

*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*

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

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Брынь Михаил Ярославович*

**Официальные оппоненты:**

*Хорошилов Валерий Степанович*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра космической и физической геодезии, профессор;

*Царёва Ольга Сергеевна*

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, доцент.

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

Защита диссертации состоится **27.09.2023 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 15 июня 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



КУЗИН  
Антон Александрович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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. Наряду с этим, 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 при возведении высоких насыпей не разработано.

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 геодези-

ческих 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 другие.

**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.

**Цель работы** – 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 использовать ГНСС-методы, при этом преобразование геодезических высот в систему нормальных высот предлагается 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.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

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.

**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 следующие методы: теория ошибок геодезических измерений, метод наименьших квадратов, методы машинного обучения, методы сравнительного анализа, методы моделирования геодезических сетей.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработанная методика определения нормальных высот пунктов по результатам спутниковых определений позволяет повы-

свить 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.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: конкурс национального объединения изыскателей и проектировщиков (НОПРИЗ) в номинации «Лучшая концепция нереализованного проекта» (г. Москва, 2020 г., октябрь), LXXXI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.), конкурс грантов Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук (победитель) (г. Санкт-Петербург, 2021 г.), международная конференция Transport Problems-2021: XIII International Scientific Conference, X International Symposium of Young Researchers (г. Катовице, 2021 г.), IV Всероссийская научно-практическая конференция «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), XVIII Международный фо-

рум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (победитель) (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), IV Всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), XIV Международная научно-практическая конференция «Геодезия. Маркшейдерия. Аэро-съёмка. 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.

**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 квази-геоида, разработке методики наблюдений за осадками оснований автомобильных дорог, возводимых на слабых грунтах и высоких насыпях, разработке методики по выполнению прогнозирования осадок на основе методов машинного обучения, анализе и обобщении полученных экспериментальных результатов.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, 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 (далее – Перечень ВАК). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.



**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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ требований к точности высотного обеспечения строительства и эксплуатации автомобильных дорог, методов его выполнения, а также методов наблюдения за осадками оснований автомобильных дорог на слабых грунтах и при устройстве высоких насыпей, способов контроля устойчивости опорных реперов, предложений по совершенствованию методов контроля осадок, способов прогнозирования осадок, а также предложений по совершенствованию прогнозной модели. Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

**Во второй главе** обоснованы требования к точности преобразования геодезических высот в систему нормальных высот. На основании проведенных исследований разработана методика преобразования геодезических высот в систему нормальных высот на основе создания локальной модели квазигеоида для линейного объекта. Предложен комплексный подход к мониторингу осадок оснований автомобильных дорог на слабых грунтах на основе интеграции результатов инженерно-геологических изысканий и геодезических работ. Разработана методика наблюдений за осадками оснований автомобильных дорог на слабых грунтах на основе геометрического нивелирования, а также их прогнозирования на основе методов ма-

шинного обучения. Предложено создание прогнозной модели по результатам геотехнического мониторинга на основе рекуррентной нейронной сети долговременной и кратковременной памяти. В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

**В третьей главе** приведена методика по преобразованию геодезических высот, полученных с помощью ГНСС-аппаратуры, в систему нормальных высот. Проведены экспериментальные исследования разработанной методики по определению осадок основания автомобильной дороги на грунтах с низкой несущей способностью. Осуществлен прогноз осадок по результатам геодезического мониторинга на основе методов машинного обучения. Выполнено создание комплексной геомеханической модели. Создана рекуррентная нейронная сеть для прогнозирования осадок основания по данным геотехнического мониторинга.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Разработанная методика определения нормальных высот пунктов по результатам спутниковых определений позволяет повысить их точность до уровня, необходимого при строительстве 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. При этом геодезическое обеспечение зачастую выполняется с применением ГНСС-технологий, что значительно ускоряет процесс измерений. По результатам спутниковых определений получают геодезические высоты, а при геометрическом нивелировании – нормальные. Связь геодезических  $H$  и нормальных высот  $H^y$  определяется по (1):

$$H = H^y + \xi^y, \quad (1)$$

где  $\xi$  – аномалия высоты. Однако результаты геодезического обеспечения должны быть представлены в системе нормальных высот из этого вытекает вопрос преобразования геодезических высот в систему нормальных высот.

Предложена и теоретически обоснована методика преобразования геодезических высот в систему нормальных высот на основе создания локальной модели квазигеоида для линейного объекта (с учетом расположения исходных пунктов по обе стороны от оси автодороги) различными интерполяционными методами, среди которых: триангуляция с линейной интерполяцией, метод минимальной кривизны, метод ближайшего соседа, метод естественной окрестности, радиальные базисные функции, кригинг. В общем виде методика предполагает выполнение следующих этапов: вычисление значений аномалий высот для исходных пунктов с известными геодезическими и нормальными высотами, создание поверхности аномалий высот различными интерполяционными методами и определение предпочтительного метода на основе оценки точности интерполяции и средней квадратической ошибки (СКО) определения высоты по контрольным точкам, определение на основе выбранного интерполяционного метода оптимального расстояния между исходными пунктами за счет увеличения расстояния между ними (исключения пунктов и использования их в качестве контрольных), обеспечивающего точность определения нормальных высот для заданного класса нивелирования.

При проектировании числа исходных пунктов на основе глобальной модели геоида EGM2008 необходимо выбрать в районе работ пункты с известными нормальными высотами, выполнить определение соответствующих им высот геоида с помощью глобальной модели EGM2008, вычислить разность высот и на основе полученной разности создать локальную модель, определить параметры преобразования и ввести переменные поправки, выполнить сравнение ожидаемой СКО определения высот пунктов для заданного класса геометрического нивелирования с СКО определения нормальных высот по контрольным точкам. При этом в зависимости от аномальности района работ необходимое расстояние между исходными пунктами будет отличаться.

Разработанная методика была применена для определения нормальных высот по результатам спутниковых определений при строительстве автомобильной дороги. Сравнительный анализ точности интерполяционных методов на основе оценки СКО интерпо-

ляции и СКО определения высот по контрольным точкам представлен в таблице 1 и на рисунке 1. Для рассмотренного объекта в результате проведенного исследования предпочтительным методом интерполяции стал метод минимальной кривизны (рисунок 2), в котором сначала по методу наименьших квадратов по всем исходным данным строится интерполяционная поверхность и выполняется интерполяция разностей между результатами интерполяции и исходными данными в узлах сетки. Таким образом, рассмотренным методом СКО по контрольным точкам и СКО интерполяции составили 0,008 м. Также отмечены методы кригинга (рисунок 3) и метод естественной окрестности (рисунок 4). Далее, на основе этих методов, было выполнено постепенное уменьшение количества точек, по которым осуществлялось создание модели. Получено, что для рассматриваемого района работ при расстоянии между опорными пунктами, составлявшем 8 км, возможно получение нормальных высот, с точностью, удовлетворяющей точности нивелирования III класса.

**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.**

Для выполнения расчета точности определения высот осадочных марок при определении вертикальных перемещений основания автомобильных дорог в качестве исходной величины принята величина интенсивности осадки (скорость протекания деформационного процесса). В соответствии со сводом правил 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. В работе выдвинуто предположение, 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. Назначение точности измерений выполнено исходя из величины  $v$  предельной скорости деформации (2):

$$v = \Phi(T_i) - \Phi(T_{i-1}) \geq tm_v, \quad (2)$$

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.

В исследовании рассчитана СКО определения высот пунктов опорной сети и СКО определения высот деформационных марок. При доверительной вероятности равной 0,988 (при  $t = 2,5$ ), СКО определения высоты деформационной марки составит 0,5 мм. Подчёркнуто, что для создания высотной опорной сети целесообразно использовать существующие пункты геодезической разбивочной основы (ГРО), однако их высоты необходимо повторно определить с СКО равной 0,2 мм. 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). Уравнивание высотной опорной сети предполагается выполнять коррелятным способом: вычисление невязки между прямым и обратным ходами  $f_h$  и ввод измеренные прямое и обратное превышения поправки  $(-f_h / 2)$ .

Предложена схема расположения деформационных марок (рисунок 5), которая предполагает использование для снятия одного поперечника трех деформационных марок (две по бровкам насыпи, а третья – посередине насыпи).

Для определения высот осадочных марок предложено прокладывать между опорными пунктами ход геометрического нивелирования, привязываясь к двум пунктам ГРО. Рекомендовано определение высот деформационных марок веерным способом (рисунок 6), используя нивелиры с СКО определения превышения на 1 км двойного хода 0,3 мм. Рассчитано СКО определения превышения на станции, которое составит 0,06 мм.

В результате выполненных преобразований получено, что окончательные высоты деформационных марок, определенные верным способом на первой и последней станции, можно вычислить по формуле среднего весового (веса превышений подсчитать по формуле 3:

$$p_i = c / L_i, \quad (3)$$

где  $c$  можно принять 25 м, а  $L_i$  – расстояние от нивелира до деформационной марки), а на всех остальных – по формуле среднего арифметического.

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. 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.**

Выполнение прогнозирования временных рядов является сложной задачей. В отличие от задач классификации и регрессии для прогнозирования временных рядов необходима предварительная обработка данных, которая исключает наличие пропущенных значений. В результате, имея значения геодезических измерений за предыдущие периоды, необходимо определить их возможные значения в будущем.

В последнее время перспективным направлением исследования становится применение методов машинного обучения. Целью машинного обучения является создание систем способных обучаться. В качестве преимуществ методов машинного обучения можно выделить: единообразие используемой методики, вне зависимости от применяемой модели обучения, возможность моделирования линейных и нелинейных процессов, высокую скорость получения решения, достаточную степень визуализации результатов. Для решения задач прогнозирования в работе были использованы следу-

ющие методы 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).

Методика выполнения прогнозирования на основе методов машинного обучения по геодезическим данным 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.

При этом расчет необходимого временного интервала между циклами наблюдений предполагается выполнять на основе (4):

$$\Delta t \leq S_{\max} / v, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени между циклами наблюдений,  $S_{\max}$  – критическая величина осадки;  $v$  – скорость протекания осадки.

Осуществлен прогноз осадок на участке автомобильной дороги Приморского края. Наименьшее значение СКО показал метод опорных векторов. 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 работе предлагается использовать радиальную базисную функцию. Результаты прогнозирования по геодезическим данным представлены в таблице 2.

Были сделаны следующие выводы: наименьшее значение СКО прогноза, не превышающее 0,003 м, было получено при применении метода опорных векторов; большие значения СКО прогноза методов линейной регрессии, Light Gradient Boosting Machine наблюдаются на марках с резким всплеском значений осадок; наибольшее значение СКО прогноза выявлено при прогнозировании методом Light Gradient Boosting Machine. Также отметим метод

адаптивной регрессии на основе градиентного спуска, СКО прогноза которого, кроме прогноза на марке 1301, не превышала 0,004 мм.

Также 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.

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.

Было выполнено моделирование в программном продукте на основе метода конечных элементов. В соответствии с выполненным расчетом наименьшее значение осадки было выявлено по оси автомобильной дороги. Предварительные значения осадки на этапе консолидации представлены на рисунках 7-8. Также была определена зона влияния насыпи и места наибольшего выпора грунта. Таким образом, проектирование высотной опорной сети было выполнено вне зоны возможного влияния насыпи. Далее была создана прогнозная модель на основе рекуррентной нейронной сети долговременной и кратковременной памяти и было выполнено как одномерное (только по геодезическим данным), так и многомерное (по значениям осадок и величин избыточного порового давления на глубинах 2,5 м  $\Delta u_{2,5\text{м}}$  и 4,5 м  $\Delta u_{4,5\text{м}}$ ) многошаговое прогнозирование. При этом, в качестве обучающей выборки были использованы результаты измерений за 327 дней, а прогноз был выполнен на 109 дней. Затем было выполнено сравнение СКО прогноза при одномерном и многомерном прогнозировании. Результаты подбора параметров при прогнозе осадок по данным геодезического мониторинга представлены в таблице 3. Общий алгоритм предсказания осадок по данным геотехнического мониторинга отображен на рисунке 9.

В результате оценки полученных прогнозных значений было выявлено уменьшение СКО прогноза (таблица 4). Таким образом, с учетом дополнительных факторов наблюдалось увеличение точности прогнозирования на 5-7%.

### **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 ни-

велирования, 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. 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.

2. **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.

3. 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. – 2021. – Т. 26. – № 3. – С. 20-27. – DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-20-27.

4. **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.

*Публикации в прочих изданиях:*

5. 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.

6. **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. Брынть // 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.

7. **Баширова, Д.Р.** Моделирование локальной поверхности квазигеоида на линейных объектах // 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.

8. **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.

9. **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.

*Свидетельство:*

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616905 Российская Федерация. Программа определения осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях: № 2022616905: заявл. 18.04.2022: опубл. 18.04.2022 / **Д.Р. Баширова**, В.А. Ламехов, М.Я. Брынть. – М.: Роспатент, 2022.

Таблица 1 – Сравнительный анализ точности интерполяционных методов

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
Асимметрия, м	1,041	1,407	1,303	1,323	-0,097	2,127
Экссесс, 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

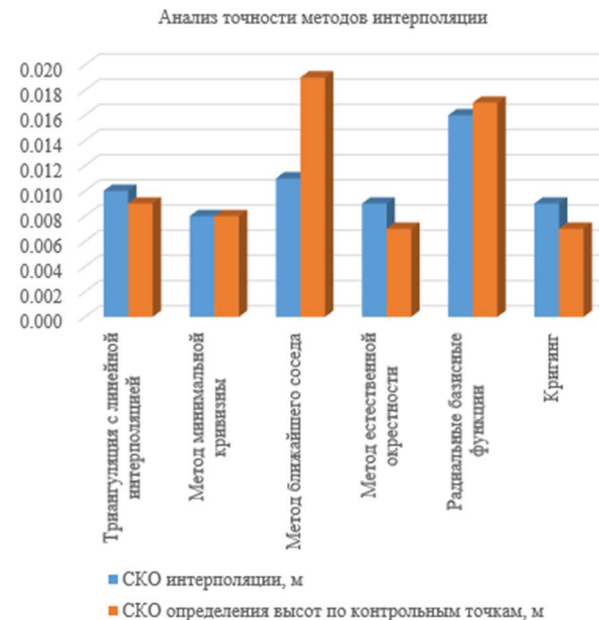


Рисунок 1 – Сравнительный анализ точности интерполяционных методов

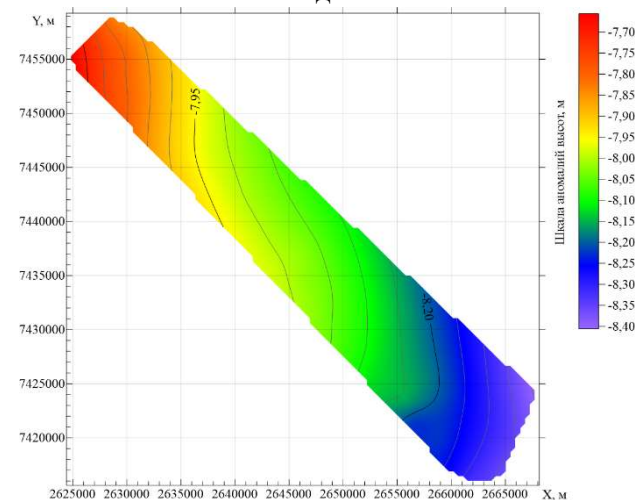


Рисунок 2 – Создание поверхности локального квазигеоида для линейного объекта методом минимальной кривизны

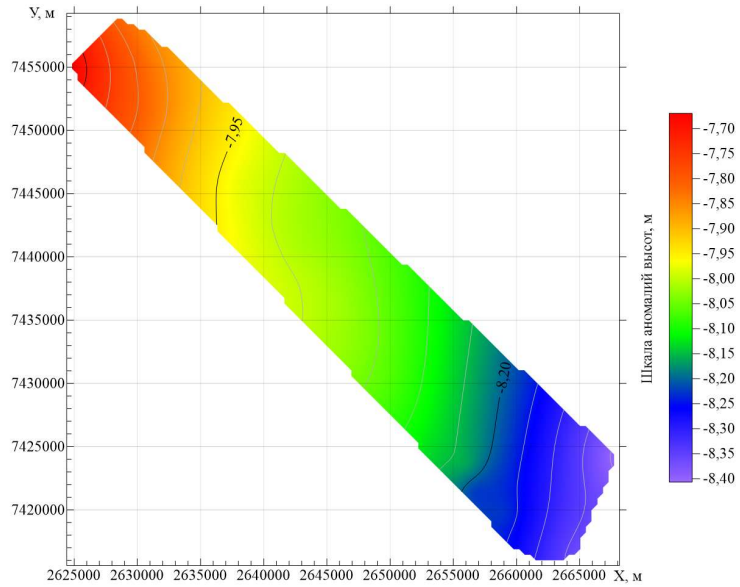


Рисунок 3 – Создание поверхности локального квазигеоида для линейного объекта методом кригинга

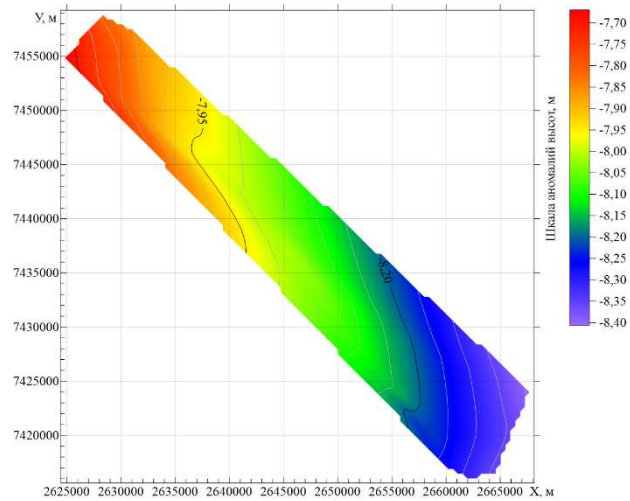


Рисунок 4 – Создание поверхности локального квазигеоида для линейного объекта методом естественной окрестности

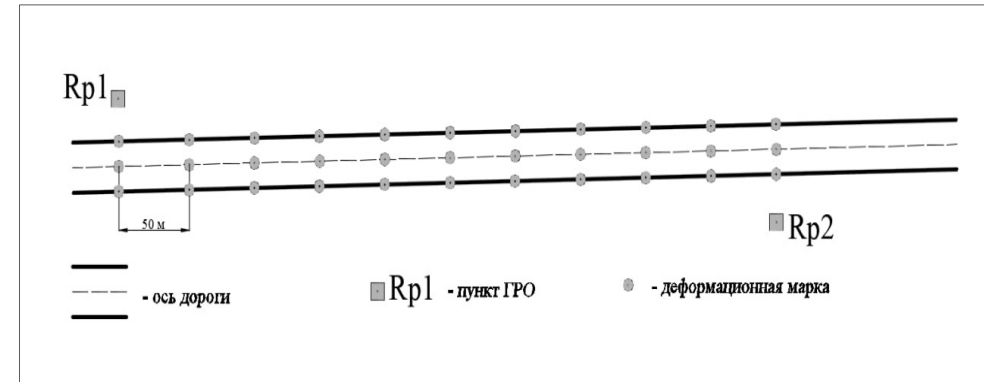


Рисунок 5 – Схема расположения деформационных марок

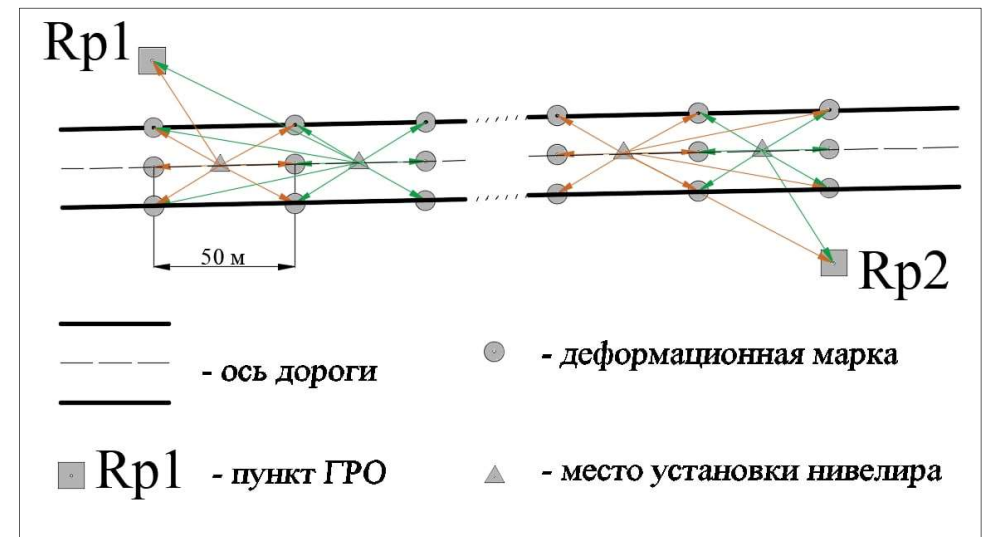


Рисунок 6 – Схема взаимного способа нивелирования

Таблица 2 – Расчет СКО прогнозирования осадок рассмотренными методами

Метод прогнозирования	СКО прогноза, м					
	1101	1201	1301	2101	2201	2301
Метод линейной регрессии	0,004	0,012	0,009	0,003	0,008	0,006
Метод адаптивной регрессии на основе градиентного спуска	0,002	0,004	0,009	0,003	0,003	0,002
Метод случайного леса	0,003	0,005	0,008	0,004	0,005	0,004
Метод опорных векторов	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

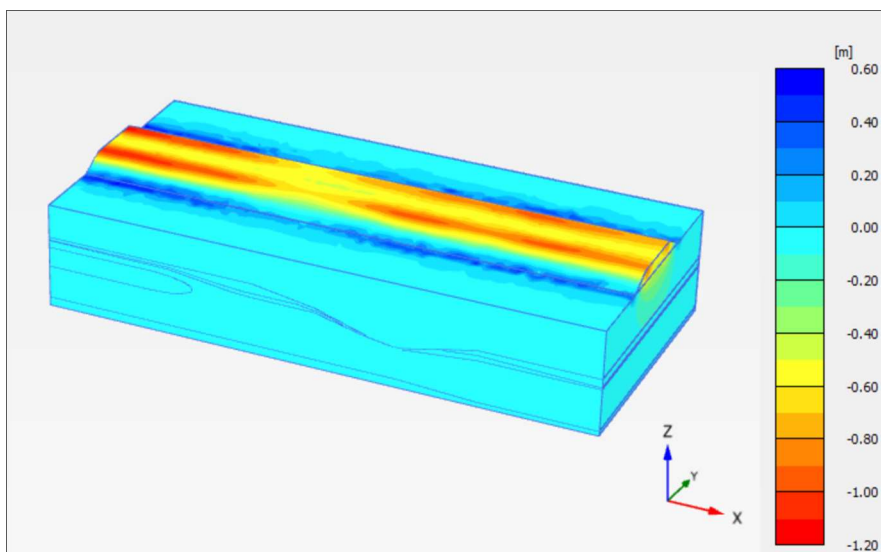


Рисунок 7 – Предварительные значения осадки на этапе консолидации

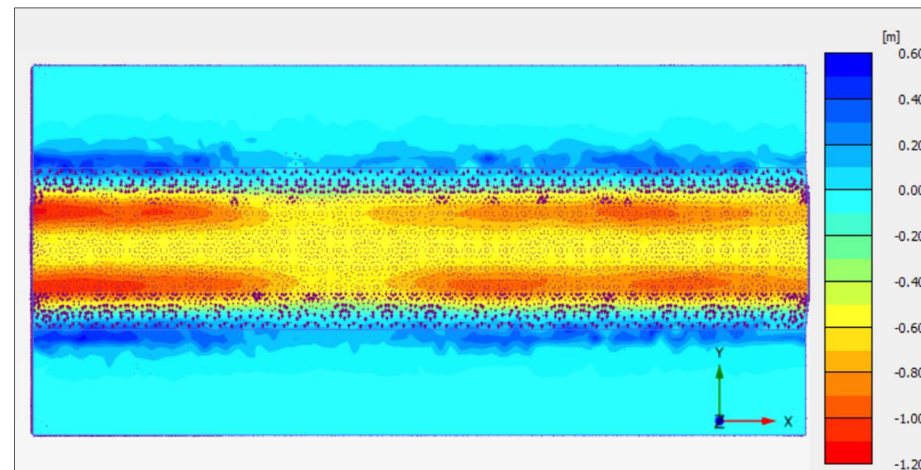


Рисунок 8 – Предварительные значения осадки на этапе консолидации. Вид сверху

Таблица 3 – 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

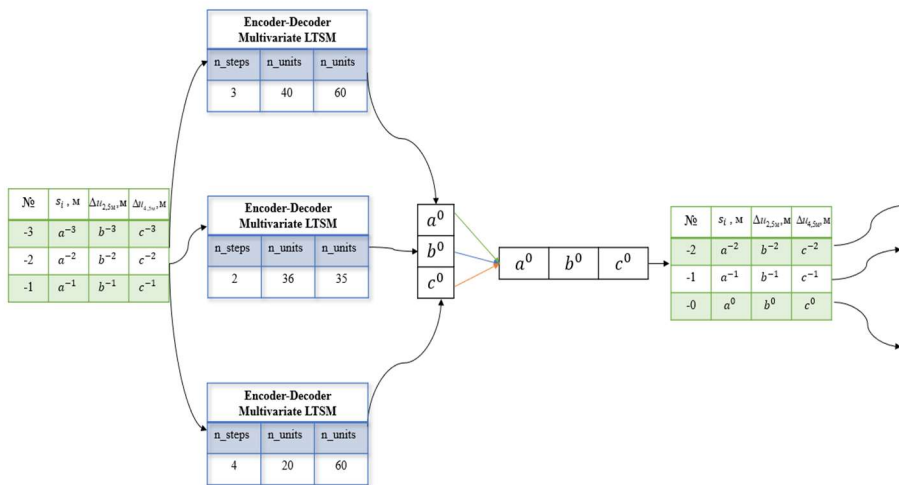


Рисунок 9 – Общий алгоритм предсказания осадок по данным геотехнического мониторинга

Таблица 4 – Результаты прогнозирования на основе данных геотехнического мониторинга

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