- возможность настройки параметров интерполяционных методов [77, 123, 142, 165];
- автоматическую оценку точности выполненной интерполяции на основе расчета основных статистических характеристик [13, 19, 123, 165];
- достаточную степень визуализации [19, 142].

В результате проведенного анализа, можно сделать следующие выводы:

- в подавляющем большинстве исследований решают задачу построения локальных моделей аномалий высот на площадной объект: город или регион, однако отсутствуют исследования построения таких моделей для линейных сооружений;
- не приведены рекомендации о необходимом количестве геодезических пунктов, число которых являлось бы достаточным для обеспечения заданной точности;
- не представлены указания о предпочтительном методе интерполяции при создании таких моделей.

Таким образом, выполненный анализ выявил необходимость разработки методики построения локальной поверхности квазигеоида, которая позволит установить последовательность шагов проектирования числа исходных пунктов, дать рекомендации об оптимальном интерполяционном методе и оценить точность выполненного моделирования.

1.5 Анализ методов наблюдения за осадками оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей

В процессе выполнения строительства автомобильных дорог часто насыпи возводятся на слабых основаниях. Под слабым принято понимать грунт, который имеет прочность на сдвиг в условиях природного залегания менее 0,075 МПа или

модуль осадки, превышающий 50 мм/м при нагрузке 0,25 МПа [25]. В этой связи, помимо контроля качества строительства, которое регламентируется основными нормативными документами [23, 24, 29-31, 88, 90], требуются наблюдения за деформациями насыпи, для выявления которых проводится геодезический мониторинг [42, 48].

В соответствии со стандартом организации [99] геодезический мониторинг – это систематический контроль и оценка состояния конструкций, зданий и сооружений, который проводится с начала строительства и выполняется на основе геодезических наблюдений. Цель геодезического мониторинга – предупреждение или выявление негативных процессов, которые могут повлечь за собой потерю эксплуатационных характеристик объектов [7, 55, 61, 94, 95, 49, 66, 110]. Геодезический мониторинг может выполняться постоянно или периодически. Под постоянным геодезическим мониторингом понимают проведение непрерывных наблюдений с применением автоматизированных систем с целью контроля состояния уникальных зданий и сооружений. Наиболее распространенным видом геодезического мониторинга является периодический мониторинг, который проводится с определенной частотой наблюдений [95, 99].

Как было отмечено в пункте 1.2, к автомобильным дорогам на слабых основаниях, а также к трассам, возводимым на насыпи более 12 м, предъявляются дополнительные требования. В то же время предельные погрешности определения осадок рассматриваемых линейных сооружений не регламентированы, при этом принято руководствоваться интенсивностью осадки и степенью консолидации основания.

Кроме того, на таких участках строительства зачастую реализуются различные конструктивные решения, связанные с усилением основания земляного полотна, что дает возможность изменения технологического режима возведения насыпи [66]. Из этого следует, что важно предусмотреть мероприятия по наблюдению за деформациями насыпи в период строительства до устройства дорожной одежды, которые бы позволили определить сроки завершения интенсивной части консолидации основания и уточнить время укладки дорожной

одежды. На сегодняшний день отраслевой дорожный методический документ [71] предусматривает измерение деформаций земляного полотна только на основе инклинометрии, а рекомендации по применению геометрического и тригонометрического нивелирования отсутствуют.

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей является разработка методики геодезического мониторинга осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях с созданием прогнозной модели, которая бы способствовала уточнению как периодичности геодезических наблюдений, так и сроков укладки дорожного полотна.

1.5.1 Анализ способов контроля устойчивости опорных реперов

При выполнении геодезического мониторинга важно осуществлять контроль стабильности исходных пунктов [40, 115]. Отметим, что на вертикальные смещения реперов могут оказывать влияние как природные, так и антропогенные факторы [40]. К природным факторам относят изменение температуры пород, влажностного режима, уровня грунтовых вод и др. В качестве антропогенных факторов выделяют давление от возводимых сооружений, забор грунтовых вод и др. В связи с этим, для достоверного определения осадок необходимо выполнить анализ устойчивости опорных реперов.

Вопросу контроля устойчивости высотной основы посвящено множество исследований [20, 38, 40, 46, 47, 115]. В качестве примера можно привести способы определения устойчивых реперов Карпенко В.А. [47], Григоренко А.Г. [20], основанные на корреляционном и дисперсионном анализе превышений. К недостатку этой группы методов можно отнести возможность применения только при большом количестве накопленной информации, что требует проведения значительного числа циклов наблюдений. В связи с этим, проводить анализ устойчивости опорных пунктов в каждом цикле наблюдений невозможно.

Наибольшее распространение получили следующие принципы:

– неизменной отметки наиболее устойчивого репера сети, например способ А. Костехеля;

– неизменной средней отметки реперов сети, в качестве примера можно привести способ А.Ф. Стороженко, П. Марчака [40, 115].

Способ А. Костехеля предполагает, что причиной колебания одноименных превышений в разных циклах, вычисленных после уравнивания свободной нивелирной сети, является осадка исходных пунктов. Тогда разность превышений в текущем и нулевом циклах v показывает суммарное влияние осадок исходных пунктов между циклами. В этом случае, репер, для которого $[vv] = \min$, принимается за наиболее устойчивый [40].

С одной стороны, способ А. Костехеля обладает простотой и наглядностью [38, 40, 115], а с другой – при одинаковом смещении всей группы реперов выделение наиболее устойчивого затруднительно.

В качестве примера, отражающего второй принцип контроля устойчивости реперов, приведем способ П. Марчака, в котором контроль за устойчивостью реперов выполняется путем анализа изменения превышений между исходными пунктами в начальном и последующих циклах наблюдений с предельными погрешностями измерений [38, 115].

В то же время, в исследовании Б.Н. Дьякова [38] отмечено, что только учет рейтинга каждого репера сети может обеспечить правильность выбора наиболее устойчивого репера при применении способов А. Костехеля и П. Марчака.

1.5.2 Анализ предложений по совершенствованию методов контроля осадок оснований автомобильных дорог на основе использования комплексной геомеханической модели

В последнее время наблюдается тенденция к комплексному подходу геодезического обеспечения деформационных процессов [2, 5, 45, 49, 53, 66, 93-95, 110, 145, 146, 152, 158]. Под комплексным понимают подход, предусматривающий максимально возможный учет факторов, влияющих на оценку технического состояния объекта [40]. При этом основными характеристиками контроля являются: достоверность, полнота и объем

предоставляемых данных, периодичность и точность выполняемых измерений, стоимость проводимых работ.

В последние годы перспективным направлением исследования является применение геолого-механических моделей при геодезическом обеспечении деформационных процессов [2, 5, 49, 93-95]. Такой подход обусловлен тем, что рассматриваемые модели позволяют моделировать сложные инженерно-геологические условия, что дает возможность оценить их поведение.

Подробнее остановимся на вопросе применения геомеханических моделей. Предложения по совершенствованию метода оценки деформаций рассматривались в исследованиях Баранова В.Н. [5], Мустафина М.Г. [2, 144, 152], Симоняна В.В. [93-95, 158], Хорошилова В.С. [145, 146], Шоломицкого А.А. [59, 117].

В статье Баранова В.Н. с соавтором [5] рассматривается вопрос определения профиля поверхности оседания на территории нефтедобычи на основе использования геолого-механической модели. По мнению авторов такой подход экономит материальные средства на организацию мониторинговых измерений, позволяет определить активную зону, подверженную максимальной деформации.

Применение геолого-механической модели для расположения деформационных марок соразмерно напряженно-деформированному состоянию рассмотрен в статье [2]. Целесообразность такого подхода заключается в акцентировании внимания на возможные зоны разрушения и выполнении их контроля, что также повысит точность прогноза аварийных ситуаций.

Преимущества интеграции геомеханической модели и данных геодезического мониторинга следующие:

- построение геомеханической модели дает возможность создать оптимальную деформационную сеть и усовершенствовать метод анализа результатов [49, 94, 95, 158];

- дает предварительную оценку деформационных процессов во времени [95];

- позволяет оценить необходимость мер по инженерной защите сооружений [49, 95];

- предоставляет возможность определения оседания на тех участках, где СКО метода измерения не позволяет его измерить с необходимой точностью за малый отрезок времени [49].

Однако, заметим, что полностью полагаться на созданную геомеханическую модель, особенно при моделировании слабых оснований, невозможно ввиду следующих причин:

- сложности сохранения образцов в естественном состоянии при транспортировке и хранении, что напрямую влияет на определение достоверных характеристик слабых грунтов [5, 95];

- наличия погрешностей, возникающих при определении параметров [95];

- возможного недостаточного объема инженерно-геологических изысканий [49, 93, 95].

Кроме того, возникают трудности, связанные с отсутствием постоянных характеристик в толще слабых грунтов и сложности модели консолидации грунта. Вследствие этого, необходимо верифицировать полученную геотехническую модель (корректировать расчетные характеристики грунта) с учетом результатов геодезических измерений.

Однако все исследования были выполнены для площадных объектов, а протяженные линейные сооружения не были исследованы.

Отметим, что в рамках инженерно-геологических изысканий производятся расчеты насыпей автомобильных дорог на слабых основаниях, как правило, методом конечных элементов (элементы, содержащие узлы, определяющие напряжения и перемещения в расчетной схеме). При этом создаются комплексные геомеханические модели (КГМ) грунта основания, которые способствуют уменьшению затрат на выполнение работ по усилению и стабилизации за счет полной оценки происходящих при строительстве на водонасыщенных грунтах процессов [70]. В то же время, для решения задач геодезического мониторинга эти модели не нашли свое применения. Вместе с тем, при решении задач

мониторинга линейных объектов часто возникает необходимость в интеграции данных инженерно-геологических изысканий и результатов геодезических работ, что, в свою очередь, позволит разработать систему экспертной оценки, которая предоставит возможность повысить точность результатов [2, 5, 7, 49, 93-95, 158].

В ходе проведенного анализа была выявлена необходимость проработки вопроса комплексного подхода к проведению геодезического мониторинга с использованием КГМ грунта основания.

1.5.3 Анализ способов прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог по геодезическим данным

Важным этапом геодезического мониторинга деформаций сооружений, в том числе оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при высоте насыпи более 12 м, является выявление закономерности наблюдаемых смещений как на краткосрочный, так и на долгосрочный периоды. Для определения тенденции развития деформационных процессов необходимо выполнить создание математической модели, учитывающей возрастание или убывание наблюдаемых деформаций, что позволит выполнить прогнозную экстраполяцию [10, 12, 36, 76, 106, 110, 116, 122, 127, 135, 136, 144, 150, 156].

Прогнозирование деформаций позволяет решать следующие задачи:

– дает возможность уточнять период повторного наблюдения, в том числе позволяет рационально планировать периодичность циклов измерений [2, 5, 12, 49, 66, 93-95, 110, 127, 135, 136, 144, 152, 158];

– повышает точность результатов измерений [5, 49, 93-95, 158];

– позволяет эффективно планировать ремонтные работы и, при необходимости, принимать меры по инженерной защите сооружения [94, 127, 136, 150, 154].

Прогнозирование деформаций осуществляется по двум основным направлениям:

– создание комплексной прогнозной модели, учитывающей влияние различных факторов, таких как нагрузка на основание, уровень грунтовых вод, изменение температуры пород, влажностного режима и др. Все указанные факторы может содержать прогнозная модель. Тогда после определения однородности наблюдаемого процесса, степени зависимости прогнозируемого и опорного параметров необходимо подобрать такую функцию $y=F(x)$, которая бы максимально отражала протекание деформационного процесса [10, 53, 115];

– по геодезическим данным [10, 12, 76, 115].

Отметим, что в нормативных документах не представлено требований к созданию прогнозных моделей при выполнении геодезического мониторинга как зданий, так и линейно-протяженных объектов. Рекомендации к выполнению прогнозирования по данным геодезических наблюдений изложены в [57, 58, 99], но они относятся только к зданиям и сооружениям повышенного уровня ответственности. В соответствии с [99] для прогнозирования по геодезическим данным необходимо выполнение следующих этапов:

- составление временного ряда;
- подбор трендовой функции;
- выполнение экстраполяции функции;
- корректировка прогноза по результатам анализа на текущий момент времени.

При этом временной шаг (интервал между циклами наблюдений) должен быть одинаков, что на практике не всегда осуществимо. Кроме того, при выполнении прогнозирования только на основе геодезических данных горизонт прогнозирования не должен превышать 20-25% от длины временного ряда [57, 58, 99]. Представленные выше стандарты рекомендуют при отсутствии одинакового нарастания рядов использовать процедуру экспоненциального или полиномиального сглаживания, кубической сплайн-интерполяции. В качестве математических моделей рассматриваются следующие: модель Хольта (аппроксимация полиномами первого порядка, начиная с последнего члена ряда назад), модель Хольта-Уинтерса (в случае наличия сезонных колебаний), модель

Тейла-Вейджа (при наличии аддитивной модели линейного процесса и высокой частоты наблюдений) [99].

При прогнозировании временных рядов можно столкнуться со следующими трудностями: временных рядов может быть большое количество, поведение рядов может описываться разными моделями, модель должна оперативно перестраиваться на следующий момент времени, а также функция потерь может быть неквадратичной.

В геодезической практике наиболее распространенными методами прогнозирования являются [10, 12, 36, 53, 76, 115, 152]:

- метод множественного корреляционного анализа, который дает возможность оценить степень взаимосвязи между переменными и определить влияние одного фактора на изменение другого;

- применение линейной, степенной, полиномиальной различных степеней и логарифмических функций, коэффициенты которых определяются по методу наименьших квадратов, а степень многочлена определяется из условия минимума дисперсии отклонений, измеренных от теоретических значений;

- составление логарифмического ряда (нахождение логарифма функции и вычисление его производных).

Следовательно, для прогнозирования применяются как линейные, так и нелинейные регрессионные модели. Однако не все процессы могут быть описаны линейной функцией, обладающей низкой адаптивной способностью. При этом недостатками нелинейных моделей являются: сложность определения параметров таких моделей, и медленная сходимость вычислительного процесса [115].

Заметный вклад в исследование вопроса прогнозирования деформаций внес Гуляев Ю.П., который рассматривал построение динамических моделей. В статье [35] в качестве варианта создания динамической модели рассматривалось рекуррентное уравнивание первого порядка процесса перемещения, тогда как остаточная часть описывается моделью шумовой компоненты. Также в работе [34] при прогнозировании неравномерной осадки основания уникальных сооружений предложено выделять случайную и детерминированную

составляющие компоненты тренда, при этом случайную составляющую предложено выделять с использованием фильтра Кальмана. Заметим, что решение дифференциальных уравнений при создании прогнозных моделей достаточно трудоемкий процесс.

Прогнозными моделями динамического типа также занимался Мазуров Б.Т. [53]. В частности, в исследовании [53] приведена параметрическая идентификация напряженно-деформированного состояния земной коры в Горном Алтае по результатам ГНСС-наблюдений вплоть до землетрясения 2003 г.

В последнее время перспективным направлением исследования становится применение методов машинного обучения. Однако, отметим, что широкого распространения методы машинного обучения для решения задач геодезического мониторинга не получили, а также отсутствуют исследования по сравнению прогнозных моделей, выполненных на основе этих методов [136].

Целью машинного обучения является создание систем способных обучаться. В качестве преимуществ методов машинного обучения можно выделить [127, 128, 136, 139, 140, 150, 154, 161]:

- единообразие используемой методики, вне зависимости от применяемой модели обучения;
- возможность моделирования линейных и нелинейных процессов;
- высокую скорость получения решения;
- достаточную степень визуализации результатов.

Отметим, что в исследовании [157] рассматривается вопрос применения методов машинного обучения для прогнозирования оседания земной поверхности при прокладке тоннелей методом щитовой проходки. При этом указывается на то, что методы машинного обучения предоставляют возможность нелинейного интеллектуального прогнозирования. Также применение методов машинного обучения для решения задачи прогнозирования притоков воды в условиях сложной инженерно-геологической обстановки рассматривается в статье [147], в которой предложено использование метода опорных векторов.

Таким образом, в результате проведенного анализа, можно сделать вывод о том, что ввиду отсутствия общих требований к созданию прогнозных моделей по геодезическим данным и перспективности направления применения методов машинного обучения, вопрос создания моделей для прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог на основе методов машинного обучения актуален.

1.5.4 Анализ предложений по совершенствованию прогнозной модели

Большинство существующих методов прогнозирования, такие как статистические методы, модели на основе метода опорных векторов и другие традиционные методы машинного обучения не учитывают динамическую изменчивость деформационного процесса и рассматривают эту задачу как проблему статистической подгонки [164]. Это приводит к тому, что прогнозные модели имеют ограниченную точность прогнозирования и не способны выполнять долгосрочное прогнозирование. Кроме того, большинство методов ориентировано на полные данные, а недостающие или поврежденные данные, как правило, не поддерживаются. В качестве решения данного вопроса прогнозирование предлагается выполнять на основе нейронных сетей с глубоким обучением.

В исследовании J. Chen с соавторами [127] разработали метод прогнозирования деформаций земляного полотна высокоскоростной железной дороги на основе применения нейронной сети, содержащей рекуррентные модули сети, способные запоминать значения как на короткие, так и на длинные промежутки времени (LSTM). Прогноз выполнялся по результатам, полученным с помощью регистратора данных морозного пучения.

Применение сети долговременной и кратковременной памяти в отличие от искусственной нейронной сети (ANN) решает проблему обработки данных во временном ряду, так как сеть ANN теряет более раннюю информацию при значительном увеличении длины временного ряда [127, 164].

В то же время, на значение осадки может влиять множество различных факторов, учет которых может способствовать увеличению горизонта прогнозирования и повышению точности прогноза.

В качестве примера приведем исследование [121], в котором был выполнен анализ влияния различных параметров на проходку тоннеля щитовым способом. С целью выбора таких оптимальных параметров и уменьшения размера входных данных проводился корреляционный анализ. Прогнозная модель создавалась по нескольким выбранным ранее факторам на основе сверточной нейронной сети (CNN), методов случайного леса и опорных векторов, а также двунаправленной рекуррентной нейронной сети кратковременной и долговременной памяти (BiLSTM). Затем выполнялось сравнение методов по значениям СКО прогноза и коэффициента детерминации. В результате, наименьшее значение СКО показала гибридная модель на основе CNN и BiLSTM при значении коэффициента детерминации, который составлял 0,85. Также отмечено повышение точности прогноза при учете факторов, влияющих на проходку тоннеля щитовым способом.

При сооружении насыпей на слабых оснований с целью обеспечения качественного и безопасного производства работ по возведению насыпи выполняется геотехнический мониторинг, который может включать в себя измерение порового давления в грунтах основания. В связи с этим, возникает задача определения значимости дополнительного признака при создании нейронной сети для целей прогнозирования осадок и оценка возможности увеличения горизонта прогнозирования.

1.6 Выводы по главе 1

1. При сравнительном анализа ранее выполненных исследований по преобразованию геодезических высот, полученных с помощью ГНСС-оборудования, в систему нормальных высот на основе построения локальной модели квазигеоида, были сделаны следующие выводы:

– в подавляющем большинстве исследований решают задачу построения локальных моделей аномалий высот на площадной объект: город или регион, однако отсутствуют исследования построения таких моделей для линейных сооружений;

– не представлены рекомендации о необходимом количестве геодезических пунктов, число которых являлось бы достаточным для обеспечения заданной точности;

– не представлены указания о предпочтительном методе интерполяции при создании таких моделей.

Таким образом, выполненный анализ выявил необходимость разработки методики построения локальной поверхности квазигеоида, которая позволит установить последовательность шагов проектирования числа исходных пунктов, дать рекомендации об оптимальном интерполяционном методе и оценить точность выполненного моделирования.

2. В нормативных документах, регламентирующих измерения деформаций земляного полотна, даны рекомендации только по применению принципов инклинометрии. Методика проведения измерений геометрическим или тригонометрическим нивелированием не изучена.

3. Выявлена необходимость проработки вопроса комплексного подхода к проведению геодезического мониторинга с использованием комплексной геомеханической модели грунта основания, которая позволит разработать схему деформационной сети соразмерно напряженно-деформированному состоянию основания, получить предварительный прогноз протекания осадки и ее максимальные значения.

4. В нормативных документах отсутствуют общие требования к созданию прогнозных моделей по геодезическим и данным.

5. Выполнен сравнительный анализ методов прогнозирования деформаций, который показал необходимость применения методов машинного обучения для прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог. При этом методы машинного обучения обладают следующими преимуществами:

– единообразии используемой методики вне зависимости от применяемой модели обучения;

– возможностью моделирования линейных и нелинейных процессов;

– высокой скоростью получения решения;

– достаточной степенью визуализации результатов.

6. Обоснована перспективность направления исследования по выполнению прогнозирования на основе нейронных сетей с использованием дополнительных параметров.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ОСАДОК ОСНОВАНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

2.1 Постановка задачи

Важным аспектом обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог является геодезическое сопровождение, при котором выполняются инженерно-геодезические изыскания, разбивочные работы, исполнительные съемки, а на стадии эксплуатации, кроме этого, и мониторинг деформаций объектов. При этом геодезическое обеспечение зачастую выполняется с применением ГНСС-технологий, что значительно ускоряет процесс измерений. При этом необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать требования к точности перехода геодезических высот в систему нормальных высот;

2. Разработать методику преобразования геодезических высот в систему нормальных высот путем построения локальной модели квазигеоида, что требует выполнения следующих этапов:

– выполнить создание локальной модели квазигеоида для линейного объекта с уточнением и без уточнения глобальной модели геоида с помощью различных интерполяционных методов;

– обосновать выбор интерполяционного метода;

– предложить алгоритм оценки точности создания локальной модели квазигеоида;

– обосновать схему определения необходимого и достаточного количества пунктов для создания модели заданной точности.

Вместе с тем, в период строительства автодорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей важным этапом является определение осадок оснований автомобильных дорог и выполнение их

прогнозирования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать требования к точности определения осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах, а также при высоте насыпи более 12 м.

2. Разработать методику определения осадок оснований автомобильных дорог на основе геометрического и тригонометрического нивелирования, а именно:

– обосновать создание высотной опорной сети на основе имеющихся пунктов ГРО;

– осуществить уравнивание и оценку точности высотной опорной сети;

– выполнить определение высот деформационных марок;

– предложить и теоретически обосновать использование комплексной геомеханической модели грунта для создания схемы расположения осадочных марок соразмерно напряженно-деформированному состоянию;

– выполнить уравнивание и оценку точности определения высот деформационных марок;

3. Разработать прогнозную модель по геодезическим и иным данным на основе методов машинного обучения и обосновать выбор метода создания модели.

4. Разработать прогнозную модель по данным геотехнического мониторинга на основе нейронной сети.

2.2 Обоснование требований перехода от геодезических высот к системе нормальных высот при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог

Как было отмечено в главе 1, пункт 1.2 если поставить задачу получения нормальных высот спутниковым методом при использовании локальных моделей квазигеоида, то важно, чтобы эти модели обеспечивали точность определения высот не ниже нивелирования III класса.

В целях контроля точности выполненного моделирования часть исходных пунктов предлагается использовать как контрольные. При этом такие пункты не

участвуют в процессе создания модели. В результате, для всех контрольных пунктов необходимо вычислить разности нормальной высоты, полученной с помощью модели аномалии высот, и значения нормальной высоты, принятого за эталон. Отметим, что расположение исходных пунктов не всегда равномерно, вследствие чего, для выполнения сравнения необходимо рассчитать ожидаемые СКО определения высоты для нивелирования III класса через допустимые невязки f_H хода, которые определяются по формуле 2.1:

$$f_H = 10 \text{ мм} \sqrt{L, \text{км}}, \quad (2.1)$$

где $L_{км}$ – расстояние до ближайшего исходного пункта в км. Тогда, принимая доверительную вероятность равной 0,955 (при нормированном коэффициенте, зависящем от вида распределения и уровня доверительной вероятности $t = 2$), ожидаемые СКО определения высот пунктов m_H можно вычислить по формуле 2.2:

$$m_H = 5 \text{ мм} \sqrt{L, \text{км}}. \quad (2.2)$$

Для решения поставленных в пункте 2.1 задач необходимо разработать методику, которая бы объединяла все элементы, необходимые для выполнения преобразования геодезических высот в систему нормальных высот.

2.3 Разработка методики преобразования геодезических высот в систему нормальных высот

Определение нормальной высоты по данным ГНСС-измерений возможно и с определенной степенью надежности согласуется с данными, полученными с помощью геометрического нивелирования. При этом целесообразность такого подхода заключается в том, что он может быть применен в случае высотного обоснования строительства в сложных условиях, в том числе при наличии различных препятствий. Кроме того, при наличии локальной модели квазигеоида на объект строительства возможно получение нормальных высот в любой точке объекта по результатам ГНСС-определений и без проведения нивелирных работ. Также отметим, что важно минимизировать нивелирные работы и на этапе

создания локальной модели, при этом обеспечив необходимую точность определения высот.

Для создания локальной модели квазигеоида необходимы исходные пункты. Под исходными будем понимать пункты, имеющие геодезические и нормальные высоты.

Рассмотрим взаимосвязь между геодезической H , ортометрической H^s и нормальной H^γ высотами (рисунок 2.1), которая выражается следующей формулой 2.3 [19, 97, 111, 118, 124, 131]:

$$H = H^s + \zeta^s = H^\gamma + \zeta^\gamma, \quad (2.3)$$

где ζ^s – высота геоида над эллипсоидом;

ζ^γ – высота квазигеоида над эллипсоидом.

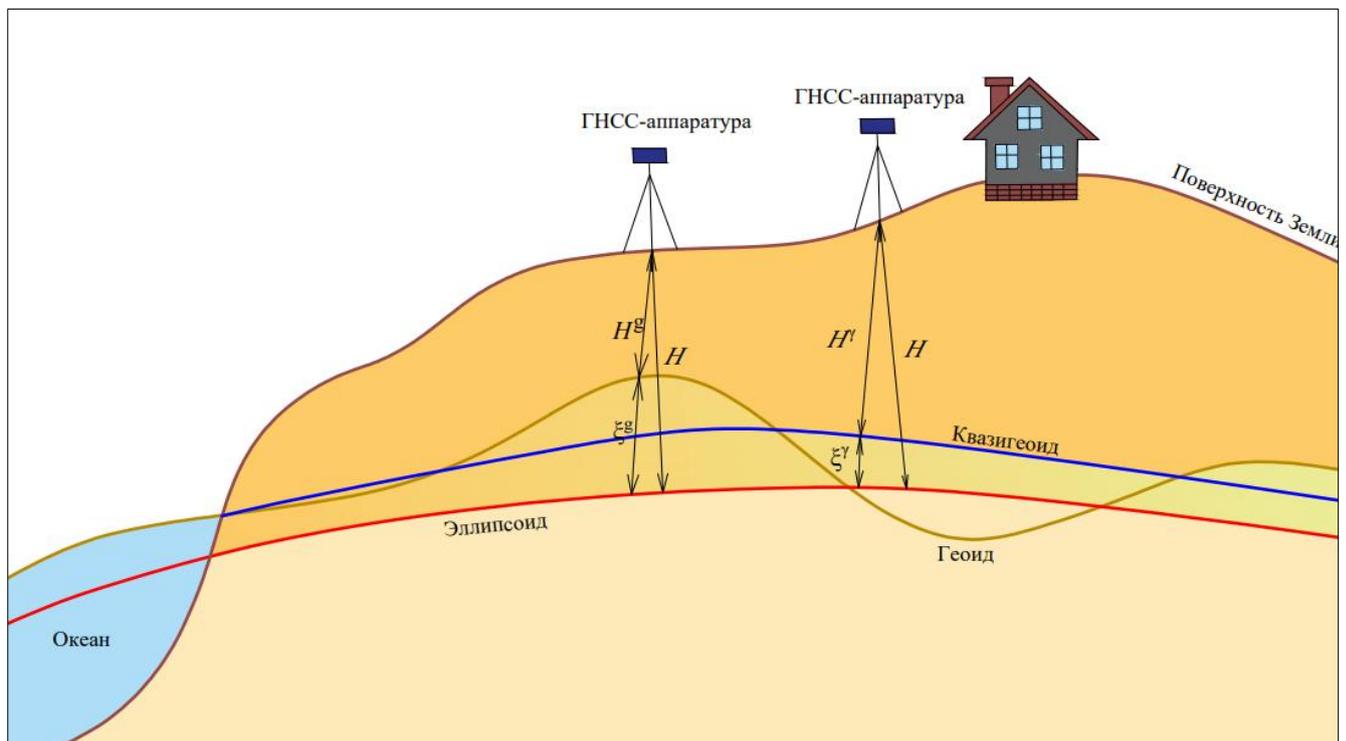


Рисунок 2.1 – Связь геодезической, ортометрической и нормальной высот

Тогда, нормальная высота может быть определена исходя из выражения 2.4:

$$H^\gamma = H - \zeta. \quad (2.4)$$

Таким образом, для определения нормальной высоты по данным ГНСС-определений необходимо вычислить значения аномалии высот исходных пунктов,

создать поверхность на основе интерполяционных методов и определить аномалии высот в неизвестных точках.

Как было отмечено в первой главе, построение модели локального квазигеоида возможно и с учетом глобальной модели геоида, например, EGM2008, которая, по сравнению с аналогами, обладает большей степенью детализации [68, 96, 114].

2.3.1 Общее описание методики создания локальной модели квазигеоида

Выделим следующие этапы создания модели квазигеоида с применением программного обеспечения Golden Software Surfer:

1. Импорт исходных данных в программный продукт (набора неравномерно расположенных точек).
2. Создание регулярной координатной сетки и выбор оптимального расстояния между узлами сетки.
3. Применение выбранных методов пространственной интерполяции: настройка параметров построения поверхности, в том числе выбор функции, минимальной пространственной области, на которой будет произведена интерполяция и др.
4. Построение поверхности и выполнение оценки точности интерполяции.
5. Расчет СКО определения высот с использованием контрольных точек.
6. Анализ точности построения моделей различными методами пространственной интерполяции.
7. Выбор методов пространственной интерполяции на основе выполненного анализа их точности для дальнейшего использования при построении локальных моделей квазигеоида для аналогичных участков.

8. Определение на основе выбранного интерполяционного метода за счет увеличения расстояния между исходными пунктами (исключения их из модели и использования в качестве контрольных) оптимального расстояния между исходными пунктами, обеспечивающего точность определения нормальных высот для заданного класса нивелирования.

Общий подход к построению локальной модели квазигеоида по волновому методу

Пусть в районе работ имеются пункты с известными геодезическими и нормальными высотами. Построение поверхности предлагается выполнять по значениям аномалий высот. Как было упомянуто выше, волновой метод не предполагает уточнения глобальной модели геоида. При этом применение такого метода для площадного объекта обосновано в случае наличие большого числа исходных пунктов, однако на небольшой территории этот метод точнее отражает модель аномалии высот. Определение необходимого числа пунктов предлагается выполнить на основе сравнения СКО определения нормальных высот пунктов для заданного класса геометрического нивелирования и СКО определения нормальных высот по контрольным точкам, которая вычисляется по формуле Бесселя 2.5:

$$m_H = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n-1}}, \quad (2.5)$$

где Δ – разность между нормальной высотой, полученной по модели, и известной нормальной высотой;

n – количество контрольных точек.

Таким образом, предлагается варьировать количество пунктов, уменьшая их количество на основании точности полученной модели и СКО определения высот по контрольным точкам.

Стоит отметить, что перед этапом моделирования предлагается выполнить пересчет геодезических координат точек в плоские прямоугольные с учетом известных формул преобразования. На рисунке 2.2 представлена общая

последовательность преобразования геодезических высот в систему нормальных высот на основе создания локальной модели квазигеоида по волновому методу, которая включает:

- получение набора исходных пунктов с известными геодезическими и нормальными высотами;
- вычисление значений аномалий высот для этих пунктов;
- создание поверхности аномалий высот различными интерполяционными методами;
- выбор метода на основе оценки точности интерполяции и СКО определения высоты по контрольным точкам;
- автоматический ввод поправок в геодезические высоты в любых точках, принадлежащих созданной модели.

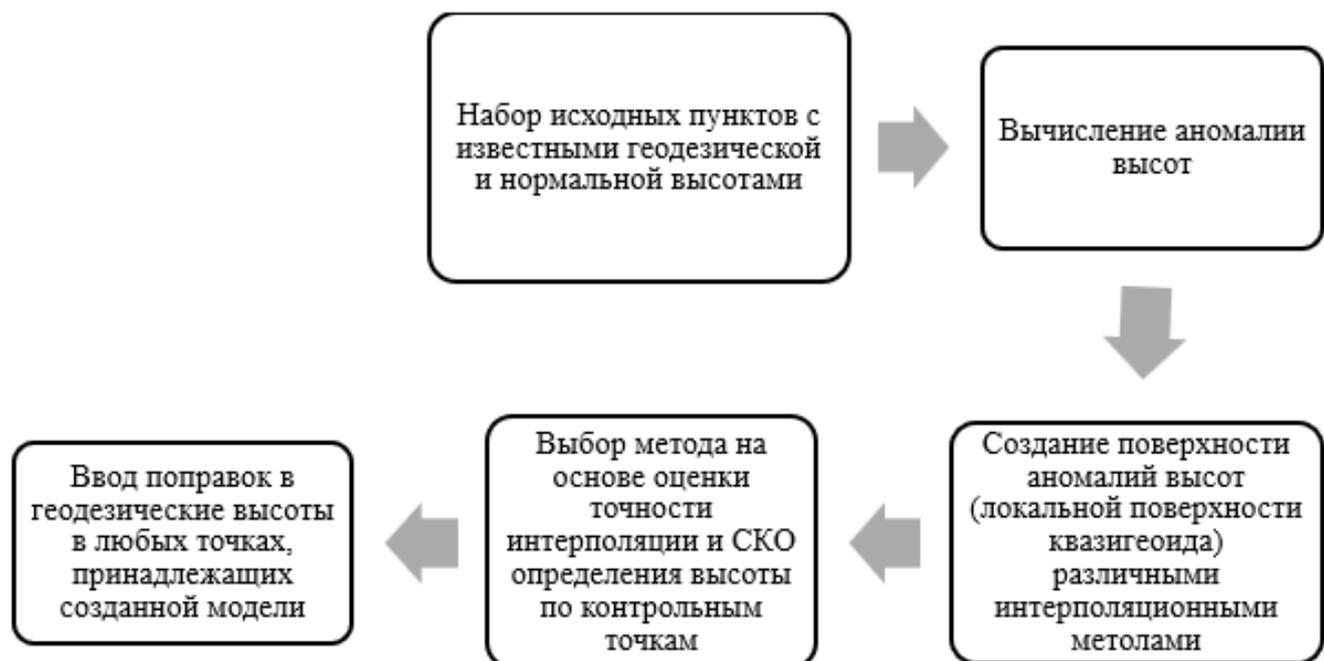


Рисунок 2.2 – Общая последовательность создания локальной модели квазигеоида по волновому методу

Общий подход к построению локальной модели квазигеоида по остаточному методу

Построение локальной модели остаточным методом предполагает уточнение глобальной модели геоида. При этом метод не требует высокой плотности исходных пунктов. Отметим, что в настоящее время разработано

большое количество различных глобальных моделей геоида, однако широкое распространение, ввиду наиболее высокой степени разложения геопотенциала, получила EGM2008 [68, 96, 111, 113].

Пусть в районе работ имеются исходные пункты. Тогда, для построения локальной модели необходимо вычислить вектор отклонений $\Delta\xi$ по формуле 2.6:

$$\Delta\xi_i = H_i - H_i^\gamma - \xi_i^{EGM2008} = \xi_i - \xi_i^{EGM2008}, \quad (2.6)$$

где $\Delta\xi_i$ – вектор отклонений;

H_i – геодезическая высота i -й точки;

H_i^γ – нормальная высота i -й точки.

На рисунке 2.3 отображена общая последовательность преобразования геодезических высот в систему нормальных высот на основе создания локальной поверхности квазигеоида по остаточному методу, которая включает выполнение следующих этапов:

- получение набора исходных пунктов с известными геодезическими, нормальными высотами и аномалиями высот, определенных по глобальной модели геоида EGM2008;

- вычисление вектора отклонений $\Delta\xi_i$ по формуле 2.6;

- создание локальной модели квазигеоида различными интерполяционными методами;

- выбор метода на основе оценки точности интерполяции и расчета СКО определения высоты по контрольным точкам;

- автоматический ввод поправок в геодезические высоты в любых точках, принадлежащих построенной модели.

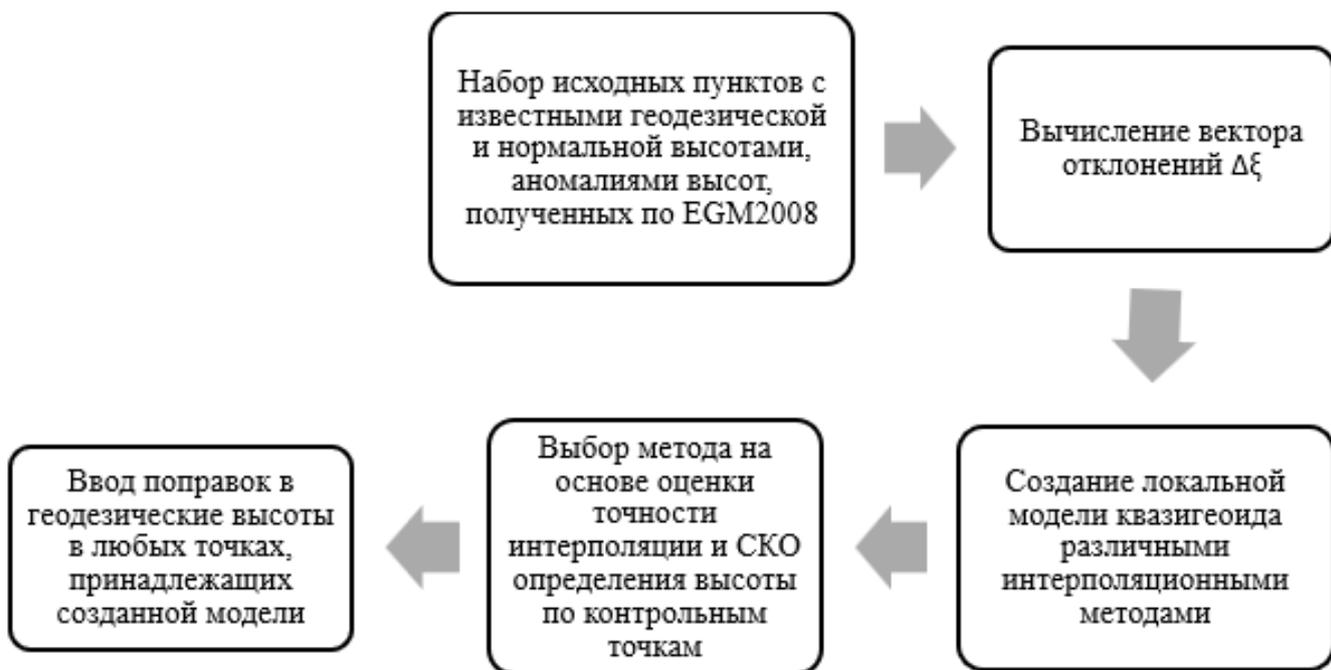


Рисунок 2.3 – Общая последовательность создания локальной поверхности квазигеоида по остаточному методу

Рассмотрим вопрос проектирования числа совмещенных пунктов на основе остаточного метода. Как правило, при выполнении спутниковых определений в районе работ должно быть не менее трех пунктов с известными нормальными высотами. Тогда, определив аномалию высот по EGM2008, вычислим отклонение нормальной высоты $\delta_{i,k}$ для двух точек по формуле 2.7:

$$\delta_{i,k} = \Delta H_{i,k} - \Delta H_{i,k}^{\gamma} - \Delta \zeta_{i,k}^{EGM2008}. \quad (2.7)$$

СКО определения высоты на 1 км хода с учетом веса P определим из выражения 2.8:

$$m_H = \sqrt{\frac{[P_{i,k} \delta_{i,k} \delta_{i,k}]}{n}}, \quad (2.8)$$

где $P_{i,k}$ рассчитывается по формуле 1.5;

n – количество пар точек, выбранных для исследования.

Тогда для проектирования числа исходных пунктов на основе глобальной модели геоида EGM2008 необходимо выполнить следующие этапы:

1. Выбрать в районе работ пункты с известными нормальными высотами.

2. Выполнить определение соответствующих им высот геоида с помощью глобальной модели EGM2008.

3. Вычислить разность высот и построить локальную модель на основе полученной разности.

4. Определить параметры преобразования высот и ввести переменные поправки.

5. Выполнить сравнение ожидаемой СКО определения высот пунктов для заданного класса геометрического нивелирования с СКО определения нормальных высот по контрольным точкам.

2.3.2 Моделирование локальной модели квазигеоида на основе интерполяционных методов

Моделирование локальной модели квазигеоида как по волновому, так и по остаточному методам предполагает использование различных интерполяционных методов. Рассмотрим эти методы, реализованные в программном продукте Golden Software Surfer, который применяется для моделирования и анализа поверхностей, а также позволяет оценивать точность полученной модели. Среди интерполяционных методов выделим следующие:

- триангуляция с линейной интерполяцией (Triangulation with Linear Interpolation);
- метод минимальной кривизны (Minimum Curvature);
- метод ближайшего соседа (Nearest Neighbor);
- метод естественной окрестности (Natural Neighbor);
- радиальные базисные функции (Radial Basis Function);
- кригинг (Kriging).

Triangulation with Linear Interpolation. Метод триангуляции с линейной интерполяцией использует оптимальную триангуляцию Делоне.

Пусть интерполируемая точка попала в треугольник, образованный выборочными точками с координатами (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) и (X_3, Y_3) . Тогда в

трехмерном (X, Y, Z) пространстве строится плоскость, проходящая через точки с координатами $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$ и (X_3, Y_3, Z_3) . Уравнение плоскости имеет вид [77, 123, 142, 165] (2.9):

$$a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z + d = 0, \quad (2.9)$$

где коэффициенты, рассчитываются по формулам 2.10-2.13:

$$a = Y_1(Z_2 - Z_3) + Y_2(Z_3 - Z_1) + Y_3(Z_1 - Z_2), \quad (2.10)$$

$$b = Z_1(X_2 - X_3) + Z_2(X_3 - X_1) + Z_3(X_1 - X_2), \quad (2.11)$$

$$c = X_1(Y_2 - Y_3) + X_2(Y_3 - Y_1) + X_3(Y_1 - Y_2), \quad (2.12)$$

$$d = X_1(Y_2Z_3 - Y_3Z_2) + X_2(Y_3Z_1 - Y_1Z_3) + X_3(Y_1Z_2 - Y_2Z_1). \quad (2.13)$$

Оценка переменной \hat{Z}_0 в точке (X, Y) осуществляется по формуле 2.14 [77, 123, 142, 165]:

$$\hat{Z}_0 = \frac{-a \cdot X - b \cdot Y - d}{c}. \quad (2.14)$$

Minimum Curvature. Метод минимальной кривизны широко используется в науках о Земле. При этом построенная поверхность представляется как тонкая упругая пленка. Отметим, что интерполяционная поверхность может проходить вблизи исходных данных, но не включать их.

Сначала по методу наименьших квадратов (МНК) по всем исходным данным строится интерполяционная поверхность $Z(X, Y)$ по формуле 2.15 [77, 123, 142, 165]:

$$Z(X, Y) = a + b \cdot X + c \cdot Y, \quad (2.15)$$

а разности e_i в точках выборки между результатами интерполяции и исходными данными вычисляются по формуле 2.16 [77, 123, 142, 165]:

$$e_i = (a + b \cdot X_i + c \cdot Y_i) - Z_i. \quad (2.16)$$

Далее выполняется интерполяция разностей в узлах сетки. Метод требует решения модифицированного дифференциального уравнения, которое принимает вид (2.17) [77, 123, 142, 165]:

$$(1 - T_i) \nabla^2 (\nabla^2 e) - (T_i) \nabla^2 e = 0, \quad (2.17)$$

где T_i – параметр «внутреннее натяжение».

При этом граничные условия вычисляются, исходя из выражения 2.18 [77, 123, 142, 165]:

$$(1 - T_b) \frac{\partial^2 e}{\partial n^2} + (T_b) \frac{\partial e}{\partial n} = 0, \frac{\partial(\nabla^2 e)}{\partial n} = 0, \frac{\partial^2 e}{\partial X \partial Y} = 0, \quad (2.18)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа;

n – нормаль к границе;

T_b – параметр «натяжение на границе».

Таким образом, результирующая оценка \hat{Z} выполняется по формуле 2.19:

$$\hat{Z}(X, Y) = a + b \cdot X + c \cdot Y + \hat{e}(X, Y). \quad (2.19)$$

С помощью метода минимальной кривизны создание поверхности осуществлялось с изменением двух параметров: степени прогиба и величины прогиба на краях, чем больше значение данных параметров, тем меньше изгиб.

Nearest Neighbor. В методе ближайшего соседа при реализации интерполяционной поверхности каждому узлу сетки присваивается значение ближайшей точки. Этот метод особенно эффективен, когда точки, по которым выполняется построение, расположены равномерно.

В качестве оценки переменной в некоторой точке исследуемой области берется значение, которое имеет ближайшая выборочная точка по формуле 2.20 [77, 123, 142, 165]:

$$\hat{Z}_0 = Z_i, \quad (2.20)$$

где Z_i – значение в выборочной точке, расположенной ближе других к местоположению (X_0, Y_0) .

При построении моделей предлагается использовать различную ориентацию области поиска значений, чтобы определить влияние изменения области на точность полученной модели.

Natural Neighbor. Метод естественной окрестности интерполирует значения сетки путем взвешивания соседних точек данных на основе пропорциональных площадей в соответствии с выражением 2.21 [77, 123, 142, 165]:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^N w_{i0} Z_i, \quad (2.21)$$

где w_{i0} – вес i -й точки (вычисляется при помощи диаграмм Г. Вороного).

Его основное свойство – интерполированные высоты гарантированно будут в пределах диапазона исходных значений [77, 123, 142, 165].

Radial basis function. Радиальные базисные функции являются набором методов точной интерполяции. Это означает, что поверхность проходит через исходные значения.

При этом оценка переменной Z в произвольной точке исследуемой области выполняется по формуле 2.22 [77, 123, 142, 165]:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i B(d_{i0}), \quad (2.22)$$

где d_{i0} – расстояние между точкой, где вычисляется оценка, и i -ой точкой измерения;

λ_i – коэффициент i -ой выборочной точки;

$B(\)$ – радиальная базисная функция, аргументом которой является расстояние d_{i0} .

Базисная функция является ядерной функцией, которая определяет веса для интерполируемых точек. В качестве базисной функции предлагается использовать кубический сплайн, который определяется по формуле 2.23 [77, 123, 142, 165]:

$$B(d) = (d^2 + R^2)^{3/2}, \quad (2.23)$$

где d – расстояние от точки интерполяции до исходной точки, R^2 – параметр сглаживания.

Kriging. В основе метода кригинг заложены статистические модели с анализом автокорреляции, что позволяет строить не только поверхность, но и выводиться прогнозируемые значения с оценкой их точности. В качестве фактора,

влияющего на корреляцию, в методе используется расстояние между исходными данными.

Определение результирующих значений при использовании кригинга выполняется с помощью математических функций, вычисленных для определенного количества точек или всех точек в пределах заданного радиуса.

Кригинг-оценка значения пространственной переменной Z в неизвестной точке вычисляется по формуле 2.24 [77, 123, 142, 165]:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_i, \quad (2.24)$$

где n весов λ_i являются решением системы кригинга, которая принимает вид (2.25):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i C_{ij} = C_{oj}, j = 1, \dots, n. \quad (2.25)$$

На практике для построения цифровых моделей используется, как правило метод триангуляции с линейной интерполяцией, а другие рассмотренные методы пространственной интерполяции применяются реже ввиду трудоемкой аналитической работы с поверхностью для определения мест сглаживания, набора точек или параметров сглаживания. Однако построенная данными методами поверхность может быть ближе к фактической.

2.3.3 Оценка точности выполняемого моделирования

После создания локальной модели квазигеоида необходимо выполнить статистический анализ отклонений исходных точечных значений от результирующей поверхности.

Для выполнения оценки качества построения локальных моделей квазигеоида предлагается выполнить расчет следующих параметров:

- минимум и максимум (наименьшая и наибольшая разность исходных и полученных по интерполированной модели значений аномалии высот);
- среднее значение разности между исходными и интерполированными значениями аномалий высот;

- диапазон (разность между максимальным и минимальными значениями);
- асимметрия (числовое отображение степени отклонения графика распределения показателей от симметричного распределения);
- эксцесс (показатель остроты пика графика распределения);
- СКО интерполяции полученной модели;
- СКО определения высот по контрольным точкам.

Таким образом, в результате выполнения оценки качества построения локальной модели квазигеоида различными методами предлагается выбрать один интерполяционный метод, на основе которого провести расчет необходимого и достаточного количества пунктов.

2.4 Обоснование требований к точности определения осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей

Для выполнения расчета точности определения высот осадочных марок при определении вертикальных перемещений основания автомобильных дорог в качестве исходной величины примем величину интенсивности осадки (скорость протекания деформационного процесса). В соответствии со сводом правил [86] за завершение интенсивной части осадки при дорожных одеждах капитального типа принимается момент достижения 90%-ной консолидации основания или интенсивности осадки, не превышающей 2,0 см/год, при облегченном типе – 80%-ной консолидации основания и величине осадки, не превосходящей 5,0 см/год соответственно. Отметим, что, как и в случае с контролем осадок насыпи железной дороги, осадки основания автомобильной дороги определяются с повышенной точностью.

Предположим, что в начальный период осадка основания будет носить равномерный характер, при этом наблюдения в начальный период будут осуществляться ежемесячно. В этом случае, допустимое значение осадки при дорожных одеждах капитального типа примет значение 1,7 мм и 4,2 мм для облегченного типа. Для назначения точности измерений будем исходить из

величины v предельной скорости деформации, так как степень деформационного процесса характеризуется величиной или скоростью деформационного процесса. Предельная скорость деформации можно выразить следующим выражением 2.26 [41, 93]:

$$v = \Phi(T_i) - \Phi(T_{i-1}) \geq tm_v, \quad (2.26)$$

где $\Phi(T_i)$ – величина деформации на момент времени T ;

i – порядковый номер предыдущего и последующего циклов наблюдений;

t – нормированный коэффициент, зависящий от вида распределения и уровня доверительной вероятности;

m_v – СКО определения скорости осадки.

Заметим, что попадание в доверительный интервал, который характеризует произведение tm_v , возможно с принятой вероятностью. Тогда, принимая доверительную вероятность равной 0,988 ($t = 2,5$), вычислим по формуле (2.24) СКО определения скорости осадки, которая составит $m_v = 0,7$ мм при предельной скорости деформации $v = 1,7$ мм/мес.

Заметим, что необходимо выполнять вычисление разности высот H в разных циклах, в этом случае СКО определения высот деформационных марок m_H в $\sqrt{2}$ раз меньше СКО определения скорости осадки m_v . Выразим это через формулу 2.27:

$$m_H = \frac{m_v}{\sqrt{2}}. \quad (2.27)$$

Тогда, в соответствии с формулой 2.27, при $t = 2,5$ высоты деформационных марок необходимо определять с $m_H = 0,5$ мм.

Представим СКО определения высот осадочных марок при различном нормированном коэффициенте t в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – СКО определения высот осадочных марок при различном нормированном коэффициенте t

t	Доверительная вероятность β	при $v = 1,7$ мм/мес.		при $v = 4,2$ мм/мес.	
		m_v , мм	m_H , мм	m_v , мм	m_H , мм
1,6	0,890	1,1	0,8	2,6	1,9
2,0	0,955	0,8	0,6	2,1	1,5
2,5	0,988	0,7	0,5	1,7	1,2
3,0	0,997	0,6	0,4	1,4	1,0

В результате проведенного анализа, получены значения СКО определения высот осадочных марок при различном уровне значимости. Отметим, что при нормированном коэффициенте $t = 2,5$ высоты деформационных марок необходимо определять с $m_H = 0,5$ мм.

2.5 Разработка методики определения осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах на основе геометрического нивелирования

Как было отмечено в главе 1, пункт 1.3 для определения осадок основания автомобильных дорог требуется создать высотную опорную сеть и деформационную высотную сеть. Первая служит в качестве опорных реперов для развития деформационной высотной сети.

2.5.1 Создание высотной опорной сети

Рассмотрим процесс создания высотной опорной сети. Отметим, что СКО определения высоты деформационной марки выражается в соответствии с формулой 2.28:

$$m_H = \sqrt{m_{\text{исх}}^2 + m_{\text{изм}}^2}, \quad (2.28)$$

где $m_{\text{исх}}$ – СКО определения высоты исходного пункта опорной сети;

$m_{\text{изм}}$ – СКО измеренного превышения деформационной марки относительно исходного пункта.

Далее рассмотрим принципы равного и ничтожного влияния отдельных источников погрешностей. В соответствии с принципом ничтожного влияния $m_{\text{исх}}$ не должна превышать $m_{\text{изм}}$ в три раза [115]. Вследствие этого, СКО определения высоты самого слабого пункта сети при $t = 2,5$ и $\nu = 1,7$ мм/мес. не должна превышать 0,2 мм. Согласно принципу равного влияния значение СКО определения высоты самого слабого пункта опорной сети не должно превосходить 0,4 мм при аналогичных входных данных.

В целях сокращения материальных затрат и времени на проведение работ в качестве опорной сети для определения деформаций предлагается использовать существующие пункты ГРО. Так как закладка пунктов проводится на предварительном этапе, то конструкцию тех пунктов, которые предполагается использовать в качестве исходных для определения вертикальных смещений, предлагается усилить (реперы глубокого заложения). Превышения между пунктами необходимо определить с точностью, рассчитанной выше.

В соответствии с государственным стандартом [31] пункты ГРО рекомендуется располагать через 350 м, а максимальное расстояние между смежными пунктами ГРО составляет 500 м. Исходя из этого, предположим, что длина хода будет соответствовать максимально допустимому расстоянию между смежными пунктами ГРО. Итак, принимая в качестве исходного один из пунктов ГРО, выполним вычисление возможной СКО определения высоты второго пункта.

Вычислим ее косвенно по допустимым невязкам, которые регламентированы Инструкцией [43]. В таблице 2.2 представлен расчет возможной СКО определения высоты второго пункта m_0 при коэффициенте перехода t от СКО к предельной ошибке равном 2,5.

Таблица 2.2 – Расчет СКО определения высоты второго пункта ГРО в соответствии с Инструкцией [43] при расстоянии между пунктами 500 м

Класс нивелирования	Допустимая невязка, мм	m_0 , мм
I	$3\sqrt{L, \text{км}}$	0,8
II	$5\sqrt{L, \text{км}}$	1,4
III	$10\sqrt{L, \text{км}}$	2,8
IV	$20\sqrt{L, \text{км}}$	5,6

Таким образом, ни один класс государственного нивелирования не удовлетворяет требованиям к определению высоты опорного пункта.

В целях определения методики нивелирования обратимся к Руководству [83], согласно которому определение осадок рекомендуется выполнять, в том числе, геометрическим нивелированием I, II, III класса. Для того чтобы исключить неоднозначность классы данного нивелирования назовем разрядами.

Повторим этап расчета возможной СКО определения высоты второго пункта ГРО в соответствии с указанным выше Руководством [83]. Результаты расчета отображены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Расчет СКО определения высоты второго пункта ГРО в соответствии с Руководством [83]

Разряд нивелирования	Длина визирного луча не более, м	Число n штативов в 1 км	Допустимая невязка, мм	m_0 , мм
I	25	20	$0,15\sqrt{n}$	0,2
II	30	17	$0,5\sqrt{n}$	0,6
III	40	12	$1,5\sqrt{n}$	1,6

В результате проведенного сравнения возможной СКО определения высоты второго пункта m_0 и m_H , приходим к выводу, что для определения высот пунктов опорной сети необходимо выполнить нивелирование I разряда.

Уравнивание высотной опорной сети

Уравнивание можно выполнить, используя различные способы, в том числе, коррелятный и параметрический. Ввиду сложности составления условных уравнений для больших сетей, коррелятный способ не используется повсеместно, однако при малом количестве избыточных измерений он эффективен [14].

В рассматриваемом случае будем считать, что измерены превышения «прямо» ($h_{\text{пр}}$) и «обратно» ($h_{\text{обр}}$) между двумя пунктами ГРО и необходимо определить высоту второго пункта.

Тогда исходное условное уравнение связи можно представить в виде формулы 2.29:

$$\varphi = h_{\text{пр}} + h_{\text{обр}} = 0, \quad (2.29)$$

где φ – функция, выражающая условное уравнение связи. Связь между измеренными превышениями выразим следующим равенством 2.30:

$$h_{\text{пр.изм}} + h_{\text{обр.изм}} = f_h, \quad (2.30)$$

где $h_{\text{пр.изм}}$ – измеренное превышение «прямо»;

$h_{\text{обр.изм}}$ – измеренное превышение «обратно»;

f_h – невязка хода.

На следующем этапе найдем поправки v_i к результатам измерений h_i и составим условные уравнения поправок по формуле 2.31:

$$b_{11}v_1 + b_{12}v_2 + f_h = 0, \quad (2.31)$$

где b_{1i} – коэффициенты условных уравнений, определяемые по выражению 2.32:

$$b_{1i} = \frac{\partial \varphi}{\partial h_i}. \quad (2.32)$$

В результате, с учетом (2.30) матрица коэффициентов условных уравнений поправок B примет вид (2.33):

$$B = [1 \quad 1]. \quad (2.33)$$

В матричном виде система уравнений связи (2.32) представлена выражением 2.34:

$$BV + f_h = 0, \quad (2.34)$$

где V – вектор поправок к результатам измерений. Чтобы найти поправки к результатам измерений, необходимо перейти к нормальным уравнениям коррелат (2.35):

$$NK + f_h = 0, \quad (2.35)$$

где N – матрица коэффициентов нормальных уравнений;

K – вектор коррелат. Отметим, что матрица коэффициентов нормальных уравнений N при равноточных измерениях вычисляется по формуле 2.36:

$$N = BB^T, \quad (2.36)$$

где B^T – транспонированная матрица B .

Тогда, в рассматриваемом случае получим нормальное уравнение 2.37:

$$2K + f_h = 0. \quad (2.37)$$

Вектор поправок V будет равен (2.38):

$$V = B^T K. \quad (2.38)$$

Выразив из (2.37) вектор коррелат K и подставив его в (2.38), найдем значения поправок к результатам измерений согласно выражению 2.39:

$$V = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \left(-\frac{f_h}{2} \right) = \begin{bmatrix} -\frac{f_h}{2} \\ -\frac{f_h}{2} \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Таким образом, в результате выполненных преобразований получим, что в измеренные прямое и обратное превышения необходимо ввести поправку $\left(-\frac{f_h}{2} \right)$.

Отметим, что необходимо выполнять контроль стабильности опорной высотной геодезической сети. Оценка устойчивости пунктов высотной опорной сети предлагается выполнять способом А. Костехеля. По результатам анализа предлагается выбрать наиболее стабильный репер для каждого цикла измерений, относительно которого выполнить уравнивание.

2.5.2 Определение высот деформационных марок геометрическим нивелированием

Отметим, что конструкция и места установки осадочных марок в контрольном поперечнике и расстояние между контрольными поперечниками регламентированы требованиями нормативного документа [70]. Предлагаемая конструкция осадочной марки представлена на рисунке 2.4. Однако, на наш взгляд, представленная конструкция имеет недостатки: под весом насыпного грунта металлическая пластина может вдавливаться в слабое основание, что покажет оседание основания. Также наращивание марки в процессе отсыпки земляного полотна может оказать влияние на сохранность высотной отметки.

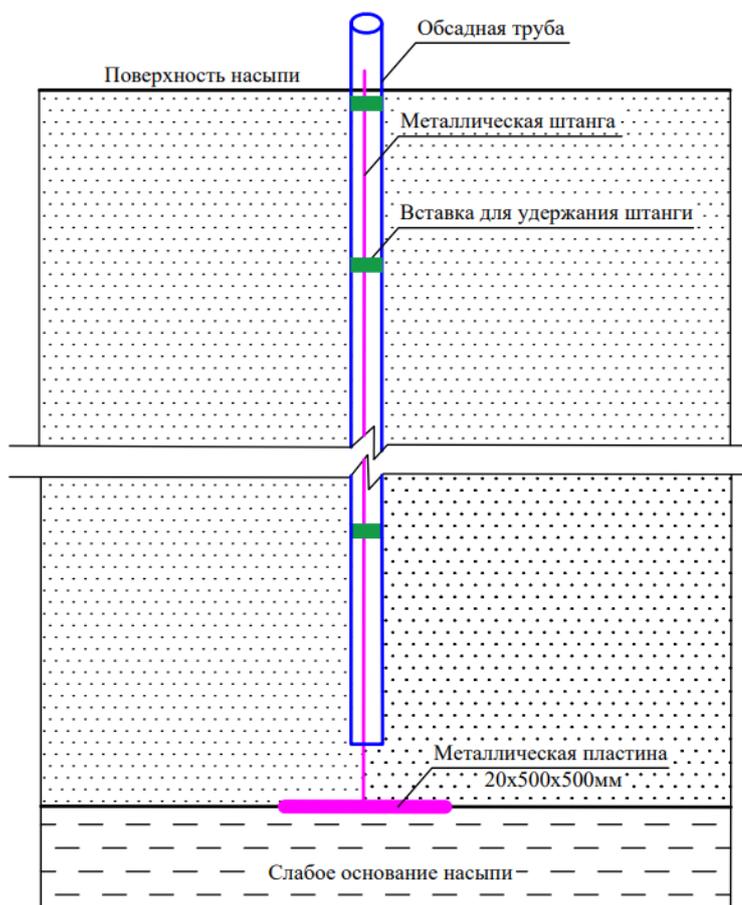


Рисунок 2.4 – Конструкция осадочной марки

Дополнительно указано, что осадочные марки устанавливаются каждые 50 м на всю длину участка со слабым основанием. Кроме того, для снятия одного поперечника предполагается установка трех таких марок: две по бровкам насыпи, а третья на оси автомобильной дороги.

Для того, чтобы определить высоты осадочных марок проложим ход между опорными пунктами с помощью геометрического нивелирования, привязываясь к двум пунктам ГРО. Учитывая рассмотренные выше требования, представим на рисунке 2.5 схему расположения деформационных марок.

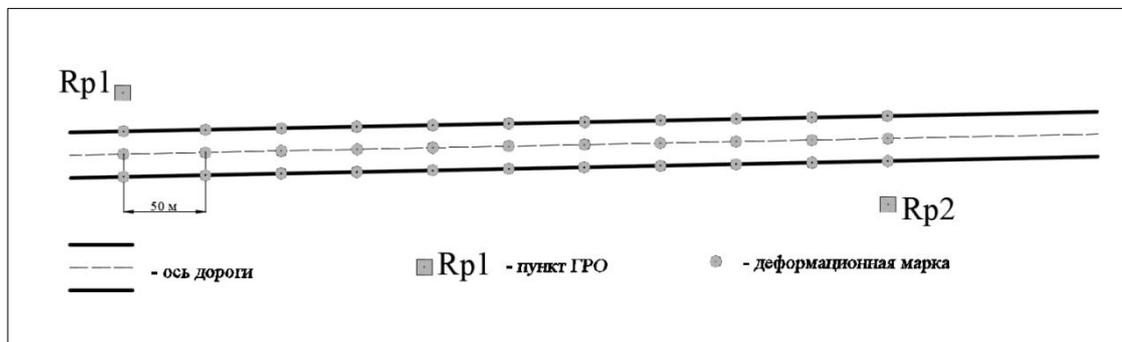


Рисунок 2.5 – Схема расположения деформационных марок

Определение превышений предлагается выполнять нивелиром с СКО определения превышения на 1 км двойного хода равной 0,3 мм. В качестве примера рассмотрим нивелир Trimble DiNi 0,3. Согласно техническим характеристиками прибора [72] СКО определения превышения на 1 км двойного хода принимает значение 0,3 мм. Тогда, для одинарного хода СКО определения превышения на 1 км составит 0,42 мм. С учетом того, что длина хода не должна превышать 0,5 км, то СКО определения превышения m_h примет значение 0,3 мм.

Как было отмечено выше, расстояние между контрольными поперечниками должно составлять 50 м, тогда предположим, что места установки нивелира будут располагаться через 25 м. В этом случае, необходимо десять точек стояния прибора. Ввиду значительной концентрации осадочных марок предлагается применять веерный способ геометрического нивелирования. При этом необходимо учитывать, что каждая марка должна наблюдаться с двух станций, включенных в основной ход [93]. Схема выполнения веерного способа нивелирования представлена на рисунке 2.6.

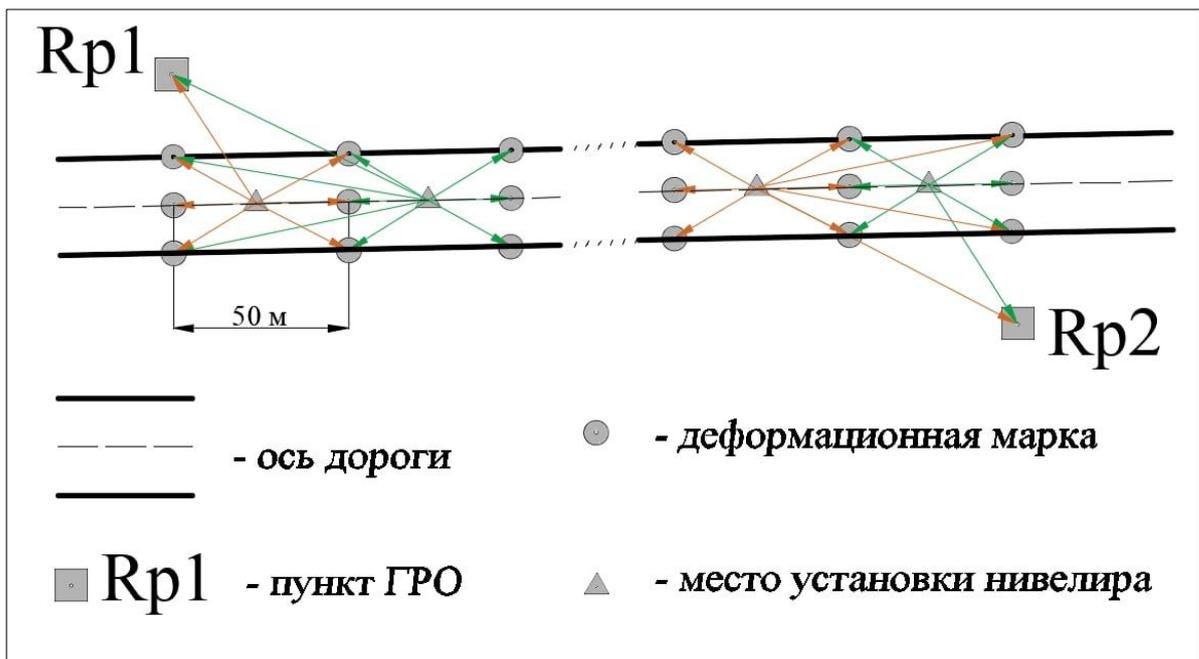


Рисунок 2.6 – Схема выполнения взаимного способа нивелирования

Выполним расчет СКО определения высоты деформационной марки, как ошибку определения превышения осадочной марки с одной установки нивелира по формуле 2.40:

$$m_h = m_{ст} \sqrt{n}, \quad (2.40)$$

где m_h – СКО определения превышений на 0,5 км одинарного хода;

$m_{ст}$ – СКО определения превышения деформационной марки с одной установки нивелира;

n – число установок нивелира (в рассматриваемом случае $n = 10$).

Тогда, исходя из формулы (2.40) получим, что СКО определения превышения на станции составит 0,09 мм. При этом, если расстояния между пунктами ГРО менее 0,5 км, то точность определения высоты деформационных марок будет выше. Так как высота деформационной марки в взаимном способе нивелирования определяется дважды, следовательно, СКО определения превышения на станции составит 0,06 мм.

2.5.3 Оценка возможности определения высот деформационных марок тригонометрическим нивелированием

Рассмотрим определение высот осадочных марок с помощью тригонометрического нивелирования. При этом превышение h_{AB} между точками A и B при одностороннем тригонометрическом нивелировании вычисляется по формуле 2.41 [50, 52]:

$$h_{AB} = d \operatorname{ctg}(z_A) + i_A - l_B + \frac{(1-k)d^2}{2R}, \quad (2.41)$$

где d – горизонтальное проложение между точками;

z_A – зенитное расстояние линии визирования в точке A ;

i_A – высота установки прибора в точке A ;

l_B – высота визирной цели в точке B ;

R – средний радиус Земли ($R = 6371$ км);

k – коэффициент вертикальной рефракции (изменяется в пределах диапазона от +6 до -6 [52]).

Основной составляющей ошибки определения превышения тригонометрическим нивелированием является погрешность определения коэффициента рефракции, величина которой возрастает с увеличением расстояния. Как отмечалось выше, ослабление влияния рефракции на точность тригонометрического нивелирования возможно за счет синхронных двухсторонних наблюдений. В этом случае, превышение h_{BA} с точки B на точку A будет определяться по формуле 2.42:

$$h_{BA} = d \operatorname{ctg}(z_B) + i_B - l_A + \frac{(1-k)d^2}{2R}. \quad (2.42)$$

Так как превышения h_{AB} и h_{BA} противоположны по знаку, то среднее из прямого и обратного превышения h_{cp} будет определяться по формуле 2.43:

$$h_{cp} = \frac{d(\operatorname{ctg} z_A - \operatorname{ctg} z_B)}{2} + \frac{i_A + l_A}{2} - \frac{i_B - l_B}{2} + \frac{k_B - k_A}{2} \frac{d^2}{2}. \quad (2.43)$$

Полагая, что в точках A и B значения коэффициентов рефракции одинаковы, то значением $\frac{k_B - k_A}{2} \frac{d^2}{2}$ в формуле 2.43 пренебрежем.

Среднюю квадратическую ошибку $m_{h_{cp}}$ определения среднего превышения вычислим по формуле 2.44:

$$m_{h_{cp}} = \sqrt{\left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial d}\right)^2 m_d^2 + \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial z_A}\right)^2 m_{z_A}^2 + \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial z_B}\right)^2 m_{z_B}^2 + \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial i_A}\right)^2 m_{i_A}^2 + \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial l_A}\right)^2 m_{l_A}^2 + \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial i_B}\right)^2 m_{i_B}^2 + \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial l_B}\right)^2 m_{l_B}^2}. \quad (2.44)$$

При этом частные производные будут: $\left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial d}\right) = \frac{\text{ctg}z_A - \text{ctg}z_B}{2}$;

$$\left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial z_A}\right) = \frac{d}{2} \frac{1}{\sin^2 z_A}; \quad \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial z_B}\right) = \frac{d}{2} \frac{1}{\sin^2 z_B}; \quad \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial i_A}\right) = \frac{1}{2}; \quad \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial l_A}\right) = \frac{1}{2}; \quad \left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial i_B}\right) = -\frac{1}{2};$$

$$\left(\frac{\partial h_{cp}}{\partial l_B}\right) = \frac{1}{2}.$$

Примем, что $m_{z_A} = m_{z_B} = m_z$ и $m_{i_A} = m_{i_B} = m_{l_A} = m_{l_B} = m_{il}$.

С учетом того, что зенитное расстояние близко к 90° , следовательно ошибками линейных измерений можно пренебречь. Тогда, окончательно получим формулу 2.45:

$$m_h = \sqrt{\frac{d^2}{2} \frac{m_z^2}{\rho''^2} + m_{il}^2}. \quad (2.45)$$

Также отметим, что одним из методов уменьшения составляющей ошибки определения высоты прибора является установка нивелира между исходным пунктом и тахеометром и передача отметки исходного пункта на горизонтальную ось прибора [3]. Тогда составляющей m_{il} можно пренебречь.

Предположим, что измерения будут выполняться электронным тахеометром с техническими характеристиками $m_d = 0,6$ мм и $m_z = 0,5''$. К таким приборам, в частности, относится электронный роботизированный тахеометр Leica TM60.

Однако отметим, что рассмотренная точность измерения расстояний достигается только при условии наведения на призму Leica (GPH1P).

Проанализируем возможность определения высот деформационных марок при различных вариантах расстояния d между точками. При $d = 250$ м определение высот деформационных марок будет выполняться с одной станции. В остальных случаях требуется последовательное проложение хода тригонометрического нивелирования прямо и обратно. В таком случае, ошибку определения превышения осадочной марки можно рассчитать по формуле 2.46:

$$m_h = m_{ct} \sqrt{n}, \quad (2.46)$$

где m_h – СКО определения превышений;

m_{ct} – СКО определения превышения деформационной марки с одной станции;

n – число установок прибора. Тогда, расчет СКО определения превышения выполним с учетом соответствия расстояния между точками стояния.

В таблице 2.4 представлен расчет СКО определения превышения при изменении расстояниями между точками.

Таблица 2.4 – Расчет СКО определения превышения при изменении расстояния

d , м	m_{ct} , мм	n	m_h , мм
250	0,86	1	0,86
170	0,68	2	0,96
125	0,51	3	0,88
100	0,34	4	0,68

Так как ни один из вариантов не удовлетворяет обоснованной выше точности, тогда измерение вертикальных перемещений будем проводить короткими лучами. Величину осадки для выполнения контроля будем находить с двух пунктов. В рассматриваемом случае число станций n при $d = 50$ м составит $n = 9$.

Тогда, подставив рассмотренное выше значение $m_z = 0,5''$ в формулу (2.43), получим, что m_{ct} примет значение 0,13 мм. Далее, подставив полученное

значение в формулу (2.44), определим $m_{h_{cp}}$. В рассмотренном случае $m_{h_{cp}} = 0,13 \text{ мм} \times \sqrt{9} = 0,39 \text{ мм}$. Так как превышения осадочных марок будут определяться дважды (прямо и обратно), то $m_{h_{cp}} = 0,39 \text{ мм} / \sqrt{2} = 0,28 \text{ мм}$, что удовлетворяет обоснованным выше требованиям.

2.5.4 Уравнивание высот деформационных марок

В предполагаемом варианте создания деформационной сети будем иметь два исходных пункта и пятьдесят определяемых осадочных марок. Как подчеркивалось выше, применение веерного способа нивелирования требует определения высоты деформационных марок дважды с разных точек стояния. В соответствии с представленной на рисунке 2.6 схемой прибор предлагается устанавливать через 25 м, тогда высоты крайних марок будут определены при разных длинах плеч.

Современные цифровые нивелиры предоставляют возможность при выполнении нивелирования осадочных марок сразу получать высоты, в этом случае невязку хода определим по формуле 2.47:

$$f_h = H_2^{\text{выч}} - H_2, \quad (2.47)$$

$H_2^{\text{выч}}$ – вычисленная высота второго пункта ГРО;

H_2 – фактическая высота этого пункта.

Тогда, полученная невязка в мм не должна превышать допуска $f_h = 1 \text{ мм} \sqrt{L, \text{ км}}$, где 1 мм вычислена умножением обоснованного выше значения 0,42 мм на 2,5, а L – длина хода в км.

Рассчитаем поправки в высоты осадочных марок на i -ой станции δH_i по формуле 2.48:

$$\delta H_i = -\frac{f_h}{n} i, \quad (2.48)$$

где n – число установок нивелира в ходе. Окончательные высоты осадочных марок, полученных веерным способом нивелирования на первой и последней

станциях, вычислим по формуле среднего весового (при этом веса рассчитаем по формуле $p_i = \frac{c}{L}$, где c примем равным 25 м, а L – расстояние от нивелира до осадочной марки), а на всех остальных – по формуле среднего арифметического.

2.5.5 Комплексный подход к наблюдению за осадками оснований автомобильных дорог

Как было отмечено выше, строительство инженерных сооружений на современном этапе сопряжено с рядом трудностей, включающих сложные инженерно-геологические условия района работ, динамические нагрузки от транспорта, изменчивость гидрологических условий и др. Процесс возведения насыпей автомобильных дорог, в том числе на грунтах с низкой несущей способностью, невозможен без проведения инженерно-геологических изысканий, на основе которых возможно создание комплексной геомеханической модели насыпи автомобильной дороги и, исходя из этой модели, получение прогнозных значений деформаций. При этом отметим, что результаты моделирования носят предварительный характер и могут отличаться от фактических (измеренных) значений деформаций. Подчеркнем, что такие отличия обусловлены рядом причин, среди которых можно выделить следующие:

- сложность сопоставления параметров среды и условий строительства в лабораторных условиях;
- отсутствие постоянства характеристик в толще слабых грунтов;
- трудоемкость сохранения образцов в первоначальном состоянии, возникающая при их транспортировке.

Однако применение комплексных геомеханических моделей позволяет произвести оценку протекания деформационного процесса во времени.

Обратим внимание на то, что зачастую в период возведения насыпи автомобильной дороги на слабых грунтах и вплоть до окончания сооружения насыпи, также ведется контроль за отклонениями марок, установленных в зоне возможного выпора (выдавливания) слабого грунта из основания насыпи. На

основе комплексной геомеханической модели можно акцентировать внимание на такие зоны и располагать осадочные марки не равномерно, а по результатам анализа напряженно-деформированного состояния. Кроме того, на основе такой модели возможно оценить зону влияния насыпи и исключить попадание в нее исходных пунктов. В качестве примера приведем выполненный численный расчет дорожной насыпи в программном продукте, который реализует конечно-элементный подход. Расчет показал возникающие деформации насыпи после ее устройства и их неравномерность (рисунок 2.7).

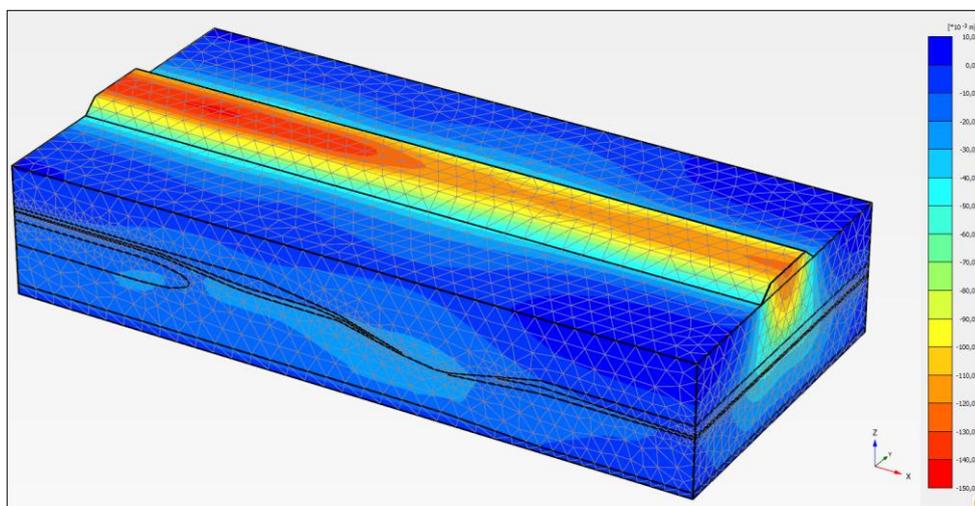


Рисунок 2.7 – Результат численного расчета дорожной насыпи на основе метода конечных элементов

Для создания методики наблюдения за осадками насыпи автомобильных дорог на слабых грунтах предлагается применение комплексного подхода на основе интеграции инженерно-геологических изысканий с данными геодезического мониторинга, что позволит создать схему расположения деформационных марок соразмерно напряженно-деформированному состоянию, полученному из геомеханической модели и назначить предварительную периодичность наблюдений.

Рассмотрим этапы предлагаемого комплексного подхода:

1. Создание комплексной геомеханической модели на основе выполненных инженерно-геологических изысканий.

2. Получение предварительной оценки скорости протекания деформационного процесса, а также максимальной величины осадки в программном обеспечении, осуществляющем конечно-элементный подход.

3. Проектирование схемы расположения высотной опорной и деформационной сетей на основе анализа напряженно-деформированного состояния.

4. Выполнение геодезического мониторинга.

5. Сравнение результатов, полученных с помощью комплексной геомеханической модели, и данных геодезического мониторинга.

6. Верификация комплексной геомеханической модели и корректировка расчетных характеристик грунтов.

7. Расчет времени достижения 90% консолидации основания или интенсивности осадки, не превышающей 2 см/год для дорожных одежд капитального типа.

Такой подход позволит:

- акцентировать внимание на возможные зоны разрушения, которые необходимо контролировать;
- получить оценку максимальной скорости осадки;
- создать оптимальную геодезическую сеть;
- сэкономить материальные средства на организацию мониторинговых измерений;
- повысить точность прогноза.

Обратимся теперь к назначению периодичности наблюдений, которая, определяется, как правило, исходя из производственных возможностей. Свяжем частоту наблюдений и максимально допустимую величину осадки основания насыпи на основе формулы 2.49 [95]:

$$\Delta t \leq \frac{S_{\max}}{v}, \quad (2.49)$$

где Δt – интервал времени между циклами наблюдений;

S_{\max} – критическая величина осадки;

v – скорость протекания осадки.

Тогда на основе созданной комплексной геомеханической модели насыпи автомобильной дороги на слабых грунтах возможно высказать предположения о ходе протекания осадки во времени и задать временной интервал наблюдений. На следующем этапе предлагается выполнять корректировку периодичности на основе изменения скорости протекания осадки во времени. На рисунке 2.8 представлен алгоритм назначения периодичности наблюдений.



Рисунок 2.8 – Общая схема назначения периодичности выполнения наблюдений

2.6 Прогнозирование осадок оснований автомобильных дорог на основе машинного обучения по геодезическим и иным данным

Выполнение прогнозирования временных рядов является сложной задачей [12, 84, 110, 115, 128, 134, 137, 140, 147, 148, 152, 154, 161, 164]. В отличие от задач классификации и регрессии для прогнозирования временных рядов необходима предварительная обработка данных, которая исключает наличие пропущенных значений [115, 127].

Для исследования различных методов прогнозирования временных рядов необходимо найти функцию F (2.50) [84, 115, 136]:

$$y_{n+d}(w) = F(y_1, y_2, \dots, y_n, w), \quad (2.50)$$

где y_n – последовательность из выполненных измерений;

$d \in \{1, 2, \dots, D\}$ – отсрочка прогноза;

D – горизонт прогнозирования;

w – вектор параметров модели.

В результате, имея значения геодезических измерений за предыдущие периоды, необходимо определить их возможные значения в будущем.

Для решения задач прогнозирования предлагается использовать следующие методы машинного обучения [137, 140, 149, 154, 157, 161]:

- линейная регрессия (Linear Regression);
- адаптивная регрессия на основе градиентного спуска (SGD Regression);
- метод случайного леса (Random Forest Regression);
- метод опорных векторов (Support Vector Regression);
- Light Gradient Boosting Machine (LightGBM).

Линейная регрессионная модель. В данной модели в роли признаков выступают n предыдущих наблюдений временного ряда (2.51):

$$\hat{y}_{t+1}(w) = \sum_{j=1}^n w_j y_{t-j+1}, w \in R. \quad (2.51)$$

Считаем, что выполненные геодезические наблюдения в разных циклах независимые. Тогда функцию потерь Q_t можно выразить через целевую функцию метода наименьших квадратов и представить в виде (2.52):

$$Q_t(w) = \sum_{i=t_0}^t (\hat{y}_i(w) - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (2.52)$$

Адаптивная регрессионная модель на основе градиентного спуска. Модель авторегрессии, которая прогнозирует $t+1$ значение как линейную комбинацию предыдущих элементов ряда (2.53) [84]:

$$\hat{y}_{t+1}(w) = \sum_{j=1}^n w_j y_{t-j+1}, w \in R. \quad (2.53)$$

Для того чтобы актуализировать модель при увеличении обучающей выборки, необходимо изменить коэффициенты w_j . Ошибка прогноза $\varepsilon_t = y_t - \hat{y}_t$, где \hat{y}_t – прогноз, сделанный на шаге $t-1$. На каждом шаге необходимо уменьшить текущий квадрат ошибки $\varepsilon_t^2 \rightarrow \min_w$. В каждый момент времени совершается один шаг градиентного спуска. В качестве функции потерь необходимо выбрать лишь одно слагаемое из суммы по всей выборке, характеризующее её изменение в данный момент времени (2.54):

$$w_j = w_j + h_t \varepsilon_t y_{t-j+1}, \quad (2.54)$$

где h_t – градиентный шаг, который определяется по формуле 2.55:

$$h_t = \frac{\alpha}{\sum_{j=1}^n y_{t-j+1}^2}, \quad (2.55)$$

где α – аналог параметра сглаживания. Чем больше коэффициент, тем выше адаптивность модели.

Метод случайного леса. Модель представляет собой ансамбль алгоритмов, в котором базовым алгоритмом выступает решающее дерево. Принцип работы алгоритма заключается в следующем: создаются случайные выборки из набора данных, для каждой такой выборки строится дерево решений и на его основе получают предсказание, проводится голосование за каждый полученный прогноз и выбирается предсказание с наибольшим количеством голосов. Признак в каждой вершине дерева выбирается из случайного подмножества k из n признаков. Для решения регрессионных задач обычно задается $k = \frac{n}{3}$. В качестве параметров, которые можно настраивать выделяют: число деревьев, число случайно выбираемых признаков, максимальная глубина деревьев, минимальное число объектов в расщепляемой подвыборке, минимальное число объектов в листьях, критерий расщепления [84, 136].

Метод опорных векторов. В основе метода лежит перевод исходных признаков в пространство более высокой размерности. Отметим, что каждый входной вектор формируется как последовательность исходных данных с

задержками по времени. Суть метода – построение гиперплоскости, которая описывает распределение с заданной точностью. Метод выполняет расчет коэффициентов путем минимизации квадратичных потерь. Вычисления выполняются суммированием по всем образцам ядер (функций от входных данных). Функции могут быть как линейными, так и нелинейными. В исследовании предлагается использовать радиальную базисную функцию (2.56) [84, 161]:

$$K(x, x') = e^{-\gamma(x-x')^2}, \quad (2.56)$$

где x, x' – векторы признаков;

γ – скаляр, который определяет какое влияние оказывает один обучающий пример;

$(x - x')^2$ – квадрат евклидова расстояния между двумя векторами признаков.

В методе есть два настраиваемых параметра: ε – определяет ширину области вокруг оценочной гиперплоскости (точки, попавшие в эту область, считаются правильными предсказаниями и не штрафуются); C – параметр регуляризации.

Light gradient boosting machine (LightGBM). Модель предоставляет возможность работы с категориальными признаками напрямую и, по сравнению с экстремальным градиентным бустингом (*XGBoost*), обладает высокой скоростью обработки массива данных. Бустинг – это один из подходов к построению ансамблей, в котором каждая следующая модель учитывает ошибки предыдущей [136, 137]. Подчеркнем, что минимизация функции потерь выполняется с помощью градиентного спуска. Для этого на каждом шаге вычисляется антиградиент функции потерь по предсказанию (2.57) [136, 137]:

$$g_N(x) = -\nabla L(y, a_{N-1}(x) + a), \quad (2.57)$$

где g_N – предсказание;

$L(y, a)$ – дифференцируемая функция потерь;

$a_N(x)$ – предсказание ансамбля;

N – количество базовых моделей.

Отметим, что при наличии нескольких входных параметров необходимо снижать размерность признаков. Одним из способов понижения размерности с минимальной потерей информации является метод главных компонент (PCA), который представляет собой ортогональное линейное преобразование. Составим матрицу входных параметров (набора измерений) размерностью $(I \times J)$, где I – число строк (число дат, в которые выполнялись измерения), а J – число столбцов (признаков). В рассматриваемом случае число признаков больше единицы. При использовании метода главных компонент создаются новые переменные – главные компоненты $t_a (a = 1, \dots, A)$, где A – число главных компонент. Созданные переменные являются линейной комбинацией исходных переменных $x_j (j = 1, \dots, J)$. Тогда формула для расчета новых переменных имеет вид (2.58) [84]:

$$t_a = p_{a1}x_1 + \dots + p_{aJ}x_J. \quad (2.58)$$

Далее, применяя новые переменные (2.58), матрица исходных переменных X разлагается в произведение матрицы счетов T (размерность $I \times A$) и матрицы нагрузок P (размерность $J \times A$). Разложение осуществляется по формуле 2.59:

$$X = TP^t + E = \sum_{a=1}^A t_a p_a^t + E, \quad (2.59)$$

где E – матрица остатков (размерность $I \times J$).

Подчеркнем, что в некоторых алгоритмах, например *Random Forest*, *LightGBM* для того, чтобы определить, насколько тот или иной признак важен для модели, применяются функции оценки важности признака, которые встроены в модель. Однако исключение параметров ведет к построению новой модели, где значение весов признаков будет отличаться от первоначальной модели.

После этапа создания прогнозных моделей необходимо оценить качество выполненного прогнозирования. Решение регрессионных задач сводится к минимизации разницы между предсказанным и фактическими значениями, вследствие чего широко используемыми показателями являются квадрат средней квадратической ошибки (*MSE*) и средняя абсолютная ошибка (*MAE*) [127]. С учетом влияния размерности на использование *MSE* целесообразно применять

среднюю квадратическую ошибку прогноза ($RMSE$), которая рассчитывается по формуле 2.60:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (2.60)$$

где \hat{y}_i – прогнозное значение показателя;

y_i – фактическое значение;

n – количество наблюдений. Чем меньше значение $RMSE$, тем выше точность прогноза.

Для выполнения прогнозирования осадков оснований автомобильных дорог на основе методов машинного обучения необходимо разделить данные на обучающий и тестовый наборы. Далее следует провести предварительную обработку данных, которая включает работу с пропущенными значениями и, при необходимости, изменение типов данных, поиск дублирующих значений и др. Кроме того, важным этапом является масштабирование данных (такие данные имеют нулевое среднее значение и единичную дисперсию). При наличии нескольких признаков необходимо выполнить корреляционный анализ с выделением значимых признаков. Также в случае слабой корреляционной зависимости возможна генерация новых признаков из исходных.

На следующем этапе выполняется построение прогнозных моделей выбранными методами машинного обучения. Для вычисления гиперпараметров каждого метода следует применить процедуру перекрестной проверки, которая исключит риск переобучения моделей. Скользящий контроль является эмпирическим методом Монте-Карло и состоит в разбиении данных на k меньших наборов. Дополнительно заметим, что для модели временных рядов необходимо применять перекрестную проверку на скользящей основе. Схема перекрестной проверки на скользящей основе представлена на рисунке 2.9.

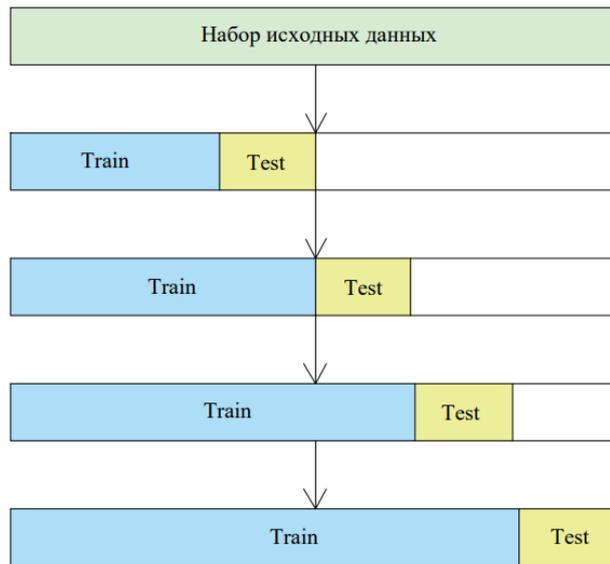


Рисунок 2.9 – Схема перекрестной оценки на скользящей основе, где Train – обучающая выборка, Test – тестовая выборка

Общая последовательность построения прогнозных моделей отображена на рисунке 2.10.

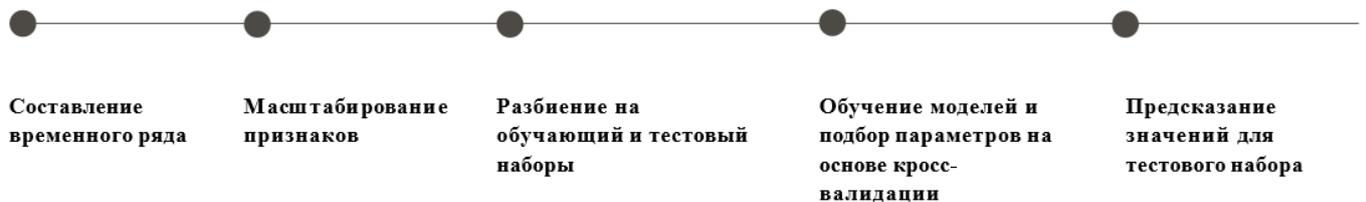


Рисунок 2.10 – Последовательность построения прогнозных моделей

Итак, для прогнозирования осадок основания автомобильных дорог на высоких насыпях на основе машинного обучения, необходимо выполнение следующих этапов:

- составление временного ряда из полученных измерений;
- масштабирование признаков;
- разбиение на обучающий и тестовый наборы;
- обучение моделей и подбор параметров на основе кросс-валидации;
- предсказание значений для тестового набора;
- проверка качества выполненного моделирования на основе расчета основных показателей, применяемых для оценки качества прогноза.

Таким образом, определены методы машинного обучения и показатели, применяемые для оценки качества модели, которые могут быть использованы при прогнозировании осадок оснований автомобильных дорог.

2.7 Создание прогнозной модели на основе нейронной сети по данным геотехнического мониторинга

В соответствии со сводом правил [89] целью проведения геотехнического мониторинга является обеспечение безопасности строительства, в частности автомобильных дорог, на основании контроля изменения параметров сооружений и грунтов основания, которые могут оказать влияние на целостность объекта строительства, а также зданий и сооружений окружающей застройки.

Геотехнический мониторинг выполняется при возведении насыпей на слабых основаниях, в том числе возводимых с применением ленточного дренирования. При этом осуществляется контроль за величиной осадки и затуханием ее во времени.

При сооружении насыпи на грунтах с низкой несущей способностью геотехнический мониторинг может включать:

- проведение исходной геодезической съемки поперечного профиля;
- контроль фактических осадок основания насыпи и прогноз величины и темпа осадки в процессе и после сооружения насыпи;
- измерение порового давления в грунтах основания, на основе которого выполняется количественная оценка измерения коэффициента устойчивости насыпи и деформируемости ее основания в процессе возведения.

Заметим, что стабилизированное состояние грунта характеризуется окончанием деформационного процесса уплотнения грунта под действием определенной нагрузки и отсутствием избыточного давления в поровой среде. Поровое давление – это давление, возникающее под действием грунтовых вод между частицами грунта. При отсутствии внешних воздействий поровое давление является гидростатическим, при этом, в случае возникновения нагрузки – избыточным. Тогда, избыточное поровое давление определяется как разница

между гидростатическим давлением (давлением воды в межпоровом пространстве до приложения нагрузки) и давлением в межпоровом пространстве после приложения нагрузки в процессе консолидации основания.

Как было отмечено в главе 1, пункт 1.5.4 не все методы машинного обучения могут учитывать динамику изменения деформации во времени и рассматривают процесс прогнозирования как проблему статистической подгонки, поэтому осуществлять долгосрочное прогнозирование не всегда представляется возможным. Кроме того, прогнозные деформации, полученные в ходе численного моделирования насыпи, также не всегда отражают фактические осадки оснований автомобильных дорог. Вследствие этого, прогнозирование осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях и слабых грунтах предлагается выполнять с помощью применения нейронных сетей, учитывающих динамические изменения. При этом в качестве параметров предлагается использовать не только значения осадок, но и, например, величину порового давления, так как именно по ней происходит оценка деформируемости основания в процессе возведения насыпи.

Как было рассмотрено выше для прогнозирования временных рядов широко применяется нейронная сеть, содержащая рекуррентные модули сети и способная запоминать значения как на короткие, так и на длительные промежутки времени (LSTM). В рамках исследования предлагается детально рассмотреть процесс моделирования нейронной сети долгой кратковременной памяти LSTM для прогнозирования осадок основания автомобильных дорог на слабых грунтах.

Подчеркнем, что сеть LSTM следует определенным правилам запоминания, благодаря которым при каждом вычислении предыдущий результат применяется в следующем скрытом слое. Также ввиду непрерывности цикла входного сигнала, LSTM обеспечивает сохранение данных.

Составной частью сети LSTM является механизм фильтров, который обеспечивает передачу информации: забывающий фильтр f_t , входной фильтр i_t и выходной фильтр o_t . Они управляют прохождением данных и состоят из слоя сигмоидальной нейронной сети и операции поточечного умножения.

Сигмоидальный слой возвращает значения в диапазоне от 0 до 1. Отметим, что при получении единичного значения данные полностью пропускаются, а при нулевом значении ни один элемент последовательности не пропускается.

Фильтр забывания f_t сохраняет состояние ячейки C_{t-1} в предыдущий момент времени через применение функции активации σ , которая вычисляется по формуле 2.61 [127]:

$$i_f = \sigma(W_f [h_{t-1}, x_t] + b_f), \quad (2.61)$$

где W_f – весовая матрица;

b_f – смещение забывающего фильтра;

h_{t-1} – выход в момент времени $t-1$. Схематично этот шаг представлен на рисунке 2.11.

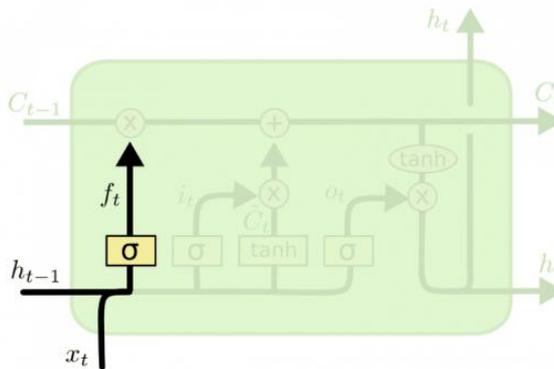


Рисунок 2.11 – Работа фильтра забывания

Затем для обновления значения C_t входной фильтр i_t оставляет выбранную часть текущей последовательности x_t . Работа входного фильтра выражается формулой 2.62 [127]:

$$i_f = \sigma(W_i [h_{t-1}, x_t] + b_i). \quad (2.62)$$

Для решения вопроса какая часть новых данных подлежит сохранению выполняется два этапа: входной фильтр (сигмоидальный слой) определяет значения, которые необходимо обновить, далее слой (гиперболический тангенс) строит вектор новых кандидатов C_t , которые можно будет добавить в состояние

ячейки. Нелинейное выходное значение ячейки \hat{C}_t^o рассчитывается на основе предыдущего выхода и входа по формуле 2.63 [127]:

$$\hat{C}_t^o = \tanh(W_c [h_{t-1}, x_t] + b_c), \quad (2.63)$$

где \tanh – функция гиперболического тангенса. Алгоритм отображен на рисунке 2.12.

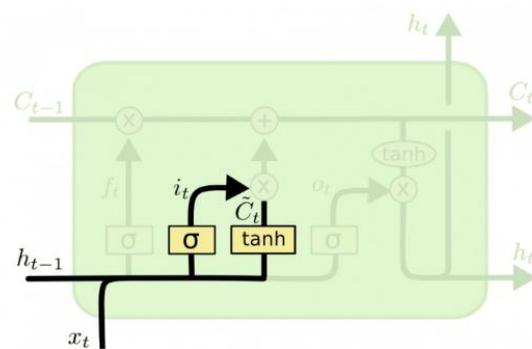


Рисунок 2.12 – Расчет значения \hat{C}_t^o

Для того чтобы изменить предыдущее состояние ячейки C_{t-1} на новое C_t необходимо применить формулу 2.64:

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \hat{C}_t^o. \quad (2.64)$$

Схематично изменение представлено на рисунке 2.13.

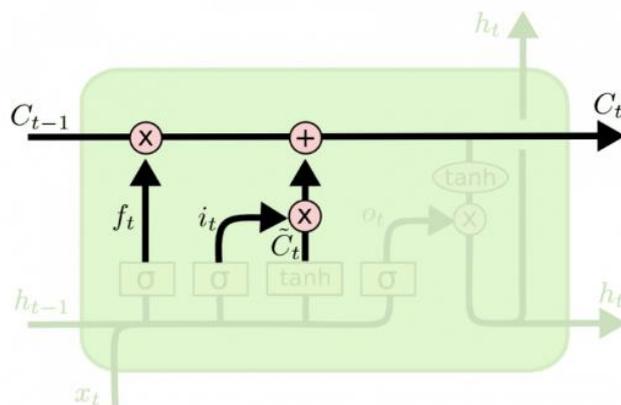


Рисунок 2.13 – Изменение предыдущего состояния ячейки C_{t-1} на новое C_t

Для получения значений на выходе h_t , необходимо применить выходной фильтр o_t , который контролирует вывод информации, исходя из состояния ячейки, в соответствии с формулой 2.65 [127]:

$$o_t = \sigma(W_o [h_{t-1}, x_t] + b_o). \quad (2.65)$$

Далее для получения значений в диапазоне от -1 до 1 последовательность проходит через «тангенциальный» слой и перемножается с выходными значениями сигмоидального слоя согласно выражению 2.66:

$$h_t = o_t \tanh(C_t). \quad (2.66)$$

На рисунке 2.14 отображен процесс получения выходных значений.

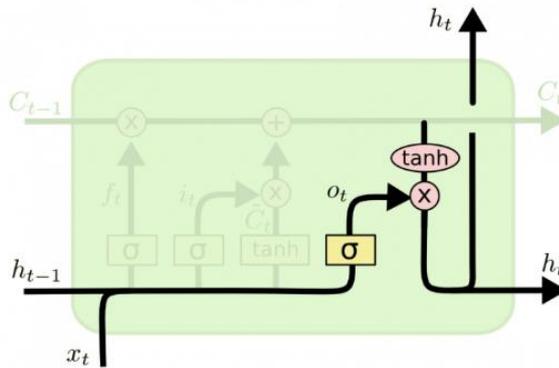


Рисунок 2.14 – Процесс получения выходных значений

Таким образом, предлагается создавать прогнозную модель по результатам геотехнического мониторинга на основе рекуррентной нейронной сети долговременной и кратковременной памяти. Такие сети не требуют масштабированного или стационарного временного ряда, а также могут взаимодействовать с неполными данными, содержащими пропуски. Вследствие этого, важным этапом экспериментальных исследований является выявление возможности долгосрочного прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог на основе данных осадок и, при наличии, порового давления.

2.8 Выводы по главе 2

1. Обоснованы требования к точности перехода от геодезических высот, полученных с помощью ГНСС-технологии, в систему нормальных высот до уровня, необходимого при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог.

2. Предложена и теоретически обоснована методика преобразования геодезических высот в систему нормальных высот на основе создания локальной модели квазигеоида по волновому методу, которая включает:

- получение набора исходных пунктов с известными геодезическими и нормальными высотами;
- вычисление значений аномалий высот для этих пунктов;
- создание поверхности аномалий высот различными интерполяционными методами;
- выбор метода на основе оценки точности интерполяции и СКО определения высоты по контрольным точкам;
- определение оптимального расстояния между исходными пунктами, обеспечивающего точность определения нормальных высот для заданного класса нивелирования, на основе выбранного интерполяционного метода выполняется за счет увеличения расстояния между исходными пунктами (исключения их из модели и использования в качестве контрольных);
- автоматический ввод поправок в геодезические высоты в любых точках, принадлежащих созданной модели.

3. Предложена и теоретически обоснована методика преобразования геодезических высот в систему нормальных высот на основе создания локальной поверхности квазигеоида по остаточному методу, которая включает выполнение следующих этапов:

- получение набора исходных пунктов с известными геодезическими, нормальными высотами и аномалиями высот, определенных по глобальной модели геоида EGM2008;
- вычисление вектора отклонений $\Delta\xi_i$;
- создание локальной модели квазигеоида различными интерполяционными методами;
- выбор метода на основе оценки точности интерполяции и расчета СКО определения высоты по контрольным точкам;
- определение на основе выбранного интерполяционного метода за счет увеличения расстояния между исходными пунктами (исключения их из модели и использования в качестве контрольных) оптимального расстояния между

исходными пунктами, обеспечивающего точность определения нормальных высот для заданного класса нивелирования;

- автоматический ввод поправок в геодезические высоты в любых точках, принадлежащих построенной модели.

4. Определены необходимые этапы для выполнения проектирования числа исходных пунктов на основе глобальной модели геоида EGM2008:

- выбор в районе работ пунктов с известными нормальными высотами;
- выполнение определения соответствующих им высот геоида с помощью глобальной модели EGM2008;

- вычисление разности высот и создание локальной модели на основе полученной разности;

- определение параметров преобразования высот и ввод переменных поправок;

- выполнение сравнения ожидаемой СКО определения высот пунктов для заданного класса геометрического нивелирования с СКО определения нормальных высот по контрольным точкам.

5. Разработана методика определения осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах с использованием геометрического нивелирования, которая предполагает:

- использование существующих пунктов ГРО вместо закладки новых и их повторное определение с СКО определения высоты, составляющей 0,2 мм;

- выполнение уравнивания высотной опорной сети коррелятным способом с вводом в измеренные прямое и обратное превышение поправки $\left(-\frac{f_h}{2}\right)$;

- установку осадочных марок каждые 50 м по всей длине участка со слабым основанием;

- использование трех деформационных марок при съемке контрольного поперечника (две по бровкам насыпи, а третья располагается на её оси);

- применение верного способа нивелирования для определения высоты деформационных марок с применением приборов с СКО определения превышения на 1 км двойного хода 0,3 мм;

- установление высот деформационных марок с СКО её определения равной 0,5 мм (при скорости деформационного процесса 1,7 мм/мес. для дорожных одежд капитального типа);

- выполнение уравнивания высот деформационных марок коррелятным способом;

- вычисление окончательных высот на первой и последней станциях по формуле среднего весового, а для всех остальных расчет по формуле среднего арифметического.

6. Предложен комплексный подход к мониторингу осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах на основе интеграции результатов инженерно-геологических изысканий и геодезических работ. Комплексный подход включает:

- создание комплексной геомеханической модели на основе выполненных инженерно-геологических изысканий;

- получение предварительной оценки скорости протекания деформационного процесса, а также максимальной величины осадки;

- проектирование схемы расположения деформационных марок на основе анализа напряженно-деформированного состояния;

- выполнение геодезического мониторинга;

- сравнение результатов, полученных с помощью комплексной геомеханической модели, и данных геодезического мониторинга;

- верификация комплексной геомеханической модели и корректировка расчетных характеристик грунтов;

- расчет необходимого временного интервала между циклами наблюдений;

- получение прогнозных значений порового давления для применения в качестве параметра при составлении прогноза осадок на основе нейронной сети.

7. Разработана методика выполнения прогнозирования на основе методов машинного обучения по геодезическим данным, которая предполагает:

- составление временного ряда на основе выполненных измерений;
- масштабирование признаков;
- разделение данных на обучающий и тестовый наборы;
- обучение моделей и подбор их параметров на основе кросс-валидации на скользящей основе;
- предсказание тестовых значений, вычисление СКО прогноза для оценки качества выполненного прогнозирования.

8. Предложено создание прогнозной модели по результатам геотехнического мониторинга на основе рекуррентной нейронной сети долговременной и кратковременной памяти, так как не все методы машинного обучения могут учитывать динамику изменения деформации во времени и рассматривают процесс прогнозирования как проблему статистической подгонки. Следовательно, осуществлять долгосрочное прогнозирование не всегда представляется возможным. Кроме того, прогнозные деформации, полученные в ходе численного моделирования насыпи, также не всегда отражают фактические осадки основания автомобильных дорог. Поэтому, прогнозирование осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях и слабых грунтах предлагается выполнять с помощью применения нейронных сетей, учитывающих динамические изменения. При этом в качестве параметров предлагается использовать не только значения осадок, но и величину порового давления, так как именно по ней происходит оценка деформируемости основания в процессе возведения насыпи.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ОСАДОК НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

3.1 Определение нормальных высот пунктов по результатам спутниковых определений на основе построения локальной модели квазигеоида

На экспериментальном участке были расположены 322 опорных пункта, геодезические и нормальные высоты которых известны. Исходными данными для построения локальной модели квазигеоида для линейного объекта стали 69 опорных геодезических пунктов, которые были расположены по обе стороны от существующей автомобильной дороги. Из их числа было выбрано 10% (7 пунктов), расположенных на приблизительно одинаковом расстоянии друг от друга в разных частях объекта. Выбранные пункты были использованы как контрольные. Отметим, что СКО определения нормальных высот пунктов не превосходили 3 мм. Площадь объекта составила 129,40 км².

На рисунке 3.1 представлена схема расположения совмещенных пунктов.

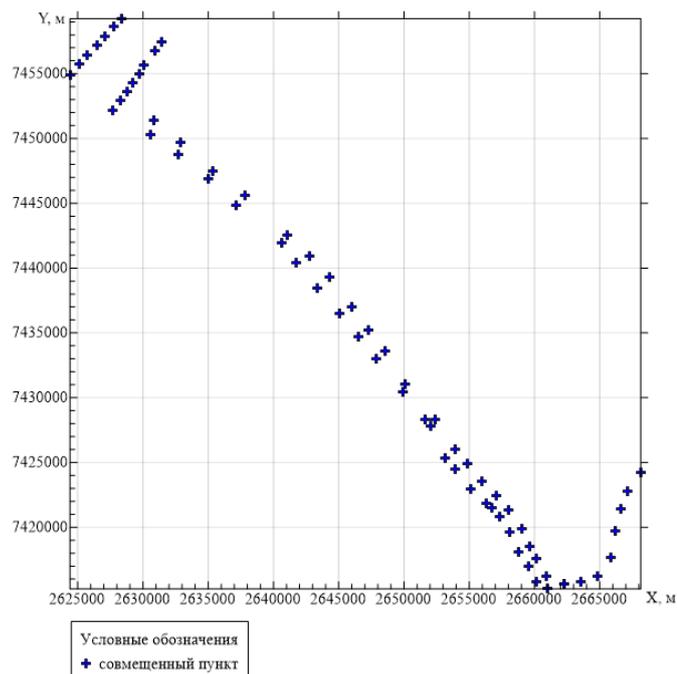


Рисунок 3.1 – Схема расположения совмещенных пунктов

В таблице 3.1 представлена ведомость контрольных пунктов.

Таблица 3.1 – Ведомость контрольных пунктов

Номер пункта	Аномалия высоты ξ , м
24	-8,342
52	-8,249
102	-8,159
158	-8,037
206	-8,014
266	-7,816
285	-7,774

Создание локальной модели квазигеоида было выполнено в программном продукте Golden Software Surfer. Оценка качества выполненного моделирования была проведена на основе расчета статистических характеристик.

На первом этапе данные были загружены в программный продукт, затем была создана регулярная координатная сетка (было определено оптимальное расстояние между ее узлами). Далее было выполнено создание поверхности аномалий высот на основе рассмотренных интерполяционных методов и была проведена оценка точности (расчет основных статистических характеристик, а также СКО определения высот по контрольным точкам). Потом было проведено сравнение моделей, полученных различными интерполяционными методами. На следующем этапе был подобран метод интерполяции и определено минимальное количество опорных пунктов, необходимых для создания модели с требуемой точностью.

Построение модели было выполнено следующими интерполяционными методами:

- триангуляция с линейной интерполяцией (Triangulation with Linear Interpolation);
- метод минимальной кривизны (Minimum Curvature);
- метод ближайшего соседа (Nearest Neighbor);

- метод естественной окрестности (Natural Neighbor);
- радиальные базисные функции (Radial Basis Function);
- кригинг (Kriging).

Для построения первой модели из общего числа пунктов 62 были использованы для построения локальной модели квазигеоида. Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Оценка точности по 62 опорным пунктам

Оцениваемые параметры	Методы интерполяции					
	Триангуляция с линейной интерполяцией	Метод минимальной кривизны	Метод ближайшего соседа	Метод естественной окрестности	Радиальные базисные функции	Кригинг
Минимум, м	-0,019	-0,250	-0,028	-0,019	-0,050	-0,025
Максимум, м	0,039	0,038	0,036	0,035	0,048	0,053
Среднее, м	0,0003	0,0090	0,0002	0,0002	-0,0041	0,0006
Диапазон, м	0,058	0,063	0,064	0,049	0,098	0,078
Асимметрия, м	1,041	1,407	1,303	1,323	-0,097	2,127
Эксцесс, м	3,068	8,841	8,010	7,204	5,952	10,711
Сумма, м	0,008	0,035	0,001	-0,013	-0,257	0,034
СКО интерполяции, м	0,010	0,008	0,011	0,009	0,016	0,009
СКО определения высот по контрольным точкам, м	0,009	0,008	0,019	0,007	0,017	0,007

В ходе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что минимальные СКО интерполяции модели были получены при использовании методов минимальной кривизны (0,008 м), естественной окрестности (0,009 м), кригинга (0,009 м), триангуляции с линейной интерполяцией (0,010 м).

Помимо этого, была выполнена оценка СКО определения высот по контрольным точкам. На рисунке 3.2 представлен сравнительный анализ СКО интерполяции и СКО определения высот по контрольным точкам.

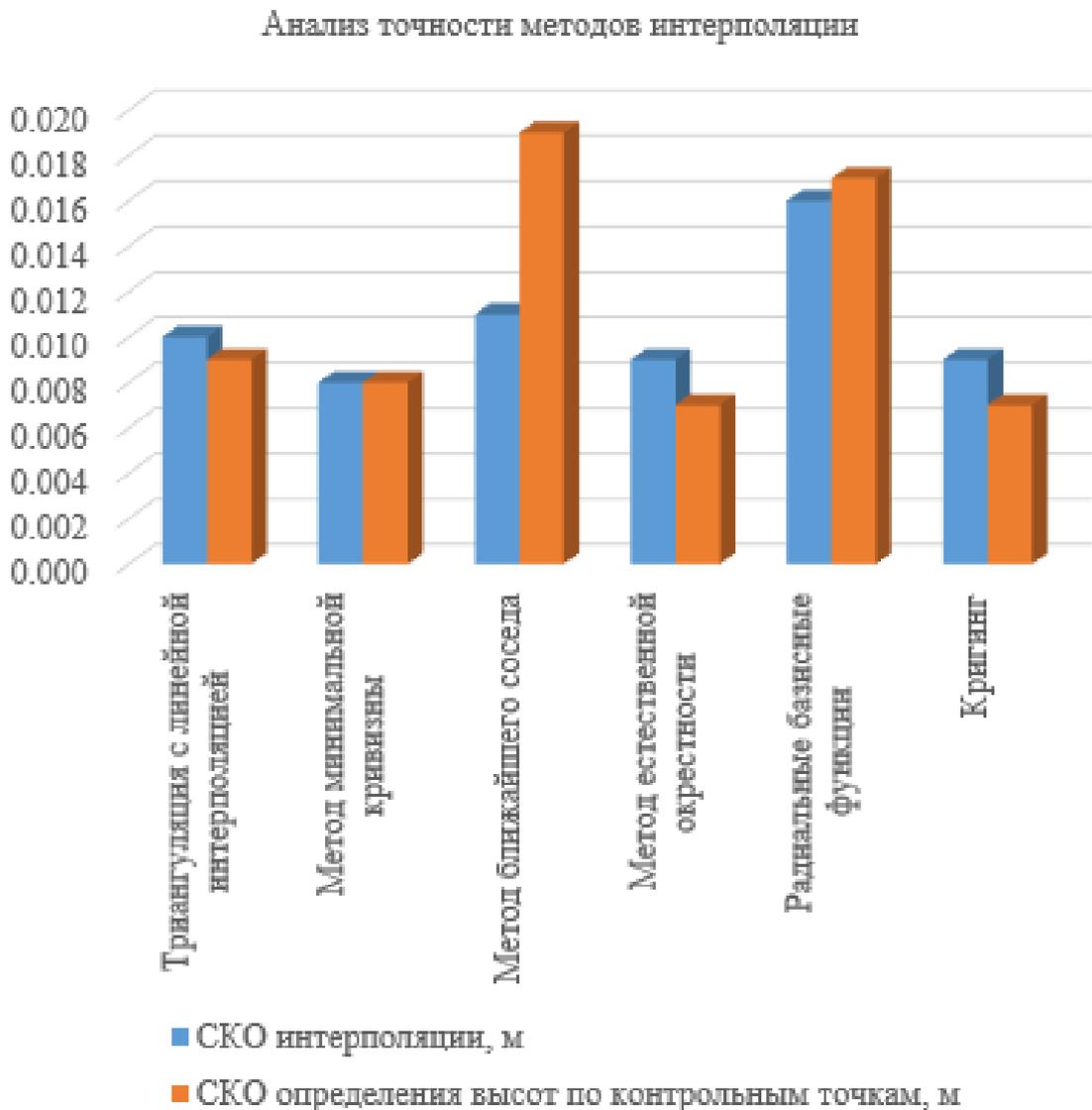


Рисунок 3.2 – Сравнительный анализ СКО интерполяции и СКО определения высот по контрольным точкам

Наименьшие значения СКО определения высот по контрольным точкам получены методами минимальной кривизны (0,008 м), естественной окрестности (0,007 м), кригинга (0,007 м).

Так как разница в точности интерполяции между методами кригинга, естественной окрестности и минимальной кривизны пренебрежимо мала, то дальнейшие построения были выполнены на их основе. На рисунке 3.3, 3.4

представлены результаты выполненного моделирования (создания локальной модели квазигеоида) выбранными методами.

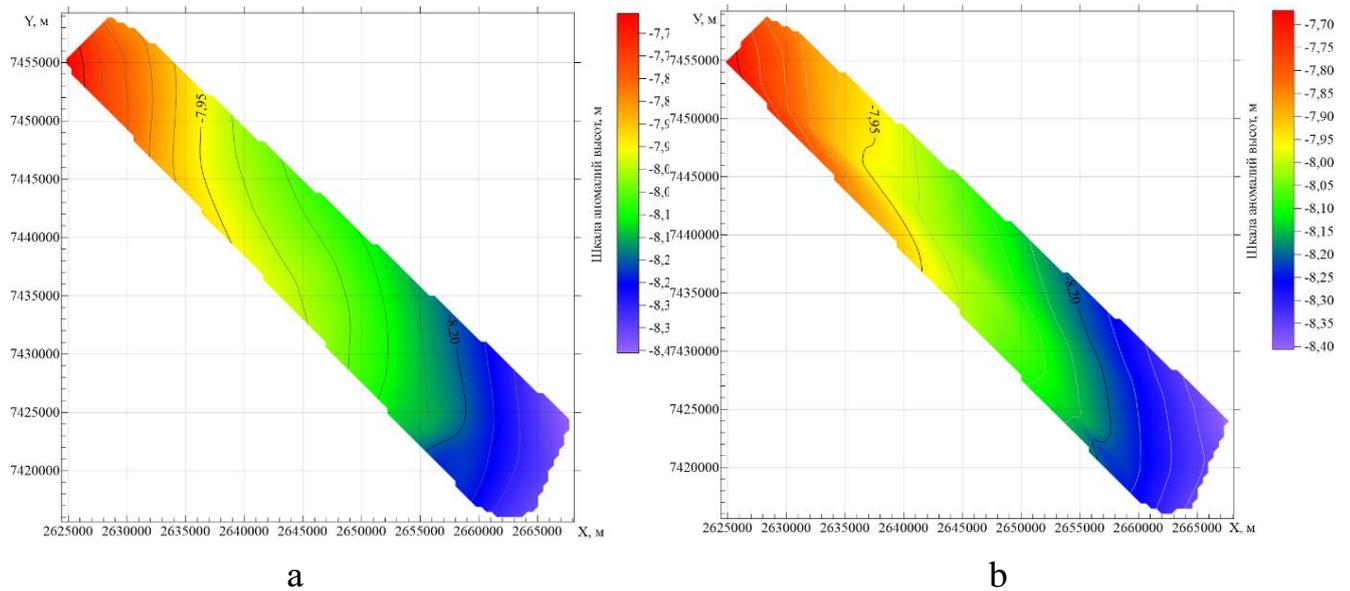


Рисунок 3.3 – Создание модели с использованием методов: а – минимальной кривизны, б – естественной окрестности

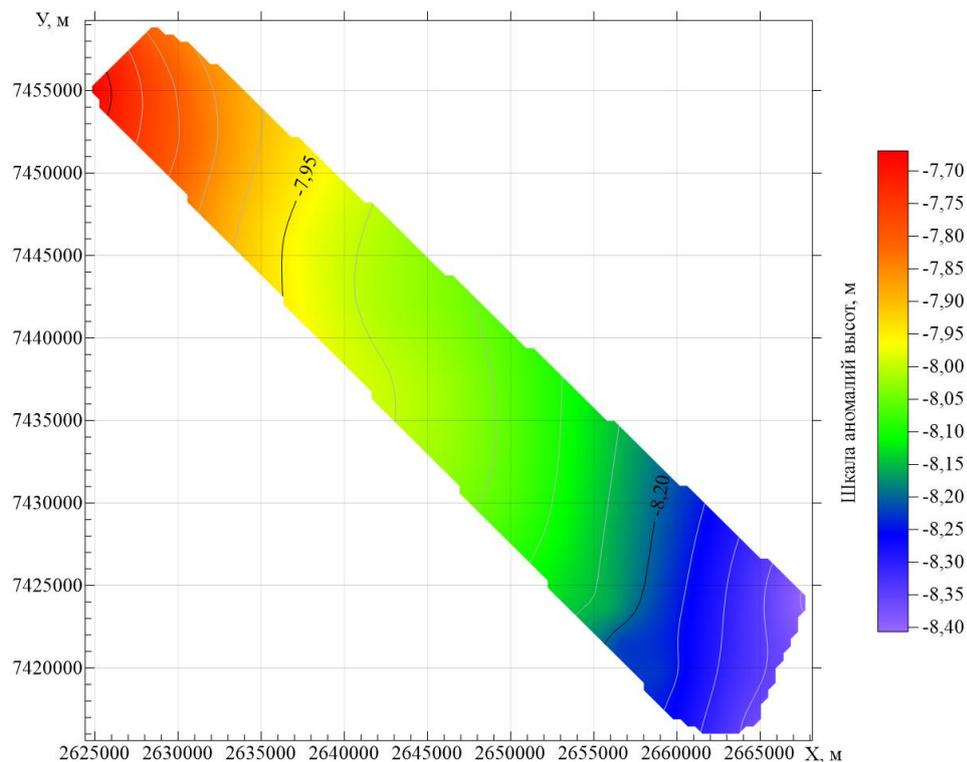


Рисунок 3.4 – Создание модели с применением метода кригинг

На следующем этапе было выполнено создание модели при условии включения пунктов, расстояние между которыми было в пределах 4 км. В итоге было отобрано 28 пунктов, а остальные пункты были использованы в качестве

контрольных. Результаты выполненного построения моделей представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Оценка точности создания модели по 28 опорным пунктам

Оцениваемые параметры	Методы интерполяции		
	Кригинг	Метод естественной окрестности	Метод минимальной кривизны
Минимум, м	-0,072	-0,036	-0,019
Максимум, м	0,074	0,039	0,041
Среднее, м	0,0010	0,0036	0,0006
Диапазон, м	0,146	0,075	0,060
Асимметрия, м	0,116	0,642	1,338
Экссесс, м	5,444	3,140	5,766
Сумма, м	0,027	-0,072	0,017
СКО построения модели, м	0,025	0,019	0,011
СКО определения высот по контрольным точкам, м	0,007	0,007	0,009

Выполнив анализ представленных параметров, были сделаны следующие выводы:

– наименьшая СКО построения модели была получена при использовании метода Minimum Curvature (0,011 м);

– наименьшие СКО определения высот по контрольным точкам были получены методами Kriging (0,007 м), Natural Neighbor (0,007 м).

Отметим, что из-за особенностей математического аппарата метода Natural Neighbor некоторые пункты были автоматически исключены из построения, что не предоставляет возможности применять данный метод.

Далее расстояние между пунктами было увеличено до 8 км. В результате для построения третьей модели было отобрано 14 пунктов, тогда как 48 пунктов были использованы в качестве контрольных. Результаты создания моделей отражены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Оценка точности создания модели по 14 пунктам

Оцениваемые параметры	Методы интерполяции	
	Kriging	Minimum Curvature
Минимум, м	-0,074	-0,013
Максимум, м	0,058	0,032
Среднее, м	0,000	0,0041
Диапазон, м	0,132	0,045
Асимметрия, м	-0,296	0,843
Экссесс, м	2,128	2,527
Сумма, м	0,001	0,058
СКО построения модели, м	0,034	0,014
СКО определения высот по контрольным точкам, м	0,018	0,013

В ходе выполненного анализа был сделан вывод о том, что при уменьшении числа опорных пунктов в четыре раза СКО увеличилась с 9 мм до 14 мм для модели, созданной методом Minimum Curvature. Отметим, что зависимость данного метода от количества исходных пунктов мала, однако их расположение должно быть равномерным, а поверхность не должна иметь резких перепадов высот.

Так как локальная модель квазигеоида, построенная с применением метода Minimum Curvature, удовлетворяет точности III класса нивелирования, можно говорить о том, что для данного района работ достаточно обеспечить расположение опорных пунктов на расстоянии, не превышающем 8 км.

Далее рассмотрим построение локальной модели квазигеоида по остаточному методу. Для ее создания была использована глобальная модель геоида EGM2008, на основе которой определены $\xi_i^{EGM 2008}$ для каждого опорного пункта. Затем было выполнено вычисление вектора отклонений $\Delta\xi_i$.

Создание моделей осуществлялось с применением метода Minimum Curvature. Как и в случае с волновым методом на создание первой модели (модель 1) было выполнено на основе 62 контрольных пункта, при этом 7 из них были использованы в качестве контрольных. Для построения второй модели (модель 2) расстояние между опорными пунктами было увеличено до 4 км, а для

создания третьей модели (модель 3) до 8 км. Пункты, не применяемые для создания моделей, были использованы как контрольные. Результаты построения представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Оценка точности создания модели по остаточному методу с использованием глобальной модели EGM2008

Оцениваемые параметры	Номер модели		
	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Количество пунктов	61	28	14
СКО интерполяции, м	0,011	0,019	0,028
СКО определения высот по контрольным точкам, м	0,009	0,012	0,016

По полученным данным для метода минимальной кривизны СКО создания модели волновым методом в два раза выше, чем для аналогичной модели, построенной по остаточному методу. Оба метода согласуются друг с другом при большом наборе совмещенных пунктов (модель 1).

3.2 Экспериментальные исследования разработанной методики наблюдений за осадками оснований автомобильных дорог на основе геометрического нивелирования на грунтах с низкой несущей способностью

Перед производством работ по наблюдению за осадками оснований автомобильных дорог необходимо выполнить проектирование высотной опорной и деформационной сетей. Для этого было разработано приложение в формате *.exe* на языке программирования *Python* в среде *PyCharm Community 2021* [87], которое предназначено для определения осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах, а также при высоте насыпи более 12 м. Отметим, что приложение работает автономно и не требует установки или открытия дополнительного программного обеспечения.

С помощью программы можно выполнять расчёт СКО определения высоты исходных пунктов и СКО определения высоты деформационных марок. Внешний вид программы представлен на рисунке 3.5.

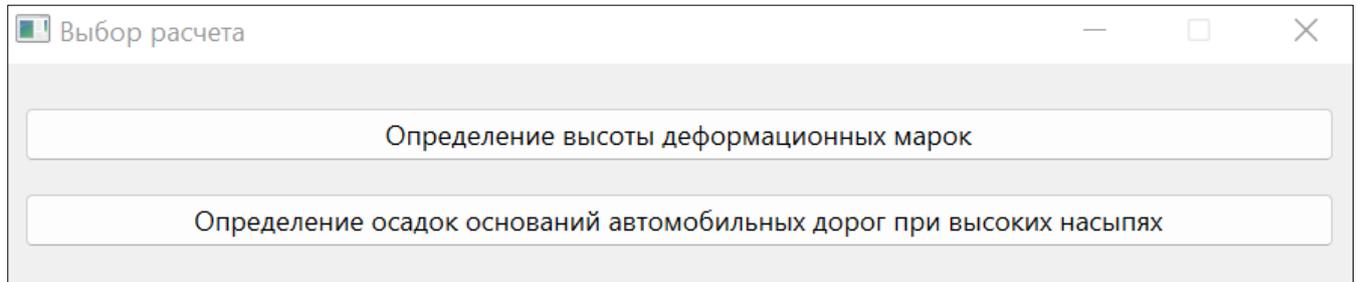


Рисунок 3.5 – Окно программы

Программа позволяет выполнить проектирование высотной опорной и деформационной сетей, при этом учитывает требования к точности действующих нормативных документов и на их основе предлагает класс выполнения нивелирования, рассчитывает количество необходимых деформационных марок и СКО определения превышения деформационной марки с одной установки нивелира. Внешний вид программы при проектировании высотной опорной и деформационной сетей отображен на рисунке 3.6. Программа также учитывает скорость деформационного процесса, периодичность выполнения измерений, уровень значимости.

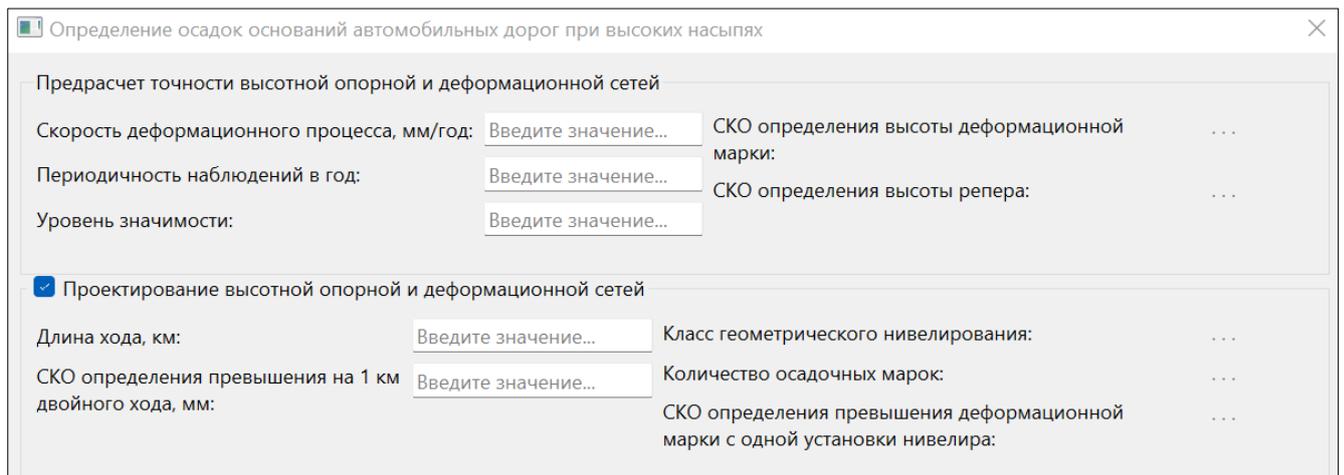


Рисунок 3.6 – Проектирование высотной опорной и деформационной сетей

С помощью программы можно выполнять уравнивание измерений. На рисунке 3.7 представлен внешний вид программы при решении задачи определения высоты деформационных марок.

The screenshot shows a software interface for determining the height of deformation marks. The window title is "Определение высоты деформационных марок".

On the left side, there are input fields for:

- Исходный пункт № ... (Initial point No. ...)
- Н исходного пункта, м (Height of initial point, m)
- Rp2 № ... (Point Rp2 No. ...)
- hпр, м (h_{пр}, m) and hобр, м (h_{обр}, m)
- Н Rp2, м (Height Rp2, m)

At the bottom left is a button labeled "Выполнить расчет" (Perform calculation).

On the right side, there is a control for the number of points: "Кол-во пунктов" 1, with plus and minus buttons. Below this is a table with the following columns: № (No.), пункт (point), высота (height), расстояние (distance), and пункт на оси (point on axis).

№	пункт	высота	расстояние	пункт на оси
Rp2	№ ...	, м	, м	<input type="checkbox"/>

Рисунок 3.7 – Окно ввода данных при определении высоты деформационных марок

Результаты расчёта могут быть применены к предварительному расчёту точности высотной опорной и деформационной сетей, их проектированию и уравниванию результатов измерений, т.е. на каждом этапе производства работ по наблюдению за осадками оснований автомобильных дорог на высоких насыпях.

Таким образом, программа обеспечивает выполнение следующих функций: задание исходных данных, расчёт СКО определения высоты деформационной марки, СКО определения высоты репера, проектирование и уравнивание высотной опорной и деформационной сетей.

На основании разработанной методики, которая была описана в главе 3, и рассмотренной выше программы были проведены экспериментальные исследования, которые включали проведение геодезического мониторинга автомобильной дороги при сооружении насыпи на слабом основании. Объект работ находился в Приморском крае.

Насыпь была возведена с применением ленточных дрен, которые были уложены в пределах конструкции земляного полотна. Выполнялся контроль за процессом протекания осадки, для проведения которого было отобрано 25 поперечников. Марки были установлены по оси, а также левому и правому краю насыпи в 1 м от края основной площадки. В процессе возведения насыпи марки наращивались. Схема размещения марок в контрольном поперечнике представлена на рисунке 3.8.

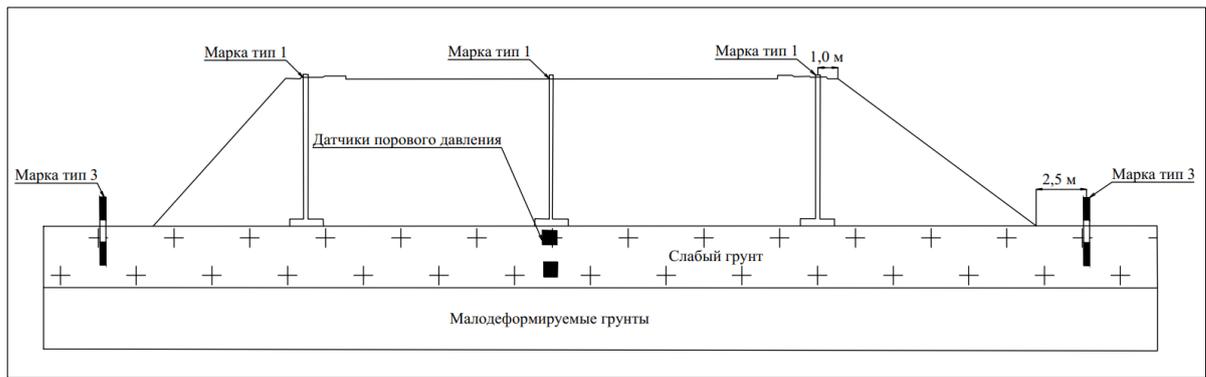


Рисунок 3.8 – Схема расположения марок в контрольном поперечнике

Отметим, что контроль осадок и определение скорости деформационного процесса основания насыпи во время ее возведения и после сооружения выполнялся по контрольным маркам (тип 1) геометрическим нивелированием. С целью предупреждения возможного выдавливания слабого грунта из основания насыпи в период ее возведения и до окончания процесса строительства проводились визуальные наблюдения за отклонениями марок (тип 3). Такие марки были установлены в контрольных поперечниках на расстоянии 2,5 м от насыпи.

В Приложении Б приведены результаты геодезического мониторинга на контрольном поперечнике ПК 10+00. Осадка в контрольном поперечнике ПК 10+00 представлена на рисунке 3.9. После отсыпки земляного полотна в пределах контрольных поперечников было установлено снижение темпа осадки.

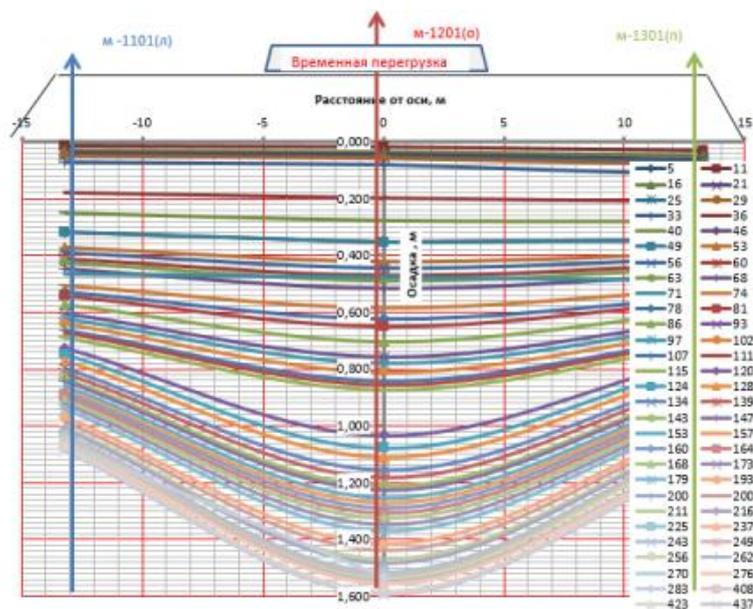


Рисунок 3.9 – Осадка в контрольном поперечнике ПК 10+00

Изменение скорости осадки во времени в контрольном поперечнике ПК 10+00 отражено на рисунке 3.10.

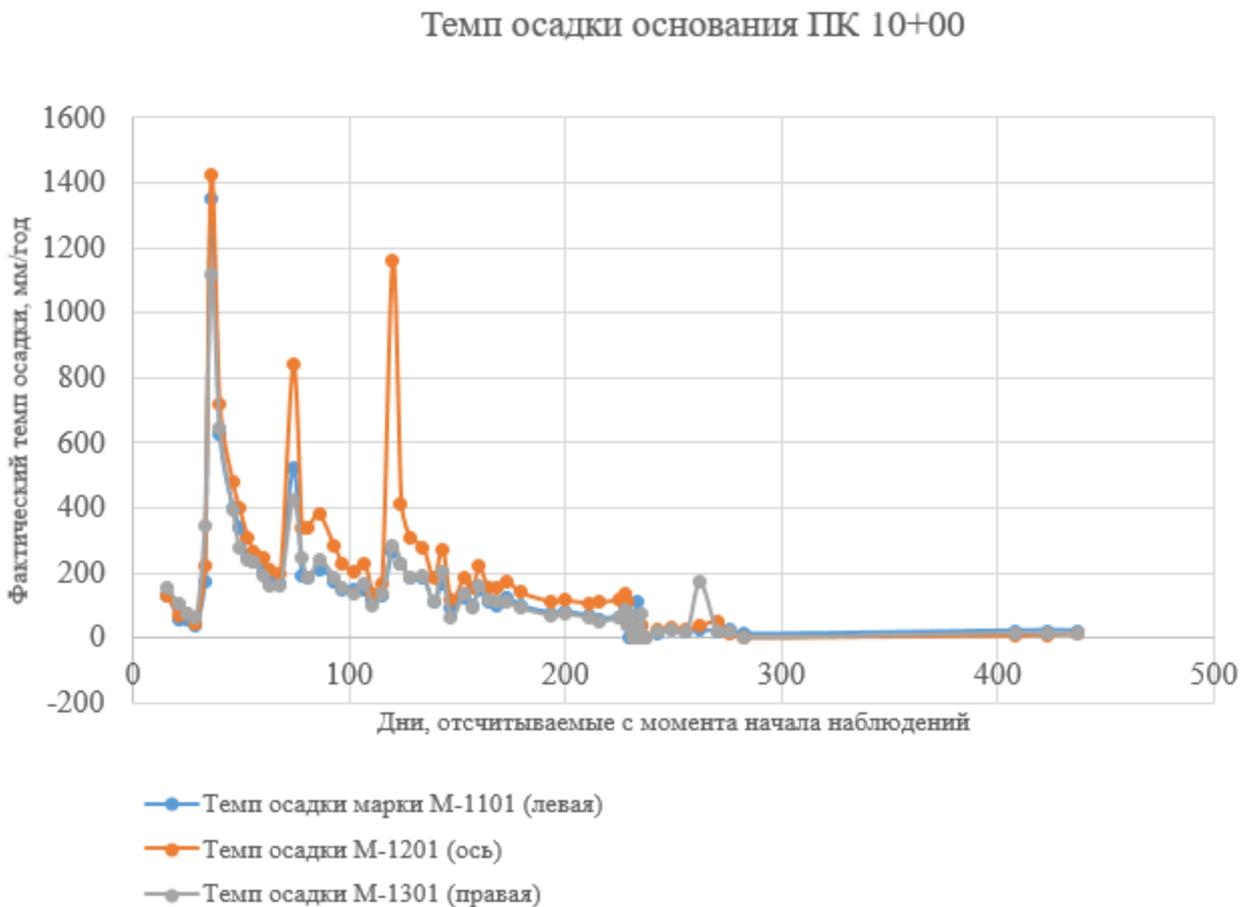


Рисунок 3.10 – Изменение темпа осадки в контрольном поперечнике ПК 10+00

Исходя из графика, можно сделать вывод о неравномерности протекания процесса осадки основания. Отметим, также, что на одном из поперечников было выявлено существенное увеличение скорости осадки, которое было вызвано складированием штабеля грунта, в связи с чем произошло изменение характеристик грунта основания. В соответствии с технологическим режимом возведения насыпи было выполнено снятие перегруза, что привело к незначительному подъему грунта. Выявлена разная осадка по маркам даже в пределах одного поперечника, а также существенное отличие значений осадок на соседних поперечниках, что указывает на изменчивость свойств слабых грунтов.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований подтверждена корректность разработанной методики по наблюдению за осадками оснований

автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью на основе геометрического нивелирования.

3.3 Экспериментальные исследования комплексного подхода на основе интеграции данных инженерного-геологических изысканий и геодезических работ

В качестве объекта был рассмотрен участок автомобильной дороги, который был расположен на слабом основании. В процессе работ было уточнено геологическое строение участка под проектируемой насыпью, в том числе были определены физико-механические свойства грунта.

Для этого было пробурено 16 скважин глубиной от 39,5 до 42,0 м. В основе разделения геологического разреза на инженерно-геологические элементы (ИГЭ) были положены принципы общности генетического типа, схожести литологического состава, статистической однородности показателей их физико-механических свойств.

На исследуемом участке в инженерно-геологических разрезах было определено восемь ИГЭ, которые были представлены насыпными грунтами (ИГЭ - 1), торфами и заторфованными песками (ИГЭ - 2), глинами текучими, суглинками текучими и текучепластичными (ИГЭ - 3), суглинками твердыми и мягкопластичными (ИГЭ - 4), супесями твердой и пластичной консистенции (ИГЭ - 5), песками разной крупности (ИГЭ - 6), а также супесями твердыми (ИГЭ - 7) и суглинками твердыми (ИГЭ - 8).

К слабым грунтам были отнесены торфы и заторфованные пески, глины текучие, суглинки текучие и текучепластичные, которые составляли ИГЭ-2 и ИГЭ-3.

Общий вид расчетной схемы представлен на рисунке 3.11, на котором инженерно-геологические элементы обозначены ИГЭ.

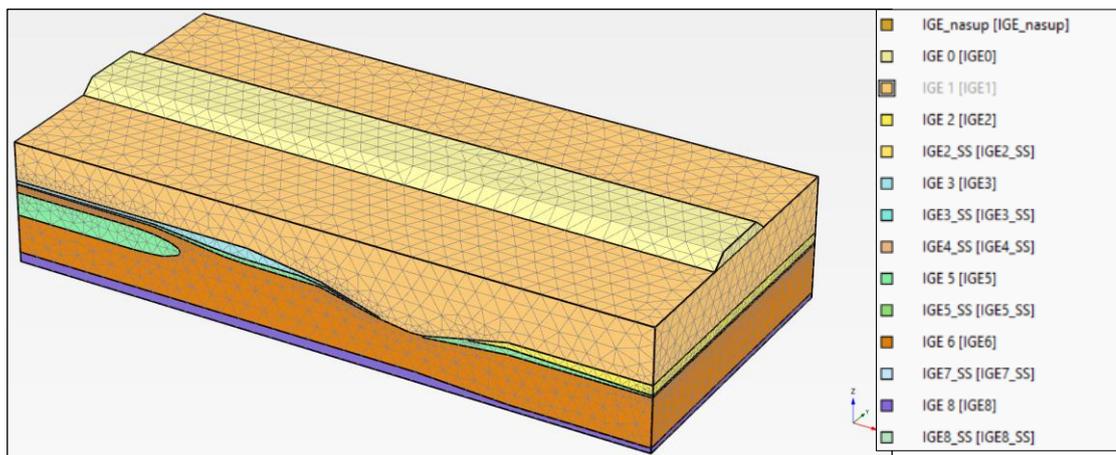


Рисунок 3.11 – Общий вид расчетной схемы

Для выполнения предварительной оценки осадки, возникавшей на различных этапах строительства, были осуществлены расчеты на основе метода конечных элементов в программном продукте PLAXIS 3D.

Данными для выполненного расчета послужили произведенные на объекте инженерно-геологические изыскания. Для моделирования слабых грунтов была применена модель SoftSoil, которая согласно рекомендациям [70] является наиболее оптимальной. Расчеты были выполнены в соответствии с технологическими этапами строительства в следующей последовательности:

- расчет природного напряженного состояния;
- отсыпка насыпи на проектную высоту;
- расчет времени консолидации;
- перегрузка насыпи;
- расчет времени консолидации;
- срезка перегрузки;
- расчет времени консолидации.

На рисунках 3.12 и 3.13 показаны предварительные значения осадок на этапе консолидации после срезки перегрузки.

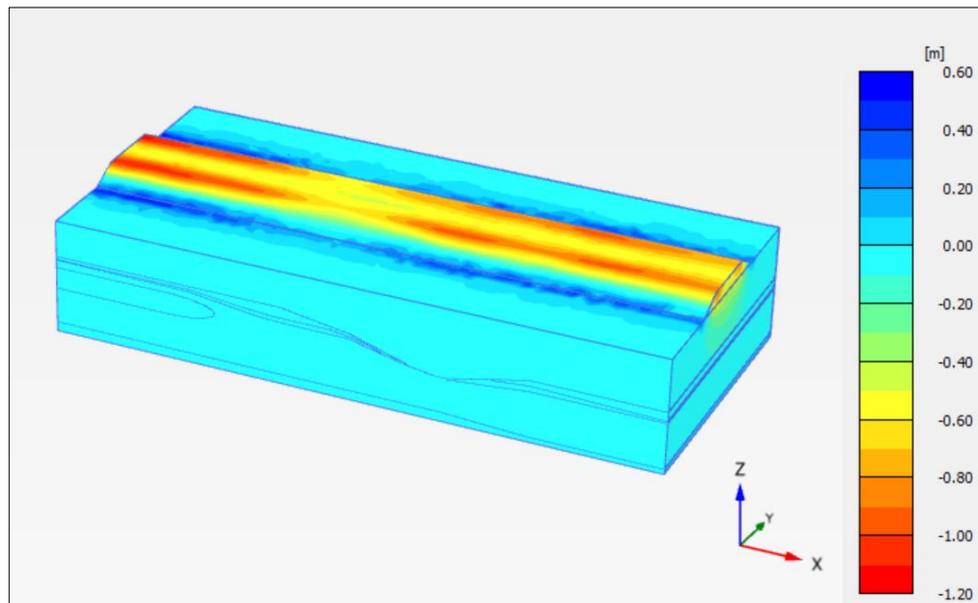


Рисунок 3.12 – Предварительные значения осадки на этапе консолидации

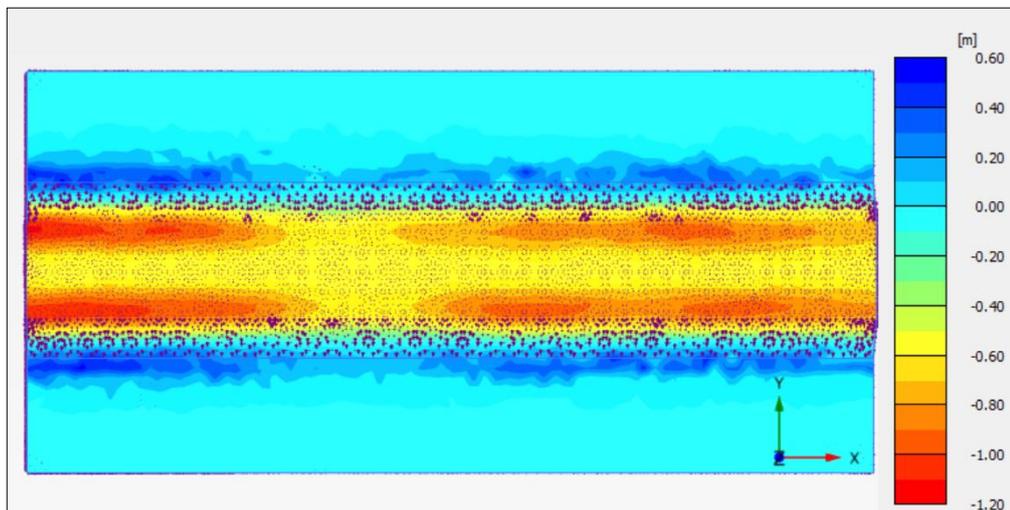


Рисунок 3.13 – Предварительные значения осадки на этапе консолидации. Вид сверху

Для верификации (корректировки) полученной модели необходимо выполнить сравнение предварительных значений осадок в узловых точках и результатов геодезического мониторинга. Поэтому в качестве узловых точек были выбраны места предварительного размещения осадочных марок. График изменения осадок марок в первом поперечнике представлен на рисунке 3.14. Марка 1 была расположена правой бровки, марка 2 – на оси, марка 3 – на расстоянии 1 м от левой бровки насыпи.

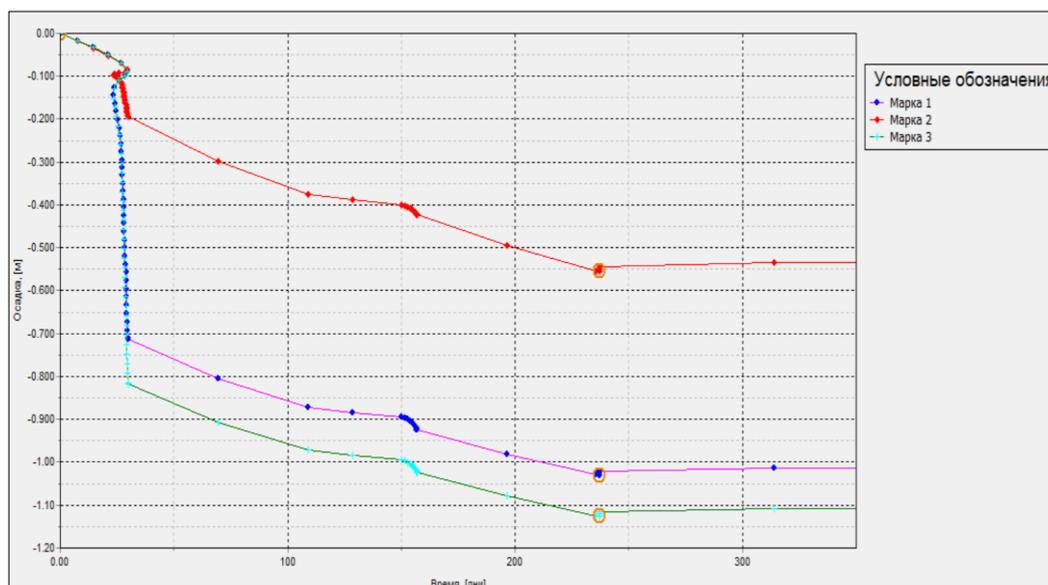


Рисунок 3.14 – График осадок марок, расположенных в контрольном поперечнике

Исходя из графика, можно сделать вывод о неравномерности осадки основания насыпи даже в пределах одного поперечника. Наименьшая осадка наблюдалась по марке, установленной на оси автомобильной дороги.

Ниже представлен график осадок марок в пределах двух поперечников (рисунок 3.15). На рисунке 3.15 марки 1.1-1.3 соответствуют предварительному размещению осадочных марок в первом поперечнике, расположенных на оси (марка 1.2) и на расстоянии одного метра от левой (марка 1.1) и правой (марка 1.3) бровок насыпи. Аналогично марки 2.1-2.3 соответствуют предварительному расположению марок второго поперечника. Отметим, что поперечники предполагалось устраивать через каждые 50 м.

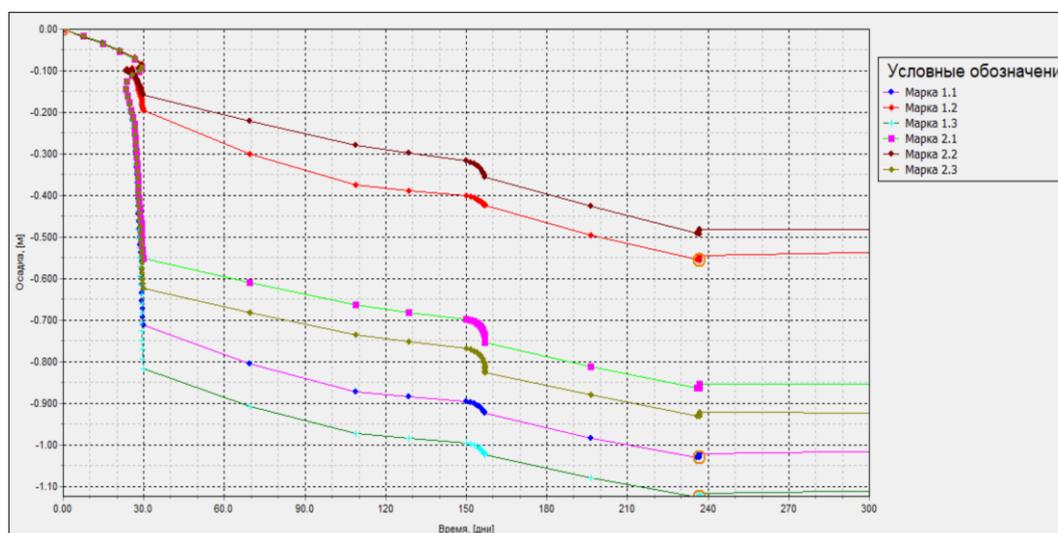


Рисунок 3.15 – График осадок марок в пределах двух контрольных поперечников

Подчеркнем, что для кривых осадок было характерно несколько циклов возрастания и затухания осадок. В рассмотренном случае циклы согласовывались с технологическими режимами строительства насыпи.

В соответствии с выполненным расчетом наименьшее значение осадки было выявлено по оси автомобильной дороги.

Отметим, что была определена зона влияния насыпи и места наибольшего выпора грунта. Таким образом, проектирование высотной опорной сети было выполнено вне зоны возможного влияния насыпи.

Также в программном продукте PLAXIS 3D критерий 90% от величины максимального избыточного порового давления не соответствует критерию свода правил [86]. Для того, чтобы получить требуемые нормативные сроки (2 см/год для дорожных одежд капитального типа и 5 см/год для облегченного типа) необходимо на графике зависимости осадки от времени провести линию, отложив 1 год по оси времени и, соответственно, требуемое значение интенсивности по оси осадки. На следующем этапе, при помощи параллельного переноса необходимо перенести данную линию в точку, к которой она будет являться касательной.

По результатам выполненных расчетов время завершения консолидации насыпи составило 275 дней.

Далее, после выполнения 5 циклов геодезического мониторинга была проведена верификация модели. Результаты, полученные по комплексной геомеханической модели, отличались от фактических на 7,3%.

3.4 Выполнение прогнозирования осадок оснований автомобильных дорог на основе методов машинного обучения по геодезическим данным

Прогнозирование было выполнено на примере объекта «Строительство автомобильной дороги Владивосток-Находка-порт Восточный в Приморском крае». В качестве примера проанализированы два поперечника (шесть деформационных марок) строящейся автомобильной дороги.

Для прогнозирования использованы данные геодезического мониторинга за один год – значения частных осадок шести деформационных марок. Заметим, что значения частных осадок s_i вычислялись по формуле 3.1:

$$s_i = Z_i - Z_{i-1}, \quad (3.1)$$

где Z_i – отметка марки на i -ый момент времени, м;

Z_{i-1} – отметка марки на $i-1$ момент времени, м. Всего было выполнено 58 циклов измерений.

Графики частных осадок контрольных поперечников ПК 37+00 и ПК 38+00 представлены на рисунках 3.16-3.17.

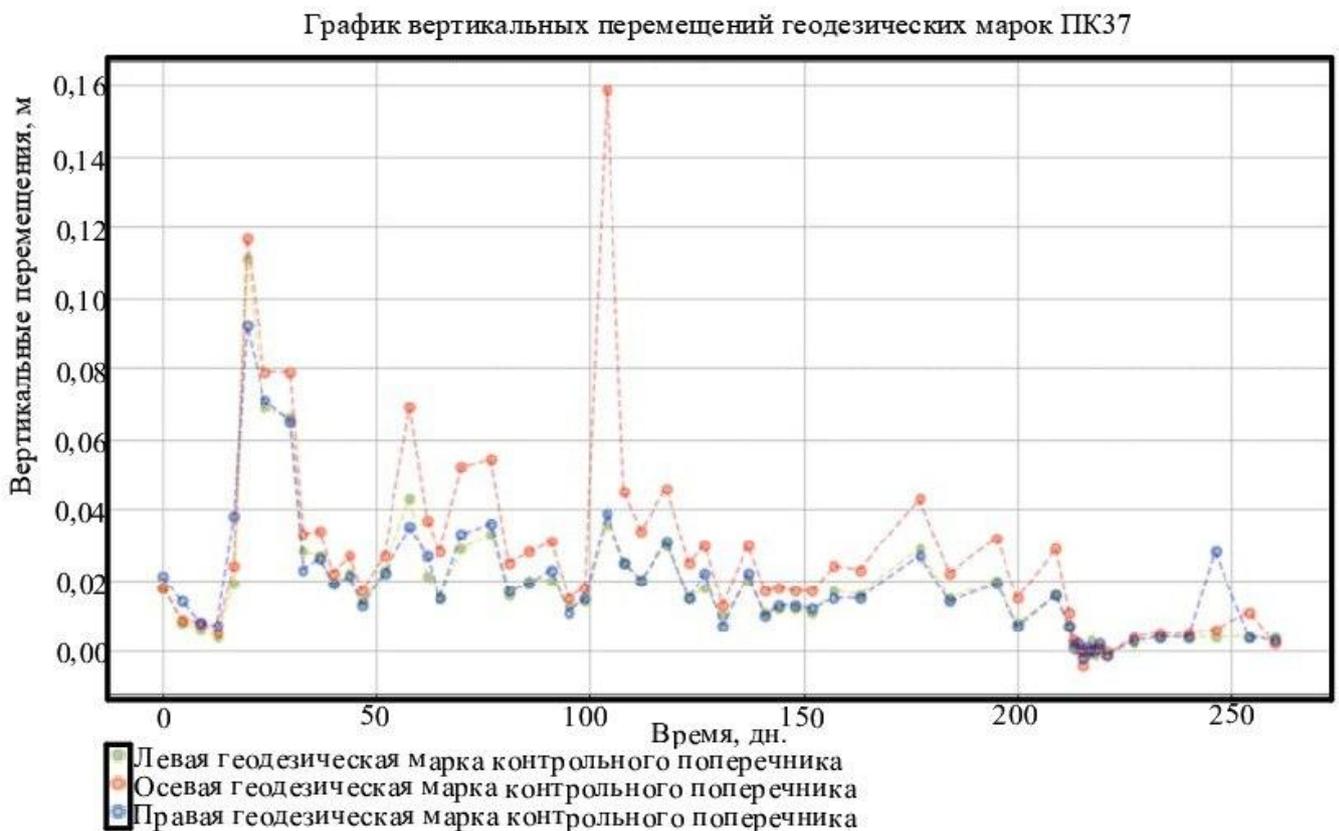


Рисунок 3.16 – График частных осадок марок, расположенных на контрольном поперечнике ПК 37+00



Рисунок 3.17 – График частных осадок марок, расположенных на контрольном поперечнике ПК 38+00

Также были рассчитаны основные статистические характеристики геодезических данных (таблица 3.6)

Таблица 3.6 – Основные статистические характеристики геодезических данных

Номер марки	Стандартное отклонение, м	Минимальное значение осадки, м	Максимальное значение осадки, м
М-1101 (ПК 37+00 левая)	0,019	-0,001	0,111
М-1201 (ПК 37+00 ось)	0,028	-0,004	0,159
М-1301 (ПК 37+00 правая)	0,017	-0,002	0,092
М-2101 (ПК 38+00 левая)	0,011	0,001	0,053
М-2201 (ПК 38+00 ось)	0,021	-0,001	0,095
М-2301 (ПК 38+00 правая)	0,017	-0,001	0,123

В качестве метеорологических данных были использованы следующие значения, синхронизированные с моментом геодезических измерений: температура окружающей среды, давление, скорость и направление ветра.

Рассмотрено два случая:

– прогнозирование по геодезическим данным. Тогда единственным признаком, используемым в решении задачи прогнозирования, является дата выполнения наблюдений, а целевым признаком – частная осадка марки контрольного поперечника;

– выполнение прогноза по геодезическим и метеорологическим данным с последующим выявлением значимых признаков.

В каждом случае сформирован набор данных. В качестве способа хранения дат была использована разница в днях между текущим днем и днем выполнения нулевого цикла нивелирования. На следующем этапе была выполнена предобработка данных: перевод дат в необходимый формат, удаление пропущенных значений. Для увеличения скорости сходимости вычислительного процесса данные были нормированы. Отметим, что при использовании данных о направлении ветра было проведено кодирование категориальных переменных.

После подготовки и анализа данных было выполнено его разделение на обучающий и тестовый. Отметим, что тестовый набор не был использован на этапе обучения моделей. Затем были созданы прогнозные модели выбранными методами машинного обучения. Для каждой модели были подобраны параметры. Их расчет выполнялся с применением перекрестной проверки, которая исключает риск переобучения моделей. Подчеркнем, что для временных рядов перекрестная проверка выполняется на скользящей основе.

Создание прогнозных моделей было проведено на основе следующих методов машинного обучения:

- линейная регрессия (Linear Regression);
- адаптивная регрессия на основе градиентного спуска (SGD Regression);
- метод случайного леса (Random Forest Regression);
- метод опорных векторов (Support Vector Regression);

– Light Gradient Boosting Machine (LightGBM).

Для каждого метода была построена кривая обучения (рисунок 3.18), отражающая функцию ошибок в зависимости от объема тренировочной выборки.

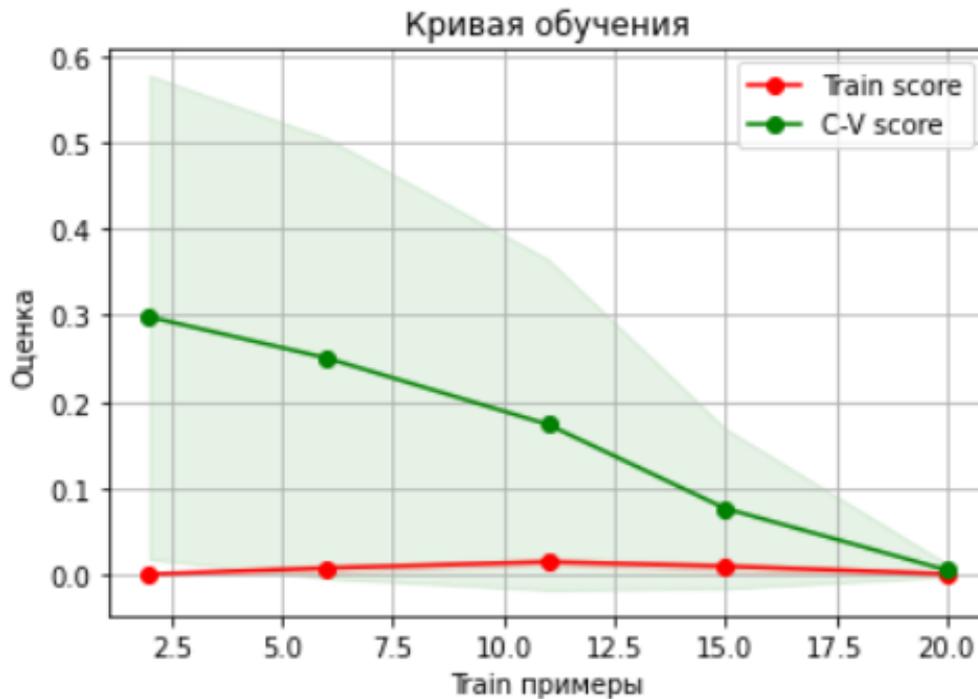


Рисунок 3.18 – Кривая обучения для адаптивной прогнозной модели на основе градиентного спуска

Исходя из кривой обучения, был сделан вывод, что по мере увеличения объема выборки средняя квадратическая ошибка и кросс-валидация сходились. В рассмотренном случае для большинства методов двадцати значений было достаточно для выполнения прогнозирования.

Отметим, что в тестовая выборка состояла из 6 измерений. На рисунках 3.19-3.20 представлены результаты прогноза адаптивной прогнозной модели на основе градиентного спуска и модели на основе метода опорных векторов.

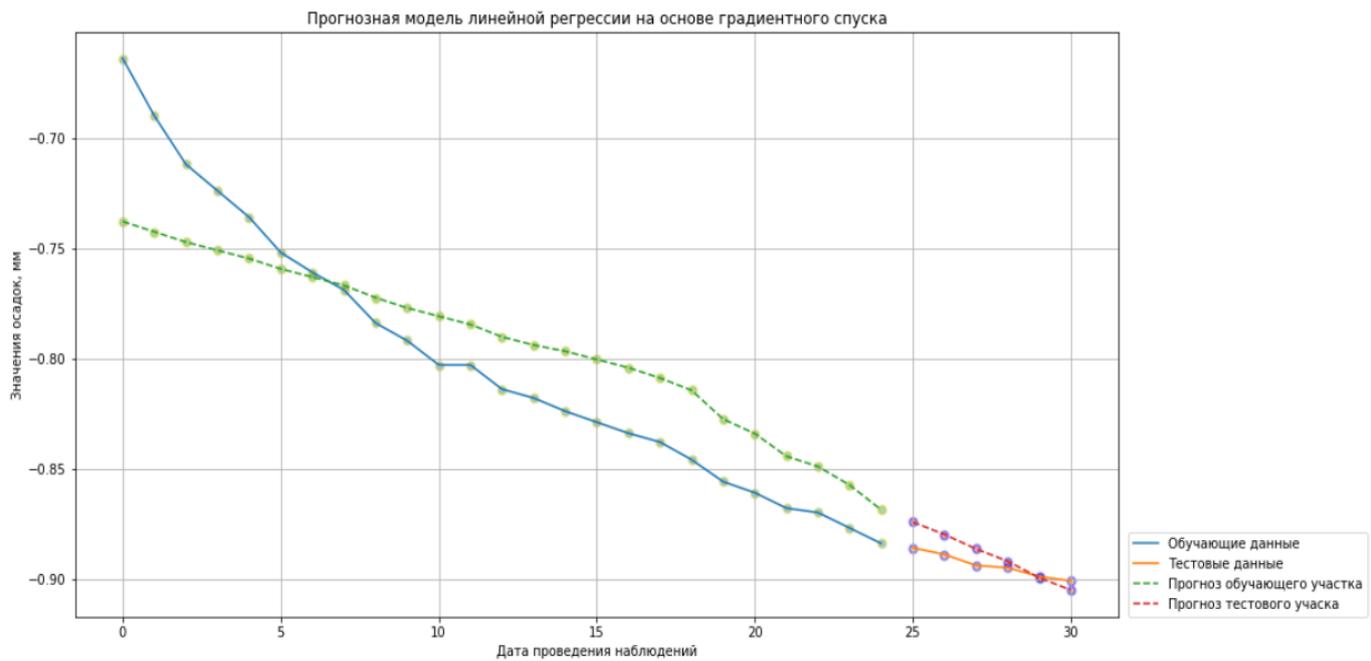


Рисунок 3.19 – Адаптивная прогнозная модель на основе градиентного спуска

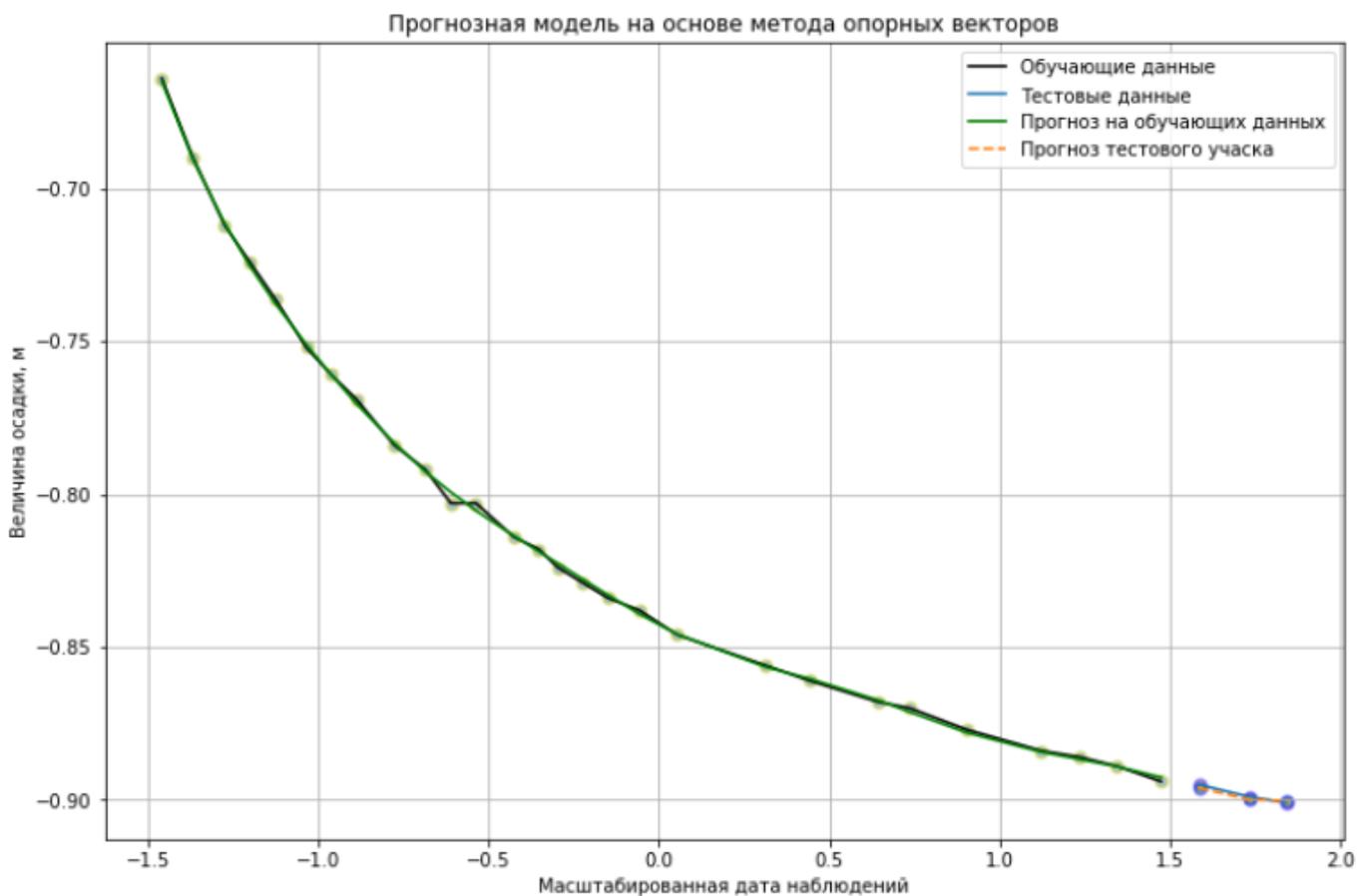


Рисунок 3.20 – Прогнозная модель на основе метода опорных векторов

В таблице 3.7 представлены результаты расчета СКО прогноза частных осадок рассмотренными методами.

Таблица 3.7 – Расчет *RMSE* определения частных осадок при прогнозировании рассмотренными методами

Метод прогнозирования	СКО прогноза, м					
	М-1101	М-1201	М-1301	М-2101	М-2201	М-2301
Linear Regression	0,004	0,012	0,009	0,003	0,008	0,006
SGD Regression	0,002	0,004	0,009	0,003	0,003	0,002
Random Forest Regression	0,003	0,005	0,008	0,004	0,005	0,004
Support Vector Regression	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002
Light Gradient Boosting Machine	0,011	0,019	0,012	0,006	0,007	0,006

Отметим, что при выполнении прогнозирования с добавлением метеорологических данных и вычислении главного компонента не было выявлено уменьшения *RMSE* (минимальное значение составило 0,009 м), что также обусловлено слабой корреляционной зависимостью. Далее было выполнено определение важности признаков путем расчета их весов при создании модели.

Веса признаков составили:

- температура окружающей среды – 0,148;
- атмосферное давление – 0,009,
- скорость ветра – 0,003;
- направление ветра – 0,001.

Таким образом, в результате проведенного анализа, можно сделать следующие выводы:

1. При прогнозировании осадок каждой из марок наименьшее значение *RMSE*, не превышавшее 0,003 м, было получено при применении метода Support Vector Regression.

2. Большие значения *RMSE* методов Linear Regression, Light Gradient Boosting Machine наблюдаются на марках с резким всплеском значений осадок.

3. Наибольшее значение $RMSE$ выявлено при прогнозировании методом Light Gradient Boosting Machine.

4. При составлении прогнозной модели с добавлением метеорологических данных и вычислении главного компонента не было выявлено уменьшения $RMSE$ (минимальное значение составило 0,009 м). Определена важность признаков путем расчета их весов при составлении модели. Веса признаков составили: температура окружающей среды – 0,148; атмосферное давление – 0,009, скорость ветра – 0,003; направление ветра – 0,001. Таким образом, учет этих факторов не целесообразен.

3.5 Выполнение прогнозирования осадок оснований автодорог на основе нейронной сети

Как было отмечено выше, применение нейронных сетей предоставляет возможность осуществлять долгосрочное прогнозирование.

Экспериментальные исследования по прогнозированию осадок оснований автомобильной дороги в Приморском крае были выполнены на основе рекуррентной нейронной сети долговременной и кратковременной памяти (LSTM). Двумя основными типами LSTM-моделей, которые можно применять для многошагового прогнозирования, являются следующие: Vector Output Model (модель векторного вывода) и Encoder-Decoder (кодер-декодер). В рамках данного исследования была применена модель Encoder-Decoder.

На первом этапе была исследована возможность долгосрочного прогнозирования осадок по результатам геодезического мониторинга. Для этого, ввиду неравномерного шага наблюдений (временного интервала между циклами) и необходимости большого количества обучающих выборок, была выполнена интерполяция недостающих значений и был сформирован временной ряд. В рассматриваемом случае смоделированы ежедневные измерения. В Приложении Б представлен фрагмент используемых данных для выполненного прогноза (значения осадок в поперечнике) до проведения моделирования.

Отметим, что временной ряд необходимо разделить на несколько выборок с компонентами ввода и вывода, при этом эти компоненты могут состоять из нескольких шагов. Для разделения временного ряда на несколько выборок была написана функция, которая разделяла одномерный ряд (временной ряд, состоящий из значений осадок оснований автомобильной дороги) на несколько выборок с заданным числом входных и выходных шагов.

Обратим внимание на то, что в рассматриваемой модели подмодель кодировщика выполняла чтение и интерпретацию входных данных, а на выходе получала вектор фиксированной длины.

Заметим, что процесс обучения нейронной сети достаточно трудоемкий и требует большой вычислительной мощности. Для повышения скорости обучения была проведена нормализация временного ряда, т.е. исходный набор данных был преобразован в новый со средним значением равным 0 при стандартном отклонении 1. Затем полученные значения подавались на вход созданной модели нейронной сети.

Нейронная сеть состояла из двух слоев, в качестве функции активации была применена ReLu (выпрямленная линейная функция). Для каждого гиперпараметра модели был выбран диапазон возможных значений и был выполнен перебор всех комбинаций этих значений. В качестве функции потерь была выбрана средняя квадратическая ошибка. Был применен алгоритм оптимизации Adam, который для адаптации скорости обучения параметров вычисляет экспоненциальное скользящее среднее градиента и квадратичный градиент.

Отметим, что данные были разбиты на обучающий и тестовый наборы в соотношении 75:25 соответственно.

Прогноз выполнялся на 109 дней вперед. Отметим, что данные по 327 дням были использованы для обучения моделей. Результаты по каждой из полученных 16256 моделей вносились в файл .xls. Также был исследован размер шага, необходимого для построения прогноза. Результаты подбора параметров в зависимости от значений СКО прогноза представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты подбора параметров в зависимости от значений СКО

Размер окна, для построения прогноза	Число нейронов на первом слое	Число нейронов на втором слое	СКО прогноза, мм
5	17	23	0,052
5	27	21	0,093
4	34	42	0,094
7	16	40	0,099
4	30	12	0,099

Проведенный анализ показал, что наименьшее значение СКО прогноза было получено LSTM со следующими параметрами: размером окна, составляющим 5 измерений, числом нейронов на первом слое равным 17 и с 23 нейронами на втором слое, – и составило 0,052 мм. Таким образом, представленные результаты показывают возможность выполнения долгосрочного прогнозирования на основе LSTM-модели.

На следующем этапе были использованы данные геотехнического мониторинга. Для рассматриваемого объекта было определено избыточное поровое давление на глубине 2,5 м ($\Delta u_{2,5м}$) и 4,5 м ($\Delta u_{4,5м}$), что привело к необходимости выполнения многомерного и многошагового прогноза временных рядов. Использование порового давления обусловлено корреляционной зависимостью между величиной осадки и избыточным поровым давлением. Как и в случае одномерного прогнозирования по результатам геодезических измерений необходимо смоделировать равномерность измерений, т.е. одинаковый временной шаг между циклами наблюдений.

Так как необходимо было сравнить точность прогноза одномерного многошагового прогнозирования с многомерным, то прогноз был выполнен с аналогичными данными с добавлением указанных выше дополнительных параметров. При этом сравнивался прогноз только для тех марок, которые

расположены на оси автомобильной дороги (в местах установки датчиков порового давления).

В этом случае также была применена модель Encoder-Decoder. Функция активации, функция потерь и оптимизатор были аналогичны модели прогнозирования осадок по результатам геодезических измерений.

Для каждого из параметров (осадки, величины избыточного порового давления на глубинах 2,5 м и 4,5 м) была создана отдельная LSTM-модель. Далее был выполнен подбор числа нейронов на каждом из слоев и количество шагов «в прошлое» для выполнения прогнозирования. На каждом шаге предсказания необходимо было подать n предыдущих результатов на вход в каждую из трех сетей. Затем на выходе каждой сети был получен один предсказанный параметр для выполнения следующего шага. После этого была произведена группировка трех предсказанных параметров, эти значения были добавлены в конец последовательности и вновь было выполнено прогнозирование на следующий шаг. Количество раз повтора представленных действий согласуется с требуемым количеством шагов для предсказания.

Описанный алгоритм предсказания осадок по данным геотехнического мониторинга отображен на рисунке 3.21.

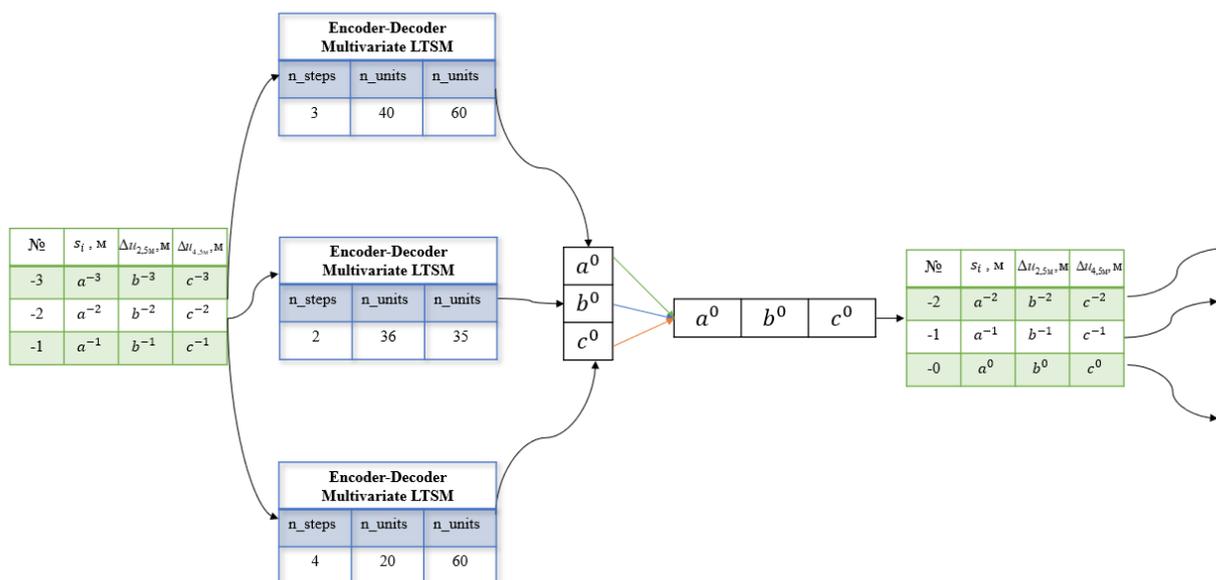


Рисунок 3.21 – Общий алгоритм предсказания осадок по данным геотехнического мониторинга

Наименьшие значения СКО прогноза представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты прогнозирования на основе данных геотехнического мониторинга

Номер модели	СКО прогноза, мм
1	0,046
2	0,086
3	0,893

В результате оценки полученных прогнозных значений было выявлено уменьшение СКО прогноза. Таким образом, с учетом дополнительных факторов наблюдалось увеличение точности прогнозирования на 5-7%.

3.6 Выводы по главе 3

1. Реализована методика по преобразованию геодезических высот, полученных с помощью ГНСС-аппаратуры, в систему нормальных высот на основе создания локальной модели квазигеоида по остаточному и волновому методам. Для рассмотренного объекта модель была построена интерполяционным методом минимальной кривизны. Получено, что для рассмотренного объекта при расстоянии между опорными пунктами, составлявшем 8 км, возможно получение нормальных высот, с точностью, удовлетворяющей точности нивелирования III класса.

2. Методика по наблюдению за осадками оснований автомобильных дорог, разработанная в исследовании, реализована на объекте Приморского края. Результаты выполненного мониторинга выявили неравномерность процесса протекания осадки.

3. Осуществлено построение комплексной геомеханической модели, на основе которой было выполнено проектирование высотной опорной геодезической сети вне зоны влияния насыпи, а также определены зоны

возможного выпора грунта, дана предварительная оценка процесса протекания осадки основания на разных этапах возведения насыпи.

4. Осуществлен прогноз осадок на участке автомобильной дороги Приморского края, который показал:

– наименьшее значение СКО прогноза, не превышавшее 0,003 м, было получено при применении метода опорных векторов;

– большие значения СКО прогноза методов Linear Regression, Light Gradient Boosting Machine наблюдаются на марках с резким всплеском значений осадок;

– наибольшее значение СКО прогноза выявлено при прогнозировании методом Light Gradient Boosting Machine;

– при составлении прогнозной модели с добавлением метеорологических данных и вычислении главного компонента не было выявлено уменьшения СКО прогноза (минимальное значение составило 0,009 м). Определена степень влияния признаков на процесс протекания осадки основания автомобильной дороги путем расчета их весов при составлении модели. Веса признаков составили: температура окружающей среды – 0,148; атмосферное давление – 0,009, скорость ветра – 0,003; направление ветра – 0,001. Таким образом, учет этих факторов не целесообразен.

5. Выполнено создание LSTM-моделей для одномерного и многомерного многошагового прогнозирования. Результаты показали, что по сравнению с методами машинного обучения, возможно увеличить горизонт прогнозирования. При прогнозировании по данным геотехнического мониторинга с учетом избыточного порового давления на глубинах 2,5 м и 4,5 м было выявлено увеличение точности прогноза на 5-7% по сравнению с одномерным прогнозированием по геодезическим данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Обоснованы требования к точности перехода от геодезических высот, получаемых с помощью ГНСС-технологии, в систему нормальных высот.

2. Предложена и теоретически обоснована методика преобразования геодезических высот в систему нормальных высот на основе создания локальной модели квазигеоида, обеспечивающая точность определения нормальных высот для заданного класса нивелирования, а также автоматический ввод поправок в геодезические высоты в любых точках, принадлежащих созданной модели.

3. Определены необходимые этапы для выполнения проектирования числа исходных пунктов на основе глобальной модели геоида EGM2008:

– выбор в районе работ пунктов с известными нормальными высотами и определения соответствующих им высот геоида с помощью глобальной модели EGM2008;

– вычисление разности высот и создание локальной модели на ее основе;

– определение параметров преобразования высот и ввод переменных поправок;

– выполнение сравнения ожидаемой СКО определения высот пунктов для заданного класса геометрического нивелирования с СКО определения нормальных высот по контрольным точкам.

4. Разработана методика определения осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах с использованием геометрического нивелирования.

5. Предложен комплексный подход к мониторингу осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах на основе интеграции результатов инженерно-геологических изысканий и геодезических работ, который включает:

– создание комплексной геомеханической модели на основе выполненных инженерно-геологических изысканий;

– получение предварительной оценки скорости протекания деформационного процесса, а также максимальной величины осадки;

- проектирование схемы расположения деформационных марок на основе анализа напряженно-деформированного состояния;
- выполнение геодезического мониторинга;
- сравнение результатов, полученных с помощью комплексной геомеханической модели, и данных геодезического мониторинга;
- верификация комплексной геомеханической модели и корректировка расчетных характеристик грунтов;
- расчет необходимого временного интервала между циклами наблюдений;
- получение прогнозных значений порового давления для применения в качестве параметра при составлении прогноза осадок на основе нейронной сети.

6. Разработана методика выполнения прогнозирования на основе методов машинного обучения по геодезическим данным.

7. Предложено создание прогнозной модели по результатам геотехнического мониторинга на основе рекуррентной нейронной сети долговременной и кратковременной памяти, что приводит к увеличению горизонта прогнозирования.

Перспективы развития темы диссертации связаны с применением методов машинного обучения и нейронных сетей для прогнозирования деформаций автомобильных дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврунев, Е.И. Анализ стабильности исходных пунктов на основании спутниковых определений в геодезической сети сгущения / Е.И. Аврунев // Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 3. – № 2. – С. 127-132.

2. Аль Фатин, Х.Д. Методика оценки деформаций водоподпорных плотин / Х.Д. Аль Фатин, М.Г. Мустафин // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 45-56. – DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-45-56.

3. Афонин, Д.А. Геодезический контроль деформаций при строительстве городских подземных сооружений открытым способом: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д.А. Афонин. – СПб., 2013. – 183 с.

4. Афонин, Д.А. Опыт применения наземного лазерного сканирования при обследовании инженерных сооружений / Д.А. Афонин, Н.Н. Богомолова, М.Я. Брынь, А.А. Никитчин // Геодезия и картография. – 2020. – № 4. – С. 2-8. – DOI: 10.22389/0016-7126-2020-958-4-2-8.

5. Баранов, В.Н. Применение модельного подхода для оценки профиля оседания на территории нефтедобычи с помощью блочного метода и искусственной нейронной сети / В.Н. Баранов, Д.А.К. Кутени // Великие реки 2020: Труды научного конгресса 22-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 27–29 мая 2020 года / Ответственный редактор А.А. Лапшин. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 272-276.

6. **Баширова, Д.Р.** Геодезический мониторинг оснований автомобильных дорог на высоких насыпях / Д.Р. Баширова // Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса

студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15-21 мая 2022 г. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – Т. 2. – С. 87-90.

7. **Баширова, Д.Р.** Методика определения осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях / Д.Р. Баширова, М.Я. Брынь, Д.А. Кривонос // Геодезия и картография. – 2022. – Т. 83. – № 5. – С. 2-10. – DOI: 10.22389/0016-7126-2022-983-5-2-10.

8. **Баширова, Д.Р.** Моделирование локальной поверхности квазигеоида на линейных объектах / Д.Р. Баширова // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование. Сб. материалов IV Всероссийской науч.-практ. конф. 2021 г., Санкт-Петербург / Науч. ред. И.Е. Сидорина. — СПб.: Политехника, 2021. – С. 189-192. – DOI: 10.25960/7325-1191-8.

9. **Баширова, Д.Р.** Применение мобильного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотной авиационной системы и съемки с комплексной дорожной лаборатории при эксплуатации автомобильных дорог / Д.Р. Баширова, М.Я. Брынь // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 19–26 апреля 2021 года. – СПб: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. – С. 13-15.

10. **Баширова, Д.Р.** Прогнозирование осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях на основе машинного обучения по данным геодезических измерений / Д.Р. Баширова, М.Я. Брынь, Д.А. Кривонос // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27. - № 5. – С. 19-29. – DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-5-19-29.

11. Беспалов, Ю.А. Наблюдение за осадками зданий и сооружений способом тригонометрического нивелирования / Ю.А. Беспалов, Ю.П. Дьяконов, Т.Ю. Терещенко // Геодезия и картография. – 2010. – № 8. – С. 8-10.

12. Брынь М.Я. Построение прогнозной модели поисковым методом нелинейного программирования по геодезическим данным / М.Я. Брынь, Г.Г. Шевченко // Инженерные изыскания. – 2019. – Т. 13. – №4. – С. 48-58. – DOI: 10.25296/1997-8650-2019-13-4-48-58.

13. Брынь, М.Я. Методика определения нормальных высот пунктов по результатам спутниковых измерений для строительства и реконструкции автомобильных дорог / М.Я. Брынь, **Д.Р. Баширова** // Инженерные изыскания. – 2021. – Т. 15. – № 3-4. – С. 20-29. – DOI: 10.25296/1997-8650-2021-15-3-4-20-29.

14. Брынь, М.Я. Разработка методов повышения точности геодезического обеспечения городского кадастра: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / М.Я. Брынь. – СПб., 2015. – 275 с.

15. Брынь, М.Я. Сравнительная оценка мобильного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотной авиационной системы и съемки с комплексной дорожной лаборатории при выполнении диагностики автомобильных дорог / М.Я. Брынь, **Д.Р. Баширова**, А.Г. Багишян // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 211-221. – DOI: 10.20295/1815-588X-2021-2-211-221.

16. Брынь, М.Я. Сравнительная оценка эффективности мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов при съемке автомобильных дорог / М.Я. Брынь, **Д.Р. Баширова** // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 3. – С. 20-27. – DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-20-27.

17. Вальков, В.А. Геодезические наблюдения за процессом деформирования высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В.А. Вальков. – СПб., 2015. – 158 с.

18. Войтенко, А.В. Построение локальной модели квазигеоида на территорию Омской области с использованием результатов уравнивания спутниковой геодезической сети / А.В. Войтенко, В.Л. Быков // Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 1. – № 3. – С. 43-48.

19. Ганагина, И.Г. Создание модели квазигеоида на локальном участке средствами ГИС / И.Г. Ганагина, Д.С. Челнокова, Д.Н. Голдобин // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – №3. – С. 14-25.

20. Ганьшин, В.Н. Геодезические методы измерения вертикальных смещений и анализ устойчивости реперов / В.Н. Ганьшин, А.Ф. Стороженко, Н.А. Буденко и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 190 с.

21. Геодезические работы при строительстве подземной части 2-й сцены Мариинского театра в Санкт-Петербурге / Д.А. Афонин, Е.С. Богомолова, М.Я. Брынь [и др.] // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 329-333.

22. Голюк, В.П. Комплексный подход к геодезическому контролю укладки асфальтобетонного покрытия на примере строительства автодорожного мостового перехода через Керченский пролив / В.П. Голюк, Д.Г. Назаров // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – №1. – С. 106-119.

23. ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.10.2012 г. № 599-ст: дата введения 2013-07-01. –М.: Стандартинформ, 2012. – 29 с.

24. ГОСТ 32869 – 2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению топографо-геодезических изысканий. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и

метрологии от 27 февраля 2015 г. N 110-ст: дата введения 2015-07-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 40 с.

25. ГОСТ 33063-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Классификация типов местности и грунтов. Основные положения: межгосударственный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 августа 2015 г. N 1118-ст: дата введения 2015-12-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 54 с.

26. ГОСТ 33100-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 августа 2015 г. N 1205-ст: дата введения 2016-02-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 35 с.

27. ГОСТ 33382-2015. Дороги автомобильные общего пользования. Техническая классификация. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 августа 2016 г. N 998-ст: дата введения 2016-09-08. – М.: Стандартиформ, 2016. – 7 с.

28. ГОСТ 59120-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 марта 2021 г. N 121-ст: дата введения 2021-05-01. – М.: Стандартиформ, 2021. – 23 с.

29. ГОСТ Р 55024 – 2012. Сети геодезические. Классификация. Общие технические требования. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального

агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 октября 2012 г. N 470-ст: дата введения 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 10 с.

30. ГОСТ Р 56408 – 2015. Глобальная навигационная спутниковая система. Сети геодезические спутниковые. Общие требования. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 мая 2015 г. N 454-ст: дата введения 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 11 с.

31. ГОСТ Р 59865 – 2022. Дороги автомобильные общего пользования. Сети геодезические для проектирования и строительства. Общие требования. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 марта 2022 г. N 124-ст: дата введения 2022-04-01. – М.: Стандартинформ, 2022. – 40 с.

32. Гувеннов, М.Б. Разработка методики научно обоснованного выбора модели высот квазигеоида при постобработке результатов спутникового нивелирования в составе инженерно-геодезических изысканий для строительства / М.Б. Гувеннов // Инженерные изыскания. – 2011. – №8. – С. 34-36.

33. Гувеннов, М.Б. Разработка методики научно обоснованного выбора модели высот квазигеоида при постобработке результатов спутникового нивелирования на линейных объектах большой протяженности / М.Б. Гувеннов // Инженерные изыскания. – 2012. – №2. – С. 46-63.

34. Гуляев, Ю.П. Неразрушающий контроль и математическое моделирование деформаций оснований фундаментов по топографо-геодезическим измерениям / Ю.П. Гуляев, П.Ю. Гуляев // Современная техника и технологии. – 2015. – № 11(51). – С. 93-96.

35. Гуляев, Ю.П. Построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС (2004-2007 гг.) / Ю.П. Гуляев,

В.С. Хорошилов, Н.Н. Кобелева // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 16-20.

36. Гуляев, Ю.П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений [Текст]: монография / Ю.П. Гуляев. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 256 с.

37. Добрыневский, Н.А. Использование BIM технологий в строительстве линейных объектов / Н.А. Добрыневский, О.С. Царева // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Т. 3. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 18-21.

38. Дьяков, Б.Н. Сравнительный анализ способов Костехеля и Марчака / Б.Н. Дьяков // Маркшейдерский вестник. – 2009. – №6. – С. 43-46.

39. Елагин, А.В. Вычисление высот квазигеоида по глобальным моделям геопотенциала / А.В. Елагин // Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 1. – № 1. – С. 85-89.

40. Жуков, Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий: монография / Б.Н. Жуков. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 356 с.

41. Зайцев, А.К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений / А.К. Зайцев, С.В. Марфенко, Д.Ш. Михелев и др. – М.: Недра, 1991. – 272 с.

42. Инновационный подход к построению опорных геодезических сетей линейных объектов / А.В. Астапович, П.А. Сазонов, С.М. Соколов [и др.] // Геодезия и картография. – 2015. – № 10. – С. 2-7. – DOI: 10.22389/0016-7126-2015-904-10-2-7.

43. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов ГКИНП (ГНТА)-03-010-03, [утв. Федеральной службой геодезии и картографии России от 01.02.2004]. – М.: ЦНИИГАиК, 2004. – 98 с.

44. Исследования по созданию локальных моделей геоида для прибрежных территорий Египта / В.Н. Баранов, М.А. Елшеви, М. Эль, Ч.Т. Фунг // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 1. – С. 32-38. – DOI 10.17513/use.37561.

45. Казанцев, А.И. Геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений в условиях уплотнительной застройки с учетом оценки зоны влияния строящегося объекта: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.И. Казанцев. – СПб, 2016. – 117 с.

46. Калинин, И.С. Анализ устойчивости реперов, используемых для наблюдений за деформациями зданий и сооружений в южной зоне распространения многолетнемерзлых грунтов / И.С. Калинин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – Новосибирск. – 2013. – Т. 1. – № 3. – С. 155-159.

47. Карпенко, В.А. Методика анализа осадок сооружений значительного протяжения средствами математической статистики: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / В.А. Карпенко. – М., 1966. – 24 с.

48. Корнилов, Ю.Н. Совершенствование методики наблюдений за деформациями зданий и сооружений / Ю.Н. Корнилов, О.С. Царева // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81, № 4. – С. 9-18. – DOI: 10.22389/0016-7126-2020-958-4-9-18.

49. Кутени, Д.А. Разработка методики геодезического обеспечения исследования деформации при нефтедобыче на территории Сирийской Арабской Республики: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д.А. Кутени. – М., 2019. – 136 с.

50. Лазарев, Г.Е. Основы высшей геодезии [Текст]: [учебное пособие для горн. техникумов] / Г.Е. Лазарев, Е.М. Самошкин. – М.: Недра, 1980. – 424 с.

51. Ларионов, А.А. Создание локальной модели высот квазигеоида геометрическим методом / А.А. Ларионов, Н.И. Рудницкая // Земля Беларуси. – 2016. – № 1. – С. 36-41.

52. Лобанова, Ю.В. Совершенствование методов геодезического обеспечения строительства и эксплуатации особо опасных и технических сложных объектов (на примере АЭС): специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю.В. Лобанова. – СПб., 2021. – 136 с.

53. Мазуров, Б.Т. Математическое моделирование и идентификация напряженно-деформированного состояния геодинамических систем в аспекте прогноза природных и техногенных катастроф [Текст] / Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин, В.А. Середович // Вестник СГГА. – 2004. – Вып. 9. – С. 30-35.

54. Майоров, А.Н. Разработка технологии и создание модели квазигеоида с использованием спутниковых данных: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 25.00.32 / А.Н. Майоров. – М.: МИИГАиК, 2008. – 24 с.

55. Максименко, Л.А. Наблюдения за осадками зданий в эксплуатационный период / Л.А. Максименко // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 4 – С. 193-196.

56. Методика выполнения нивелирования III и IV классов тригонометрическим способом / Г.А. Уставич, А.В. Никонов, В.Г. Сальников и др. // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 7. – С. 2-11. – DOI: 10.22389/0016-7126-2019-949-7-2-11.

57. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений. МДС 13-22.2009 / ООО «ТЕКТОПЛАН». – М.: ОАО «ЦПП», 2010. – 76 с.

58. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформациями зданий и сооружений, строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. СО 153-34.21.322-2003 [утв. приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 30 июня 2003 г. N 283] – М., 2005. – 55 с.

59. Мониторинг, моделирование и анализ поведения конструкций / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, Е.К. Лагутина, Е.Л. Соболева // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 25-37. – DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-25-37.

60. Мохамед, А.А.Е. Разработка методики создания модели геоида на территории Египта по данным ГНСС наблюдений на береговых линиях: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.А.Е. Мохамед. – М., 2022. – 144 с.

61. Мурзинцев, П.П. Особенности геодезического обеспечения строительства автодороги и пространственного мониторинга на Бованенковском месторождении / П.П. Мурзинцев, М.М. Павлов, А.С. Репин // Геодезия и картография. – 2016. – № 2. – С. 2-5. – DOI: 10.22389/0016-7126-2016-908-2-2-5.

62. Непоклонов, В.Б. Таксономическая и дескриптивная идентификация моделей геоида / В.Б. Непоклонов, О.В. Половнев, М.В. Абакушина // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – Т. 62. – № 1. – С. 5-14. – DOI 10.30533/0536-101X-2018-62-1-5-14.

63. Никитин, А.В. Определение геометрических параметров автомобильных дорог с использованием приёмников ГНСС / А.В. Никитин // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2018. – № 2(15). – С. 16-17.

64. Никонов, А.В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами в зимних

условиях / А.В. Никонов, А.А. Скворцов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 1. – № 1. – С. 70-77.

65. Никонов, А.В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдения за осадками сооружений / А.В. Никонов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 78-86.

66. Новиков, Ю.А. Геодезические наблюдения за осадками здания в рамках проведения геотехнического мониторинга / Ю.А. Новиков, А.Н. Краев // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24 – №1. – С. 28-41. – DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-1-28-41.

67. Обеспечение точности проложения нивелирных ходов при изыскании и выноса высотных отметок пикетов при строительстве автомобильных дорог / Ю.В. Столбов, С.Ю. Столбова, Л.А. Пронина, И.Е. Старовойто // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 2(48). – С. 120-125.

68. Обиденко, В.И. Разработка методики получения нормальных высот на территории Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 / В.И. Обиденко, О.А. Оприцова, А.П. Решетов // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 1(33). – С. 14-25.

69. Определение аномалий высот спутниковым методом / В.Н. Баландин, И.В. Меньшиков, Ю.Г. Фирсов, А.И. Ефанов // Геодезия и картография. – 2016. – № 2. – С. 11-16.

70. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по расчету насыпей автомобильных дорог на слабых грунтах основания с применением геосинтетических материалов: (ОДМ 218.3.120-2020): разработан: ООО «Мегатех Инжиниринг» совместно с ООО «Инновационный технический центр»: внесен: Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения Федерального дорожного агентства: издан:

распоряжением Федерального дорожного агентства от 11 сентября 2020 г N 2848-р. – М., 2020. – 90 с.

71. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по измерению деформаций земляного полотна автомобильных дорог с применением принципов инклинометрии: (ОДМ 218.5.015-2019): разработан: ООО «Гео-Проект»: внесен: Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения Федерального дорожного агентства: издан: распоряжением Федерального дорожного агентства от 18 мая 2020 г N 1493-р. – М., 2019. – 39 с.

72. Официальный сайт ООО «Русгеоком» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eng.rusgeocom.ru/products/tsifrovoy-nivelir-trimble-dini-03> (дата обращения: 23.01.2022 г.).

73. Паспорт национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/about/upravlenie-fda/nacionalnyj-proekt-bezopasnye-i-kachestvennye-avtomobilnye-dorogi> (дата обращения: 10.10.2020).

74. Писецкая, О.Н. Определения геоида на локальной территории / О.Н. Писецкая, А.С. Ярмоленко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 193-197.

75. Пискунов, А.М. О точности превышений, полученных из тригонометрического нивелирования короткими лучами / А.М. Пискунов, Н.И. Майоров // Геодезия и картография. –1990. – № 1. – С. 12-14.

76. Поздышева, О.Н. Прогнозирование деформаций строительных конструкций по результатам геодезических наблюдений / О.Н. Поздышева // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 2–2(56). – С. 56-58.

77. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие / К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова. – Казань: Казанский университет, 2014. – 103 с.

78. Пронина, Л.А. Геодезическое сопровождение изысканий при строительстве автомобильной дороги / Л.А. Пронина, В.Е. Новикова // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2019. – №2(17) апрель-июнь. – Режим доступа: <http://e-journal.omgau.ru/images/issues/2019/2/00710.pdf>. - ISSN 2413-4066 (дата обращения: 10.09.2022).

79. Пронина, Л.А. Геодезическое сопровождение капитального ремонта дорожного полотна / Л.А. Пронина, К.А. Гудин, А.В. Клок // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития: сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию юбилею кафедры землеустройства и землеустроительного факультет, Омск, 30–31 марта 2022 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2022. – С. 227-229.

80. Пронина, Л.А. Использование лазерного сканирования для диагностики дефектов автомобильных дорог / Л.А. Пронина, Н.С. Егоров // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития: сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию юбилею кафедры землеустройства и землеустроительного факультет, Омск, 30–31 марта 2022 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2022. – С. 236-241.

81. Пронина, Л.А. Статистические исследования точности высотного положения покрытий автомобильных дорог / Л.А. Пронина, А.Г. Мадиев // Вестник Омского ГАУ. – 2018. – №6. – С. 18-27.

82. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом / Г.А. Уставич, М.Е. Рахымбердина, А.В. Никонов, С.А. Бабасов // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17-22.

83. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1975. – 215 с.

84. Садовникова, Н.А. Анализ временных рядов и прогнозирование: учебно-методический комплекс / Н.А. Садовникова, Р.А. Шмойлова. – Вып. 3. – М.: Изд. центр ЕАОИ, 2009. – 264 с.

85. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616905 Российская Федерация. Программа определения осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях / Д.Р. Баширова, В.А. Ламехов, М.Я. Брынё // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: правообладатель Петер. гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – рег. №2022616905 от 18.04.2022. – М.: Роспатент, 2022.

86. Свод правил. Автомобильные дороги. СП 34.13330.2021: издание официальное: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 9 февраля 2021 г. N 53/пр: введен в действие с 10.08.21 г. – М., 2021. – 94 с.

87. Свод правил. Автомобильные дороги: (СП 78.13330.2012): официальное издание: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 июня 2012 г. N 272: введен в действие с 1 июля 2013 г. – М., 2013. – 85 с.

88. Свод правил. Геодезические работы в строительстве. СНиП 3.01.03-84: (СП 126.13330.2017): издание официальное: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 октября 2017 г. № 1469/пр: введен в действие с 25.04.18 г. – М., 2017. – 71 с.

89. Свод правил. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве: (СП 305.1325800.2017): официальное издание: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 17 октября 2017 г. N 1435/пр: введен в действие с 18 апреля 2018 г. – М., 2018. – 105 с.

90. Свод правил. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ: (СП 317.1325800.2017): утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 22 декабря 2017 г. N 1702/пр и введен в действие с 23 июня 2018 г.: дата введения 2018-06-23. – М., 2017. – 85 с.

91. Середович, В.А. Обоснование возможности использования лазерного сканирования для решения проблем в транспортной сфере [Текст] / В.А. Середович, А.К. Егоров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 144-148.

92. Середович, В.А. Определение индекса ровности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования / В.А. Середович, М.А. Алтынцев, А.К. Егоров // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2017. – Т. 22. – № 3. – С. 33-44.

93. Симонян, В.В. Геодезический мониторинг зданий и сооружений как основа контроля за безопасностью при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений [Текст] / В.В. Симонян, Н.А. Шмелин, А.К. Зайцев. – М.: НИУ МГСУ, 2015. – 144 с.

94. Симонян, В.В. Геодезический мониторинг склоновых территорий как основа для оценки риска и безопасности сооружений / В.В. Симонян // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: Сборник докладов Первой Национальной конференции, Москва, 30 сентября 2020 года. – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – С. 778-786.

95. Симонян, В.В. Методология геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / В.В. Симонян. – М., 2021. – 340 с.

96. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность / В.Ф. Канушин, И.Г. Ганагина, Д.Н. Голдобин [и др.] // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2017. – Т. 22. – № 1. – С. 30-49.

97. Стандарт организации. Геодезическая, топографическая и картографическая продукция. Методы преобразования координат и высот при спутниковых определениях: (СТО Роскартография 3.5-2020): разработан АО «Роскартография»: внесен Центром научно-технологического развития АО «Роскартография»: утвержден и введен в действие Приказом АО «Роскартография» от 25 ноября 2020 г. N-220-п. – М., 2020. – 31 с.

98. Стандарт организации. Дороги автомобильные общего пользования. Диагностика. Определение продольного микропрофиля дорожной поверхности и международного показателя ровности IRI. Общие требования и порядок проведения: (СТО МАДИ 02066517.1-2006): разработан: Московским автомобильно-дорожным институтом (Государственным техническим университетом): внесен: Техническим комитетом по стандартизации «Дорожное хозяйство»: утвержден и введен в действие Приказом Ректора МАДИ (ГТУ) от 14.08.2006 г. N 348 о. в. – М., 2006. – 42 с.

99. Стандарт организации. Объекты использования атомной энергии. Геодезический мониторинг зданий и сооружений в период строительства и эксплуатации: (СТО СРО-С 60542960 00043-2015): разработан ООО «Центр технических компетенций атомной отрасли»: внесён Советом СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ»: утверждён и введён в действие Протоколом общего собрания СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ» № 11 от 12.02.15 г. – М., 2015. – 157 с.

100. Столбов, Ю.В. Анализ методов расчёта точности геодезического контроля высотного положения оснований и покрытия автомобильных дорог / Ю.В. Столбов, С.Ю. Столбова, Д.О. Нагаев, Л.А. Пронина // Вестник СибАДИ. – 2012. – №2 (24). – С. 69-73.

101. Столбов, Ю.В. Исследование точности определения высотных отметок конструкции линейного сооружения с использованием разных геодезических приборов / Ю.В. Столбов, С.Ю. Столбова, Л.А. Пронина, Н.А. Пархоменко // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – №4. – С. 44-57. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-44-57.

102. Столбов, Ю.В. Методы расчета и обоснование допусков на строительные работы и геодезический контроль при возведении линейных сооружений / Ю.В. Столбов, С.Ю. Столбова, Л.А. Пронина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 2(710). – С. 60-69.

103. Столбов, Ю.В. Обеспечение точности контроля неровностей оснований и покрытий автомобильных дорог категорий IV, V с применением нивелиров типа Н-3 / Ю.В. Столбов, С.Ю. Столбова, Л.А. Пронина, А.И. Уваров // Вестник СибАДИ. – 2017. – №6(58). – С. 125-132.

104. Столбов, Ю.В. Точность геодезических работ при изысканиях и строительстве автомобильных дорог для обеспечения высотного положения их оснований и покрытий / Ю.В. Столбов, С.Ю. Столбова, Л.А. Пронина // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Омск, 15–16 ноября 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВО "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)". – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2017. – С. 205-210.

105. Ульфред, А.Б. Оценка возможности использования геодезической сети для создания региональной модели геоида на территории Республики Кот-д'Ивуар / А.Б. Ульфред, В.Б. Непоклонов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 3. – С. 68-73.

106. Уставич, Г.А. Особенности выполнения деформационного мониторинга инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты / Г.А. Уставич, Е.И. Аврунев, В.Г. Сальников, В.К. Попов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 97-109.

107. Уставич, Г.А. Особенности применения цифрового оборудования при геодезической съемке линейно-протяженных объектов / Г.А. Уставич, А.В. Иванов, Н.Б. Романескул // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 212-216. – DOI: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-212-216.

108. Фунг, Ч.Т. Разработка методики повышения точности и степени детализации локального квазигеоида для территории Северного Вьетнама: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ч.Т. Фунг. – М., 2022. – 114 с.

109. Хаметов, Т.И. Геодезическое сопровождение процессов строительства автомобильных дорог и мостовых переходов: учеб. пособие / Т.И. Хаметов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 148 с.

110. Хорошилова, Ж.А. Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга / Ж.А. Хорошилова, В.С. Хорошилов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 1. – №1 – С. 77-80.

111. Чан, Т.Ш. Использование ГНСС наблюдений для определения нормальных высот пунктов геодезических сетей / Т.Ш. Чан // Устойчивое развитие науки и образования. – 2018. – № 7. – С. 307-312.

112. Чан, Т.Ш. Особенности определения нормальных высот пунктов по данным спутниковых измерений / Т.Ш. Чан // Наука через призму времени. – 2017. – № 8(8). – С. 138-140.

113. Чан, Т.Ш. Создание опорной геодезической сети при изысканиях и строительстве с использованием спутниковой технологии определения топоцентрических координат: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Т.Ш. Чан. – СПб, 2019. – 162 с.

114. Шаповалова, К.В. Задача построения высокоточной локальной модели квазигеоида / К.В. Шаповалова // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики, Сборник трудов VI Международной молодежной научной конференции. – Томск, 2016. – Т. 300. – С. 135-138.

115. Шевченко, Г.Г. Разработка технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений способом свободного стационарирования с использованием метода нелинейного программирования: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г.Г. Шевченко. – СПб., 2020. – 212 с.

116. Шеховцов, Г.А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: монография / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова – Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – 2014. – 256 с.

117. Шоломицкий, А.А. Алгоритм определения оседаний днища вертикального стального резервуара по облаку точек лазерных отражений / А.А. Шоломицкий, Н.Т. Кемербаев // Маркшейдерия и недропользование. – 2022. – № 2(118). – С. 33-36.

118. Щендрик, Н.К. Формирование локальной цифровой модели высот геоида на территорию Новосибирской области / Н.К. Щендрик // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4(36). – С. 66-73.

119. Щербаков, В.В. Диагностика автомобильных дорог по геометрическим параметрам с использованием ГНСС / В.В. Щербаков, М.Н. Барсук // Геодезия и картография. – 2008. – № 6. – С. 55-58.

120. Юнес, Ж.А. Обоснование технологии создания спутниковой геодезической чети для условий низких широт: специальность 25.00.32 «Геодезия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ж.А. Юнес. – СПб, 2018. – 149 с.

121. A Novel Hybrid Deep Neural Network Prediction Model for Shield Tunneling Machine Thrust / C. Chen, B. Wu, P. Jia et al. // IEEE Access. – 2022. – pp. 1-18. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3224184.

122. Ahmed, H.M. Evaluating two numerical methods for developing a local geoid model and a local digital elevation model for the Red Sea Coast, Egypt / H.M. Ahmed, E.A. Mohamed, S.A. Bahaa // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – Elsevier, 2021. – DOI: 10.1016/j.jksues.2021.04.004.

123. Albayrak, M. Determination of Istanbul geoid using GNSS/levelling and valley cross levelling data / M. Albayrak, T. Özlüdemir, M. Mohseni Aref et al. // Geodesy and Geodynamics. – 2020. – Vol. 11, Iss. 3. – pp. 163-173. – DOI: 10.1016/j.geog.2020.01.003.

124. Banasik, P. The Use of Quasigeoid in Leveling Through Terrain Obstacles / P. Banasik, K. Bujakowski // Reports on Geodesy and Geoinformatic. – 2017. – Vol. 104. – pp. 57-64. – DOI: 10.1515/rgg-2017-0015.

125. **Bashirova, D.R.** Building a local model of a quasigeoid for the construction and reconstruction of highways / D.R. Bashirova // Transport Problems-2021: Proceedings XIII International Scientific Conference, X International Symposium of

Young Researchers Under the Honorary Patronage of Mayor of Katowice City and Rector of Silesian University of Technology, Katowice, 29–30 июня 2021 года. – Katowice: Silesian University of Technology, 2021. – pp. 113-124.

126. Chen, Z. Road Extraction in Remote Sensing Data: A Survey / Z. Chen, L. Deng, Y. Luo et al. // International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation. – 2022. – Vol. 112. – DOI: 10.1016/j.jag.2022.102833.

127. Chen, J. A deep learning forecasting method for frost heave deformation of high-speed railway subgrade / J. Chen, A. Li, C. Bao et al. // Cold Reg Sci Technol. Elsevier. 2021. – Vol. 185. – p. 103265. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103265

128. Cheng, M.Y. Prediction of permanent deformation in asphalt pavements using a novel symbiotic organisms search–least squares support vector regression / M.Y. Cheng, D. Prayogo, Y.W. Wu // Neural Computing and Applications. – 2018. – Vol. 31, Iss. 10. – p. 6261-6273. – DOI: 10.1007/s00521-018-3426-0.

129. Chymyrov, A. Comparison of different DEMs for hydrological studies in the mountainous areas / A. Chymyrov // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2021. – Vol. 24(3). – pp. 587-594. – DOI: 10.1016/j.ejrs.2021.08.001.

130. Cunderlik, R. Local quasigeoid modelling in Slovakia using the finite volume method on the discretized Earth's topography / R. Cunderlik, M. Medl'a, K. Mikula // Contributions to Geophysics and Geodesy. – 2020. – Vol. 50(3). – pp. 287-302. – DOI: 10.31577/congeo.2020.50.3.1.

131. Development of a precise local quasigeoid model for the city of Krakow – QuasigeoidKR2019 / P. Banasik, K. Bujakowski, J. Kudrys, M. Ligas // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2020. – 109(1). – pp. 25-31. – DOI: 10.2478/rgg-2020-0004.

132. ETH-GQS: An estimation of geoid-to-quasigeoid separation over Ethiopia / E.Y. Belay, W. Godah, M. Szelachowska, R. Tenzer // Geodesy and Geodynamics. – 2022. – 13(1). – pp. 31-37. – DOI: 10.1016/j.geog.2021.09.006.

133. Godah, W. The use of absolute gravity data for the validation of Global Geopotential Models and for improving quasigeoid heights determined from satellite-only Global Geopotential Models / W. Godah, J. Krynski, M. Szelachowska // *Journal of Applied Geophysics*. – 2018. – Vol. 152. – pp. 38-47. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.03.002.

134. Gong, H. Improving accuracy of rutting prediction for mechanistic-empirical pavement design guide with deep neural networks / H. Gong, Y. Sun, Z. Mei et al. // *Constr Build Mater*. – 2018. – Vol. 190. – p. 710-718. – DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.087.

135. Grishchenkova, E.N. Development of a Neural Network for Earth Surface Deformation Prediction / E.N. Grishchenkova // *Geotechnical and Geological Engineering* 2017. Springer, 2017. – Vol. 36, Iss. 4. – pp. 1953-1957. – DOI: 10.1007/s10706-017-0438- y.

136. He, P. Nonlinear deformation prediction of tunnel surrounding rock with computational intelligence approaches / P. He, F. Xu, S. Sun // *Geomatics Natural Hazards & Risk*. – 2020. – Vol. 11, Iss. 1. – pp. 414-427.

137. Hoan, N.T. Novel Time Series Bagging Based Hybrid Models for Predicting Historical Water Levels in the Mekong Delta Region, Vietnam / N.T. Hoan, N. Van Dung, H. Thu et al. // *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*. Tech Science Press. – 2022. – Vol. 131, Iss. 2. – pp. 1431-1449. – DOI: 10.32604/cmes.2022.018699.

138. Hosseini-Asl, M. Establishment of a corrective geoid surface by spline approximation of Iranian GNSS/levelling network / M. Hosseini-Asl, A.R. Amiri-Simkooei, A. Safari // *Measurement*. – 2022. – Vol. 197. – 111341. – DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111341.

139. Hsiung, B. Prediction of ground surface settlements caused by deep excavations in sands / B. Hsiung, Dao S. // *Geotechnical Engineering*. – 2015. – Vol. 46. – pp. 111-118.

140. Ji, X. Development of a rutting prediction model for asphalt pavements with the use of an accelerated loading facility / X. Ji, N. Zheng, S. Niu et al. // *Road Materials and Pavement Design*. Taylor and Francis Ltd. – 2016. – Vol. 17, Iss. 1. – p. 15-31. – DOI: 10.1080/14680629.2015.1055337.

141. Jiang, W. High precision deformation monitoring with integrated GNSS and ground range observations in harsh environment / W. Jiang, Y. Chen, Q. Chen et al. // *Measurement*. – 2022. – DOI: 204. 112179. 10.1016/j.measurement.2022.112179.

142. Keckler, D. *Surfer for Windows. Version 6 User's Guide* / D. Keckler // Golden Software, Incorporated, 1995. – p. 511.

143. Kiani, M. Local geoid height approximation and interpolation using moving least squares approach / M. Kiani // *Geodesy and Geodynamics*. – 2020. – Vol. 11, Iss. 2. – pp. 120-126. – DOI: 10.1016/j.geog.2019.12.003.

144. Kuzin, A.A. Prediction of natural and technogenic negative processes based on the analysis of relief and geological structure / A.A. Kuzin, E.N. Grishchenkova, M.G. Mustafin // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 189. – pp. 744-751.

145. Khoroshilov, V. Analysis of Possibilities to Use Predictive Mathematical Models for Studying the Dam Deformation State / V. Khoroshilov, N. Kobeleva, M. Noskov // *Journal Of Applied And Computational Mechanics*. – 2022. – Vol. 8, No. 2. – P. 733-744. – DOI: 10.22055/jacm.2022.38005.3129.

146. Khoroshilov, V.S. Mathematical modeling of the high-rise buildings deformation development process in Moscow (Vosstania square) / V.S. Khoroshilov, N.N. Kobeleva, N.V. Sycheva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development"* – Hydrometeorological and Geodetic

Research in the Building Area, Kislovodsk, 01–05 октября 2019 года. Vol. 698, 4. – Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 044004. – DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044004.

147. Li, S. Gaussian process model of water inflow prediction in tunnel construction and its engineering applications / S. Li, P. He, L. Li et al. // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Pergamon. – 2017. – Vol. 69. – pp. 155-161. – DOI: 10.1016/J.TUST.2017.06.018.

148. Ma, P. Prediction of InSAR time-series deformation using deep convolutional neural networks / P. Ma, F. Zhang, H. Lin // *Remote Sensing Letters*. – 2020. – Vol. 11. – Iss. 2. – pp. 137-145. – DOI: 10.1080 /2150704X.2019.1692390.

149. Mahbuby, H. Local gravity field modeling using spherical radial basis functions and a genetic algorithm / H. Mahbuby, A. Safari, I. Foroughi // *Comptes Rendus Geoscience*. – 2017. – Vol. 349(3). – pp. 106-113. – DOI: 10.1016/j.crte.2017.03.001.

150. Majidifard, H. Developing a Prediction Model for Rutting Depth of Asphalt Mixtures Using Gene Expression Programming / H. Majidifard, B. Jahangiri, P. Rath et al. // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 267. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120543.

151. Medved, K. Regional gravimetric survey of central Slovenia / K. Medved, M. Kuhar, B. Koler // *Regional gravimetric survey of central Slovenia*. – 2019. – Vol. 136. – pp. 395-404. – DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.065.

152. Mustafin M. Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises / M. Mustafin, V. Valkov, A. Kazantsev // *Procedia Engineering*. – Vol. 189. – pp. 729-736. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.115.

153. Mysen, E. On the uncertainty of height anomaly differences predicted by least-squares collocation / E. Mysen // *Journal of Geodetic Science*. – 2020. – Vol. 10(1). – pp. 53-61. – DOI: 10.1515/jogs-2020-0111.

154. Nonlinear deformation behaviors and a new approach for the classification and prediction of large deformation in tunnel construction stage: a case study / W. Liu, J. Chen, L. Chen et al. // Taylor & Francis. – 2020. – Vol. 26. – Iss. 5. – pp. 2008-2036. – DOI: 10.1080/19648189.2020.1744482.

155. Orejuela, I.P. Geoid undulation modeling through the Cokriging method—A case study of Guayaquil, Ecuador / I.P. Orejuela, C.L. González, X.B. Guerra et al. // Geodesy and Geodynamics. – 2021. – Vol. 12, Iss. 5. – pp. 356-367. – DOI: 10.1016/j.geog.2021.04.004.

156. Polynomial interpolation methods in development of local geoid model / R.K. Das, S. Samanta, S.K. Jana et al. // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. Elsevier, 2018. – Vol. 21, Iss 3. – pp. 265-271. – DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.03.002.

157. Prediction of ground surface settlement by shield tunneling using XGBoost and Bayesian Optimization / J. Su, Y. Wang, X. Niu et al. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2022. – Vol. 114. – DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105020.

158. Simonyan, V. Methodology of Comprehensive Slope Stability Evaluation Based on Engineering Geodesy and Soil Mechanics Methods for the Road Engineering Application / V. Simonyan // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017: Conference proceedings. Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 692. – Cham: Springer, 2018. – P. 729-738. – DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_77.

159. Shcherbakov, V. Automation of Railroad Construction Technology Using Surveying Methods / V. Shcherbakov, M. Barsuk, A. Karpik // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1116. – P. 199-208. – DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_19.

160. Shcherbakov, V. Development of a control system for a ballast cleaning machine using GNSS / V. Shcherbakov, I. Buntsev, O. Kovaleva // E3S Web of

Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, 09–14 сентября 2019 года. – Vol. 135. – Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. – P. 02003. – DOI: 10.1051/e3sconf/201913502003.

161. Su, H. Wavelet support vector machine-based prediction model of dam deformation / H. Su, X. Li, B. Yang, Z. Wen // *Mech Syst Signal Process.* – 2018. – Vol. 110. – p. 412-427. – DOI: 10.1016/J.YMSSP.2018.03.022.

162. Tsareva, O. Method of Evaluation of Historical Objects of Transport Infrastructure Deformations / O. Tsareva, Y. Olekhovich, E. Razumnova // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2020. – Vol. 1116. – P. 387-404. – DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_38.

163. Tütüncü, K. A hybrid binary grey wolf optimizer for selection and reduction of reference points with extreme learning machine approach on local GNSS/leveling geoid determination / K. Tütüncü, M.A. Şahman, E. Tuşat // *Applied Soft Computing.* – 2021. – Vol. 108. – p. 107444. – DOI: 10.1016/j.asoc.2021.107444.

164. Wen, Z. MR and stacked GRUs neural network combined model and its application for deformation prediction of concrete dam / Z. Wen, R. Zhou, H. Su // *Expert Systems with Applications.* – 2022. – Vol. 201. – p. 117272. – DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117272.

165. Yang, C.S. Twelve different interpolation methods: a case study of Surfer 8.0 / C.S. Yang, S.P. Kao, F.B. Lee et al. // *Proceedings of the XXth ISPRS Congress.* – 2004. – Vol. 35. – pp. 778-785.

166. Zhao, Y. Numerical analysis on the features of road deformation in the construction process of heat supply pipeline works / Y. Zhao, Z. Li, H. Zhang // *Alexandria Engineering Journal.* – 2020. – Vol. 60(1). – pp. 159-171. – DOI: 10.1016/j.aej.2020.06.052.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Техническая классификация автомобильных дорог общего пользования

Таблица А – Техническая классификация автомобильных дорог общего пользования

Класс автомобильной дороги	Категория автомобильной дороги	Общее количество полос движения	Ширина полосы движения, м	Центральная разделительная полоса	Пересечения с автомобильными дорогами, велосипедными пешеходными дорожками	Пересечение с железными дорогами и трамвайными путями	Доступ на дорогу с примыканием в одном уровне
Автомагистраль	IA	4 и более	3,75	Обязательна	В разных уровнях		Не допускается
Скоростная дорога	IB	4 и более	3,75				Допускается без пересечения прямого направления
Дорога обычного типа	IV	4 и более	3,75	Обязательна	Допускаются пересечения со светофорным регулированием	В разных уровнях	Допускается
	II	4	3,5	Допускается отсутствие			
		2 или 3	3,75	Не требуется	Допускаются пересечения в одном уровне	Допускается пересечение в одном уровне	
	III	2	3,5				
	IV	2	3				
	V	1	4,5 и более				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Ведомость осадок

Таблица Б – Ведомость осадок ПК10+00

Дата	Время, сут	Срок, сут	Осадки, м		
			М-1101 (левая)	М-1201 (ось)	М-1301 (правая)
08.10.2020	0	0,000	0,000	0,000	
13.10.2020	5	5	0,000	0,000	0,000
19.10.2020	11	6	0,000	0,000	0,000
24.10.2020	16	5	0,018	0,018	0,021
29.10.2020	21	5	0,008	0,009	0,014
02.11.2020	25	4	0,006	0,008	0,008
06.11.2020	29	4	0,004	0,005	0,007
10.11.2020	33	4	0,019	0,024	0,038
13.11.2020	36	3	0,111	0,117	0,092
17.11.2020	40	4	0,069	0,079	0,071
23.11.2020	46	6	0,066	0,079	0,065
26.11.2020	49	3	0,028	0,033	0,023
30.11.2020	53	4	0,027	0,034	0,026
03.12.2020	56	3	0,019	0,022	0,019
07.12.2020	60	4	0,022	0,027	0,021
10.12.2020	63	3	0,014	0,017	0,013
15.12.2020	68	5	0,023	0,027	0,022
18.12.2020	71	3	0,015	0,018	182,5
21.12.2020	74	3	0,043	0,069	0,035
25.12.2020	78	4	0,021	0,037	0,027
28.12.2020	81	3	0,015	0,028	0,015
02.01.2021	86	5	0,029	0,052	0,033
09.01.2021	93	7	0,033	0,054	0,036
13.01.2021	97	4	0,016	0,025	0,017
18.01.2021	102	5	0,020	0,028	0,019
23.01.2021	107	5	0,020	0,031	0,023
27.01.2021	111	4	0,013	0,015	0,011
31.01.2021	115	4	0,014	0,018	0,015
05.02.2021	120	5	0,036	0,159	0,039
09.02.2021	124	4	0,025	0,045	0,025
13.02.2021	128	4	0,020	0,034	0,020
19.02.2021	134	6	0,030	0,046	0,031
24.02.2021	139	5	0,015	0,025	0,015
28.02.2021	143	4	0,018	0,030	0,022
04.03.2021	147	4	0,010	0,013	0,007
10.03.2021	153	6	0,020	0,030	0,022
14.03.2021	157	4	0,011	0,017	0,010
17.03.2021	160	3	0,012	0,018	0,013
21.03.2021	164	4	0,012	0,017	0,013

Продолжение таблицы Б

Дата	Время, сут	Срок, сут	Осадки, м		
			М-1101 (левая)	М-1201 (ось)	М-1301 (правая)
25.03.2021	168	4	0,011	0,017	0,012
30.03.2021	173	5	0,017	0,024	0,015
05.04.2021	179	6	0,016	0,023	0,015
19.04.2021	193	14	0,029	0,043	0,027
26.04.2021	200	7	0,015	0,022	0,014
07.05.2021	211	11	0,020	0,032	0,019
12.05.2021	216	5	0,008	0,015	0,007
21.05.2021	225	9	0,016	0,029	0,016
24.05.2021	228	3	0,007	0,011	0,007
25.05.2021	229	1	0,002	0,003	0,001
26.05.2021	230	1	0,000	0,001	0,002
27.05.2021	231	1	0,000	-0,004	-0,002
28.05.2021	232	1	-0,001	0,000	0,001
29.05.2021	233	1	0,003	0,000	0,000
30.05.2021	234	1	-0,001	0,001	0,000
31.05.2021	235	1	0,001	0,001	0,002
02.06.2021	237	2	0,000	-0,001	-0,001
08.06.2021	243	6	0,002	0,004	0,003
14.06.2021	249	6	0,004	0,005	0,004
21.06.2021	256	7	0,004	0,005	0,004
27.06.2021	262	6	0,004	0,006	0,028
05.07.2021	270	8	0,004	0,011	0,004
11.07.2021	276	6	0,004	0,002	0,003
18.07.2021	283	7	0,002	-0,023	0,000
02.08.2021	298	15	0,020	0,008	0,000
16.08.2021	312	14	0,007	18,3	-
29.08.2021	325	13	0,005	14,0	-
11.09.2021	338	13	0,006	16,8	-
26.09.2021	353	15	0,005	12,2	-
13.10.2021	370	17	0,006	12,9	-
24.10.2021	381	11	0,004	13,3	-
06.11.2021	394	13	0,006	16,8	-
20.11.2021	408	14	0,008	0,003	0,006
05.12.2021	423	15	0,009	0,004	0,005
19.12.2021	437	14	0,008	0,005	0,006

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2022616905

**Программа определения осадок оснований
автомобильных дорог на высоких насыпях**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)
(RU)*

Авторы: *Баширова Динара Ринатовна (RU), Ламехов Владимир
Андреевич (RU), Брынь Михаил Ярославович (RU)*

Заявка № **2022616215**
Дата поступления **07 апреля 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **18 апреля 2022 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения



Общество с ограниченной ответственностью

«АЕМ Гео»

190121, г. Санкт-Петербург, вн.тер.г.
муниципальный округ Коломна, ул. Александра
Блока, д. 5, лит. А, помещ. 101, офис 113
Телефон: (812) 409 38 37,
E-mail: aemgeo@yandex.ru, http://aemgeo.ru
ОГРН 1147847378458,
ИНН 7838511888/ КПП 783801001

Утверждаю
Генеральный директор
ООО «АЕМ Гео»

Никитчин Андрей Андреевич

«03» марта 2023 г.



АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Башировой Динары Ринатовны 1.6.22. Геодезия

Комиссия в составе:

Председатель: Никитчин Андрей Андреевич;

Члены комиссии: Городнова Елена Владимировна, Сорокин Аркадий Максимович, Сухарев Иван Иванович составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Высотное обеспечение строительства и эксплуатации автомобильных дорог с прогнозированием осадок на основе методов машинного обучения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при проведении геотехнического мониторинга деформаций компанией ООО «АЕМ Гео» при разработке проекта: «Скоростная автомагистраль Москва – Санкт-Петербург на участках 543 км – 646 км (Участок 7) и 646 км – 684 км (Участок 8)» в виде:

- экспериментальных данных по исследованию;
- методик расчета и моделирования;
- математической модели;
- рекомендаций.

Внедрена методика определения осадок оснований автомобильных дорог на грунтах с низкой несущей способностью и при возведении высоких насыпей на основе геометрического и тригонометрического нивелирования с последующим прогнозированием осадок на основе методов машинного обучения. Разработанная методика обеспечивает достижение требований к точности, предъявляемых к наблюдению за вертикальными перемещениями оснований автомобильных дорог. В ходе выполнения диссертационной работы составлен программный алгоритм методики определения осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах и при возведении высоких насыпей, имеющий свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ № 2022616905. Данная программная реализация внедрена в процесс проектирования высотной опорной и деформационной сетей, а также уравнивания результатов измерений. Эффективность проверена при решении прикладных задач.

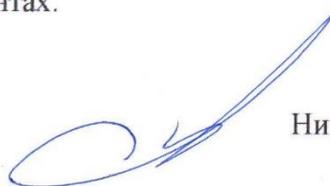
Акт внедрения №6 от 10.09.2022

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить качество предоставляемых услуг;
- сократить затраты на проведение работ;
- повысить производительность труда при геодезическом мониторинге автомобильных дорог на слабых грунтах.

Председатель комиссии

Генеральный директор, к.т.н.



Никитчин А.А.

Члены комиссии:

Начальник Геотехнического отдела, к.т.н.



Городнова Е.В.

Начальник Геодезического отдела



Сорокин А.М.

Главный геодезист

Сухарев И.И.