

На правах рукописи

Васильев Глеб Евгеньевич



**МЕТОД ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ В НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ
СЕТИ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ**

Специальность 1.6.22. Геодезия

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

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Мустафин Мурат Газизович

Официальные оппоненты:

Вшивкова Ольга Владимировна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», кафедра высшей геодезии, заведующая кафедрой;

Аврунев Евгений Ильич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», советник при ректорате по научной деятельности.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **08 апреля 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 06 февраля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В условиях интенсивного и многообразного строительства, включающего возведение уникальных сооружений и монтаж различного оборудования, вопросы обеспечения эффективности и безопасности ведения работ и эксплуатации строительных объектов приобретают первостепенное значение. При этом основным методом наблюдения за устойчивостью объекта, его положением в пространстве, отклонениями от проектного положения и развитием опасных деформационных процессов, приводящих к авариям, является геодезический деформационный мониторинг.

Под деформационным мониторингом понимается проектирование и создание специальной сети, проведение систематических наблюдений за ее пунктами, обработка результатов наблюдений, их оценка и интерпретация, проверка соответствия нормативным значениям и прогноз развития процесса. При этом деформационные сети по принципу определения координат разделяют на 2 типа: сети, опирающиеся на исходные пункты (закрепленные) и свободные (незакрепленные). Первые содержат исходные пункты за пределами зоны деформаций, незакрепленные сети не имеют исходных пунктов. Второй тип сетей недостаточно изучен и его полноценное применение стало возможным лишь в последнее время и связано с появлением компьютерных технологий и электронных измерительных приборов. В то же время незакрепленные сети обладают рядом преимуществ, их использование в целях мониторинга позволяет достичь значительно большей точности определения деформаций при использовании современного геодезического оборудования.

Методы и средства проведения работ по геодезическому мониторингу, рекомендованные существующими нормативными документами в данной области, несмотря на доказанную эффективность не позволяют обеспечить проведение работ на всем многообразии возможных объектов мониторинга. Такие методы, как геометрическое и гидростатическое нивелирование или наземная стереофотограмметрия зачастую ограничены условиями производства работ, например, видимостью, условиями окружающей среды, допустимо-

стью установки постоянного оборудования или проведения фото-съемки. В тоже время метод линейно-угловых построений, включающий также и тригонометрическое нивелирование, при использовании современных координатоопределяющих систем не уступает другим методам в точности определения смещений, будучи при этом лишенным описанных выше недостатков. Применение высокоточных электронных тахеометров и лазерных трекеров позволяет реализовать метод свободных станций, обеспечивающий большую мобильность в ходе работ и, как следствие, возможность проведения измерений в условиях активного строительства и модернизации наблюдаемых объектов вне зависимости от их конфигурации и размеров. При этом методы и методики проведения измерений с использованием такого оборудования и принципа «свободных станций» недостаточно изучены, не формализованы и не закреплены в нормативной литературе. Для анализа полученных измерительных данных в данном случае требуется разработка специфических вычислительных алгоритмов, позволяющих проводить обработку массивов пространственных данных.

Обозначенные вопросы определяют актуальную задачу – совершенствование геодезического мониторинга деформаций посредством разработки метода обработки результатов пространственных линейно-угловых измерений в незакрепленной геодезической сети.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиями методов мониторинга деформаций занимались многие отечественные и зарубежные ученые. В разное время данной темой так или иначе касались такие исследователи, как М.М. Машимов, Ю.И. Маркузе, В.А. Коугия, Г.В. Макаров, В.Д. Большаков, В.М. Мартусевич, В.Н. Ганьшин, А.В. Зубов, А.Ф. Стороженко, Б.Н. Дьяков, В. Карпенко, В.Ф. Черников, Г.К. Ботян, В.А. Гордеев, Б.Т. Мазуров, М.Г. Мустафин, М.Я. Брын, Н.В. Канашин, П. Марчак, В.И. Кафтан, С.В. Тюрин, Ю.Е. Федосеев, Ю.Н. Корнилов, Г.А. Шеховцов, А. Костехель, А. Майр, В. Каминский, Д. Мельбурн, З. Вишневский, И. Кох, К. Новел, М. Бремер, М. Рютцингер, S.L. Kuang и многие другие.

Объект исследования - участки земной поверхности, здания и сооружения и их пространственное положение.

Предмет исследования - методы измерений и обработки деформационных процессов для геодезического мониторинга.

Цель работы - повышение точности и оперативности оценки деформаций сооружений на основе применения метода преобразования координат.

Идея работы заключается в использовании при обработке результатов циклических наблюдений пунктов незакрепленной деформационной сети, выполненных со свободных станций, параметров преобразования координат для перевода в единую систему на основе разработанного прямого поискового способа оптимизации.

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

1. Анализ существующих методик и программных разработок по оценке деформационных процессов.
2. Разработка алгоритма обработки результатов циклических наблюдений в незакрепленных сетях специального назначения.
3. Разработка алгоритма оценки смещений пунктов сети специального назначения.
4. Разработка программного обеспечения на основе созданного алгоритма, проверка метода в условиях реального производства.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод сравнения результатов циклических наблюдений деформаций пунктов незакрепленных геодезических сетей специального назначения, выполненных со свободных станций.
2. Разработан алгоритм оценки деформаций пунктов геодезической сети специального назначения при повторных наблюдениях на основе перевычисления параметров Гельмерта в пространственной системе координат.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 1.6.22. Геодезия по пунктам:

3. «Создание и развитие геодезической координатно-временной основы различного назначения с использованием геодезических, астрономических, гравиметрических и других (космических, наземных, подземных и подводных) методов измерений; оценка их ста-

бильности и характера изменений, вопросы проектирования и оптимизации. Разработка и развитие теорий построения и реализации координатных, высотных и гравиметрических систем отсчета».

10. «Дистанционный геодезический мониторинг состояния окружающей среды, в первую очередь, опасных процессов и явлений, способствующих возникновению стихийных бедствий и кризисных ситуаций, в том числе путем создания сетей непрерывных и повторных наземных, морских и спутниковых наблюдений».

12. «Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений, в том числе с применением робототехники. Геодезический мониторинг устойчивости зданий и сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов».

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость заключается в создании алгоритмов приведения в единую систему координат независимых пространственных определений положений пунктов незакрепленной геодезической сети, что позволило разработать метод обработки результатов мониторинговых наблюдений.

Практическая значимость заключается в разработке инженерной методики построения картины пространственных деформаций на основе обработки результатов пространственных линейно-угловых измерений, проведенных со свободных станций в незакрепленной геодезической сети с применением координатоопределяющей технологии; создании программного обеспечения, позволяющего провести анализ деформационного процесса с использованием разработанного метода. Получен акт о внедрении результатов диссертационных исследований в ООО «Промышленная геодезия» от 13.12.2024 г.

Методология и методы исследования. Методология исследования состоит в последовательном выполнении следующих работ: обобщении опыта мониторинговых наблюдений; проведении многовариантного моделирования деформационных сетей на предмет определения геометрических параметров, при которых возможно

обеспечение требуемой точности определения смещений пунктов по результатам обработки наблюдений со свободных станций; практической реализации разработанного метода обработки результатов геодезических измерений.

В ходе работ использованы методы математической статистики, компьютерное моделирование, натурные измерения с применением абсолютных лазерных трекеров. Для реализации разработанного алгоритма использовались система MathCad, язык программирования Python в кроссплатформенной интегрированной среде разработки PyCharm.

Положения, выносимые на защиту:

1. Деформационный мониторинг зданий и сооружений следует выполнять со свободных станций для незакрепленной геодезической сети специального назначения: при этом сравнение результатов циклических наблюдений проводится путем сравнения пространственных положений пунктов с использованием параметров преобразования Гельмерта и приведением в единую систему координат.

2. Определение величины и направления деформаций при мониторинге выполняется по разработанному алгоритму оптимизации целевой функции, зависящей от параметров преобразования Гельмерта, путем прямого поиска без использования производных целевой функции.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается согласованностью теоретических исследований с результатами натурных данных геодезических наблюдений за деформациями уникального инженерного сооружения в одном из научных центров на территории Российской Федерации (производственный объект ООО «Промгеодезия»).

Апробация результатов диссертации проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных. За последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

1. IV Всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, Картография, Геоинформатика и Кадастры. Производство и образование» (г. Санкт-Петербург, 27-29 сентября 2022 г.);

2. Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, апрель 2023 г.);

3. V Всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, Картография, Геоинформатика и Кадастры. Инновации в науке, образовании и производстве» (г. Санкт-Петербург, 31 октября-1 ноября 2024 г.);

4. LXXI Международная научно-практическая конференция «Advances in Science and Technology» (г. Москва, 15 сентября 2025 г.);

5. II Международная научно-практическая конференция «Территория науки: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Пенза, 15 сентября 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке алгоритма поиска пространственных деформаций на основе обработки данных пространственных измерений со свободных станций, проведении экспериментальных работ по моделированию деформационных процессов и их анализу посредством созданного алгоритма, участии в натурных измерениях на объектах мониторинга.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 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), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 129 наименований, и 5 приложений. Диссертация изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков и 6 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю - д.т.н., доценту, заведующему кафедрой инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II Мустафину М.Г. Автор выражает глубокую признательность к.т.н. Зубову А.В. за идеи, лежащие в основе данной работы, а также за рекомендации, советы и помощь в ходе выполнения исследований.

Автор выражает также благодарность всем преподавателям и сотрудникам кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за полезные советы и рекомендации и поддержку в ходе написания данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проводимых исследований, обозначены цели, задачи, научная новизна работы, сформулирована научная новизна работы и выносимые на защиту положения, описан вклад автора и структура диссертации.

В первой главе рассмотрены существующие подходы к мониторингу деформаций на различных типах объектов, проанализированы требования нормативной литературы. Выделены и рассмотрены вопросы, являющиеся составными частями настоящего исследования: нормативные методы наблюдений за деформациями, применение координатного подхода, применение координатоопределяющей технологии в целях мониторинга, применение метода свободных станций, использование свободных геодезических сетей для целей мониторинга деформаций, методы оценки устойчивости пунктов геодезических сетей и поиска деформаций, поиск параметров связи между пространственными прямоугольными системами координат, дан краткий обзор программного обеспечения для обработки результатов измерений в целях мониторинга деформаций. Конкретизированы задачи последующего исследования.

Во второй главе описываются особенности предлагаемого метода, освещаются факторы, влияющие на результаты обработки пространственных данных при мониторинге деформаций. Описаны частные случаи при вычислении параметров преобразования Гельмерта, связанные с взаимной ориентацией приборов в ходе измерений в рамках цикла наблюдений. Показано влияние особенностей

объекта на количество вычисляемых параметров преобразования координат. Обоснован отказ от учета масштабного коэффициента даже в случаях, когда получаемая схема деформаций показывает сжатие объекта. Описан процесс фильтрации связующих пунктов в ходе вычислений и её влияние на результаты построения деформационной картины. На примере тестовой выборки описывается влияние отдельного смещения при сопоставлении безошибочно определенных сетей, а также сетей со случайно распределенными ошибками, не превышающими установленный в рамках тестирования допуск. Показано изменение полученных параметров преобразования и вычисленных смещений для различного количества связующих пунктов при равных смещениях. Приводится общий порядок построения деформационной картины с применением предлагаемого автором метода. Описаны основные принципы выбора связующих пунктов из общей совокупности пунктов сети, показана возможность разделения наборов связующих пунктов для независимого вычисления параметров преобразования.

В третьей главе разработан метод определения деформаций объекта. При этом приводится сравнение параметрической и поисковой стратегии вычислений на основе обработки одной тестовой выборки данных. Предложен алгоритм определения предварительных значений параметров Гельмерта для целей дальнейшей оптимизации. Описывается математический аппарат параметрического метода при вычислении параметров Гельмерта, приведены формулы и пример расчета в системе MathCad. В рамках описания принципов использования метода прямого поиска с переменным шагом приведены примеры вычислений для плановых и пространственных сетей, описывается математический аппарат с приведением используемых формул и особенности созданных программ на языках VBA для плановых сетей и Python для пространственных. На основе работы с тестовой выборкой анализируется эффективность программы на языке Python в сравнении с существующим программным обеспечением SpatialAnalyzer и с расчетом в среде MathCad с использованием параметрического метода вычислений. На основе сравнения полученных результатов вычислений описанными способами доказана эффективность

применения метода прямого поиска с переменным шагом при вычислении параметров преобразования пространственных сетей в целях поиска деформаций на основе сравнения результатов циклических наблюдений.

В четвертой главе приведены результаты испытаний разработанного метода в производственных условиях. На примере циклических наблюдений за деформациями опоры камеры взаимодействия лазерной установки показаны результаты сравнения сетей нескольких циклов измерений. Описан процесс проведения измерений в незакрепленной сети специального назначения с использованием лазерного трекера, приведены схемы и способ закрепления пунктов, описан порядок наблюдений в рамках цикла. Приведено описание работы со свободных станций. Показано развитие деформационного процесса в виде последовательных схем высотных и плановых деформаций, построенных на основе вычисления пространственных векторов смещений пунктов между циклами.

В заключении приведены основные результаты проведенных исследований, сформулированы выводы.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Деформационный мониторинг зданий и сооружений следует выполнять со свободных станций для незакрепленной геодезической сети специального назначения: при этом сравнение результатов циклических наблюдений проводится путем сравнения пространственных положений пунктов с использованием параметров преобразования Гельмерта и приведением в единую систему координат.

Как правило, определение деформаций рассматриваемого объекта выполняется путем сравнения положений пунктов деформационной сети в каждом цикле наблюдений. При этом сеть покрывает объект исследования, а ее пункты (деформационные марки) располагаются в местах, в наибольшей степени характеризующих деформационный процесс. Построение деформационной сети, последующие наблюдения и их обработка всегда представляли собой важную научно-практическую задачу.

Разработок, касающихся создания мониторинга деформаций, довольно много. В основном они посвящены применению традиционных наблюдений, в основе которых наблюдения с использованием исходных пунктов и деформационных марок. С появлением электронных тахеометров появилась возможность применения наблюдений со свободных станций. При этом создание геодезической сети, производство наблюдений и обработка результатов существенным образом меняется, что требует проведения специальных исследований.

Под незакрепленной сетью специального назначения подразумевается набор пунктов, не имеющих привязки к координатам государственной геодезической сети. Такая сеть создается на территории объекта для решения задач мониторинга деформаций, обеспечения монтажа и регулировки оборудования или иных задач, требующих определения с заданной точностью взаимного положения элементов объекта. При этом система координат задается исходя из конфигурации объекта и обеспечения удобства измерений. В соответствии с Федеральным законом "О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 30.12.2015 N 431-ФЗ создание такой сети может быть обусловлено повышенными требованиями к точности наблюдений. Термин «незакрепленная сеть» является синонимом термина «свободная сеть».

Реализация метода измерений со свободных станций выполняется с использованием электронного геодезического прибора, например, тахеометра. Для объединения результатов измерений со станций в единую сеть и для сравнения таких сетей, относящихся к отдельным циклам наблюдений, необходимо использование специфических вычислительных подходов. Показал свою эффективность подход, основанный на объединении наборов данных, полученных со свободных станций в различных системах координат, путем вычисления параметров Гельмерта для приведения координат в единую систему.

Изменение масштабного коэффициента между циклами наблюдений связано с такими факторами, как температурное расши-

рение или влияние систематической ошибки. Учет масштабного коэффициента в процессе расчета смещений часто приводит к ошибке: фактические смещения могут быть не обнаружены. В то же время при влиянии, например, температурного расширения при совмещении сетей направление вычисленных смещений позволит установить характер изменений и отделить результаты влияния условий окружающей среды от иных факторов. Таким образом, масштабный коэффициент в ходе процедуры вычисления параметров связи между системами координат (свободными станциями) при мониторинге деформаций следует сохранять постоянным и равным единице.

Три вращательные степени свободы могут быть представлены в различном виде, например, углами Эйлера или кватернионами. Наиболее удобным представлением с точки зрения наглядности преобразования является выражение вращательных степеней свободы как углов вращения вокруг осей системы координат. При этом вычисляться в зависимости от особенностей конкретной задачи могут как все три угла, так и один угол вращения вокруг оси OZ . Второй случай характерен для тех случаев наблюдений, когда оси OZ двух систем координат сонаправлены, что возможно при приведении оси OZ к направлению, параллельному отвесной линии. Такой случай является предпочтительным для мониторинга зданий и сооружений, так как позволяет разделить при анализе вычисленные смещения на плановые и высотные для представления результатов анализа в виде, определенном нормативной литературой.

Вычисление параметров Гельмерта для связи двух систем координат производится за счет итеративного сравнения пространственных координат связующих пунктов. При этом выбор связующих пунктов из общего числа пунктов сети может осуществляться как итеративным перебором всех пунктов с определением их стабильности и поэтапной фильтрацией, так и перебором ограниченного числа пунктов, отмеченных как наиболее стабильные. Использование одного из двух описанных подходов к выбору связующих пунктов зависит от характера наблюдаемого объекта. Так, если наблюдаемым объектом является здание или сооружение, то в качестве связующих необходимо использовать пункты, ближайшие к основанию или фун-

даменту. Если наблюдаемый объект является инженерной конструкцией сложной формы, для которой заведомо невозможно определить перечень теоретически наиболее стабильных пунктов, то для сравнения необходимо определить пункты, сохранившие свое положение в рамках итеративного перевычисления параметров по всем пунктам сети.

При вычислении параметров связи между сетями, пункты которых сохранили своё положение, разность координат для всех пунктов в перемещаемой и базовой сетях будет стремиться к нулю. Однако за счет погрешностей определения координат и фактического смещения пунктов между циклами наблюдений, координаты пунктов в двух сетях будут отличаться. Вектор разности координат, превышающий заданный с учетом используемого оборудования критерий точности, являются показателем физического смещения пункта. Суть итеративного перевычисления параметров заключается в следующем: при вычислении параметров Гельмерта, связывающих две сети, необходимо исключить влияние сместившихся пунктов на результаты вычисления параметров преобразования. Для этого необходимо многократно вычислить параметры на каждой итерации, исключая пункт с максимальным вектором разности координат из перечня связующих пунктов в случаях, когда вектор разности превышает заданный критерий точности. При этом число связующих пунктов должно оставаться достаточным для проведения анализа. Минимальное количество связующих пунктов для пространственных сетей, необходимое для оценки точности результатов, – 4 пункта. С увеличением числа связующих пунктов увеличивается надежность вычисления параметров.

В рамках исследования был выполнен анализ деформаций на производственном объекте ООО «Промгеодезия» по результатам многолетних наблюдений. Измерения в каждом цикле выполнены с использованием трекера серии Leica AT40x методом свободных станций. Схема размещения пунктов представлена на рисунке 1.

Для каждого цикла вычислены параметры Гельмерта, связывающие сеть данного цикла с сетью нулевого цикла. В качестве связующих пунктов использовались пункты на нижнем уровне сооружения с учетом фильтрации наиболее смещенных пунктов при их

наличии. По результатам вычисления параметров преобразования вычислены пространственные смещения пунктов и на их основе построены картограммы высотных и плановых смещений. На рисунках 2-7 показаны картограммы в трех циклах наблюдений. Построенные картограммы показывают поступательное развитие деформационного процесса от цикла к циклу, что говорит о работоспособности метода.

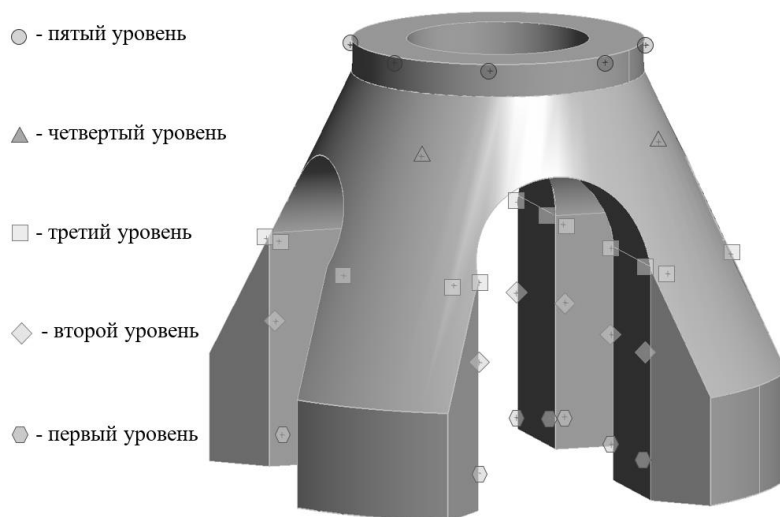


Рисунок 1 – Схема расположения пунктов на объекте мониторинга

2. Определение величины и направления деформаций при мониторинге выполняется по разработанному алгоритму оптимизации целевой функции, зависящей от параметров преобразования Гельмерта, путем прямого поиска без использования производных целевой функции.

Для сопоставления геометрии сетей на основе вычисления параметров Гельмерта необходимо найти такие величины параметров, при которых вектора смещений всех связующих пунктов будут минимальны. Данная задача представляет собой классическую задачу многомерной оптимизации. Для её решения эффективно применение метода прямого поиска с переменным шагом, обладающего рядом преимуществ:

1. Возможность получить решение при любых предварительных значениях параметров.
2. Отсутствие этапа составления уравнений поправок, уравнений связи и прочих подготовительных операций.
3. Сравнительная простота алгоритмизации процесса вычислений.

Для реализации метода создан вычислительный алгоритм, реализованный в программе для автоматизированного поиска величин параметров преобразования и построения деформационной картины в виде векторов пространственных смещений пунктов. На рисунке 8 представлен пример схемы вычисления одного параметра на примере угла w_z в рамках цикла с переменным шагом.

Целевой функцией в данном случае является выражение (1).

$$f(X0, Y0, Z0, w_x, w_y, w_z) = \sum_{i=1}^n \left(\begin{pmatrix} X1_i \\ Y1_i \\ Z1_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X1Teor_i \\ Y1Teor_i \\ Z1Teor_i \end{pmatrix} \right)^2 \quad (1)$$

где $X0, Y0, Z0, w_x, w_y, w_z$ – параметры преобразования Гельмерта;

$X1_i, Y1_i, Z1_i$ – значения координат точек в первой системе координат;

$X1Teor_i, Y1Teor_i, Z1Teor_i$ – теоретические значения координат в первой системе координат, полученные путем преобразования значений координат во второй системе через параметры Гельмерта.

Для анализа эффективности метода проведены вычисления тремя способами: в SpatialAnalyzer, с помощью параметрического метода расчета в среде MathCad и с помощью созданной программы, основанной на методе прямого поиска с переменным шагом. В таблице 1 представлены сравнительные результаты вычислений.

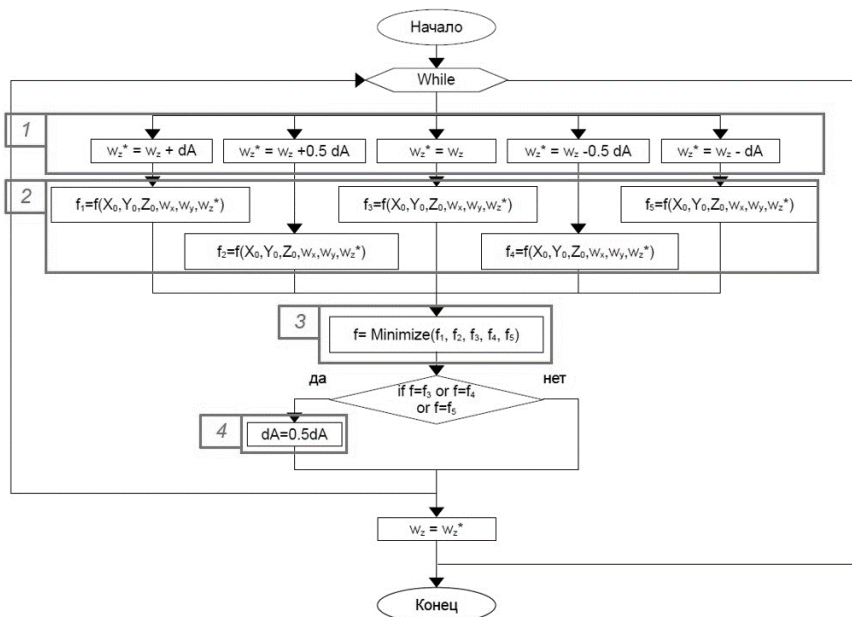


Рисунок 8 – Схема вычисления параметра w_z в алгоритме с переменным шагом: 1 — вычисление значения параметра w_z в пяти вариантах; 2 — вычисление значений целевой функции для пяти вычисленных значений параметров; 3 — поиск минимального в рамках итерации значения целевой функции из пяти посчитанных; 4 — изменение величины шага при необходимости

Таблица 1 – Сравнительная таблица результатов вычислений тремя методами по тестовой выборке: D_{mag} обозначает скаляр пространственного вектора смещения пункта по результатам вычислений

Параметр	SpatialAnalyzer (SA)	Параметрическое вычисление (ПВ)	Поисковый метод (ПМ)
X_0 , мм	-100.0154	-100.0157	-100.0154
Y_0 , мм	-99.9848	-99.9849	-99.9848
Z_0 , мм	-99.9926	-99.9927	-99.9927
w_z	-45°00'02.46"	-45°00'02.45"	-45°00'02.45"

Продолжение таблицы 1

Имя точки	M588	M596	M598	M691	M950
D_{mag} , СА, мм	0.094	0.184	0.075	0.030	0.187
D_{mag} , ПВ, мм	0.093	0.184	0.075	0.030	0.187
D_{mag} , ПМ, мм	0.094	0.184	0.074	0.030	0.187
Имя точки	M954	M955	M957	M958	M959
D_{mag} , СА, мм	0.222	0.198	0.288	0.245	0.220
D_{mag} , ПВ, мм	0.222	0.199	0.288	0.245	0.220
D_{mag} , ПМ, мм	0.222	0.199	0.288	0.245	0.220
Имя точки	M960	M1186	M1189	M1192	M1193
D_{mag} , СА, мм	0.167	0.076	0.132	0.070	0.086
D_{mag} , ПВ, мм	0.168	0.076	0.131	0.070	0.086
D_{mag} , ПМ, мм	0.168	0.076	0.131	0.070	0.086

Полученные результаты доказывают эффективность предлагаемого автором метода вычислений:

1. Предельная разница между вычисленными линейными параметрами преобразования составляет 0.0003 мм при вычислении параметра X_0 параметрическим и поисковым методом (результаты вычислений в SpatialAnalyzer идентичны вычислениям с применением предлагаемого метода).

2. Результаты вычислений параметра вращения w_z отличаются не более чем на 0.01", при этом величины параметра, вычисленные поисковым и параметрическим методом, идентичны.

3. Результаты вычисления смещений отличаются не более чем на 0.001 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предлагается и подробно рассматривается метод обработки результатов линейно-угловых пространственных измерений в незакрепленной геодезической сети при деформационном мониторинге. В ходе работы достигнуты следующие результаты:

1. Предложен метод обработки результатов пространственных линейно-угловых измерений, позволяющий построить деформационную картину на основе сравнения геометрии уравненных незакрепленных сетей двух циклов измерений путем вычисления параметров связи между их системами координат.

2. Показаны особенности и ограничения метода, связанные с влиянием окружающей среды, возможностями применяемого оборудования, необходимостью выбора стабильных пунктов для вычисления параметров преобразования.

3. Разработано программное средство на языке VBA, реализующее тест общего соответствия с пересчетом параметров Гельмерта для плановых сетей, автоматизирующий деформационный анализ с итеративной фильтрацией в двумерном пространстве (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665752).

4. Разработано программное средство на языке Python, реализующее тест общего соответствия с пересчетом параметров Гельмерта для пространственных сетей, позволяющее сопоставить две уравненные незакрепленные сети на основе выбранных опорных пунктов и визуализирующее вычисленные смещения в виде векторов смещений.

5. Проведено сравнение результатов обработки данных в существующем программном обеспечении (SpatialAnalyzer) со строгими и нестрогими методами расчета параметров преобразования, сделаны выводы о качестве расчетов в существующем ПО и с использованием поисковых методов.

6. Показано использование метода с использованием лазерного трекера и обработкой в иностранном программном обеспечении SpatialAnalyzer на примере многократных циклических наблюдений за деформациями опоры камеры взаимодействия лазерной установки. Акт внедрения предлагаемого метода в производственную деятельность ООО «Промгеодезия» от 13.12.2024. Данный пример подтверждает эффективность метода, при этом показывая, что достижимая точность определения смещений пунктов (фактически - деформаций) значительно превышает требуемую точность для I класса точности согласно ГОСТ 24846—2019 и соответствует требованиям локальных актов, инструкций и требований.

7. Перспектива дальнейших исследований состоит в развитии метода, автоматизации процесса выбора опорных пунктов, применении подходов с анализом альтернативных гипотез для увеличения

надежности анализа, разработке полноценного программного обеспечения на основе модернизированных алгоритмов для анализа больших массивов пространственных данных.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Мустафин, М. Г. Оценка смещений пунктов свободной геодезической сети при повторных наблюдениях с незакрепленных точек / М. Г. Мустафин, **Г. Е. Васильев** // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 38-48. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-38-48. – EDN QNBGJB.

2. Мустафин, М. Г. Методика геодезического мониторинга с использованием свободной деформационной сети / М. Г. Мустафин, **Г. Е. Васильев** // Маркшейдерский вестник. – 2024. – № 1. – С. 58-66. – EDN LKWDTF.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

3. Мустафин, М. Г. Применение метода свободной станции для мониторинга элементов плавучих сооружений / М. Г. Мустафин, А. В. Зубов, В. В. Петров, **Г. Е. Васильев** // Геодезия и картография. – 2025. – Т. 86, № 6. – С. 2-12. – DOI 10.22389/0016-7126-2025-1020-6-2-12. – EDN TTVSGT.

4. Мустафин, М. Г. Методика оценки деформационного процесса при мониторинге инженерных сооружений / М. Г. Мустафин, А. В. Зубов, **Г. Е. Васильев** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 8. – С. 92-113. – DOI 10.25018/0236_1493_2025_8_0_92. – EDN EDQRTC.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665752 Российская Федерация. Программа для анализа плановых деформаций свободных геодезических сетей. Заявка № 2024663808: заявл. 18.06.2024; опубл. 05.07.2024 / М. Г. Мустафин, А. В. Зубов, **Г. Е. Васильев**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 75,2 КБ.

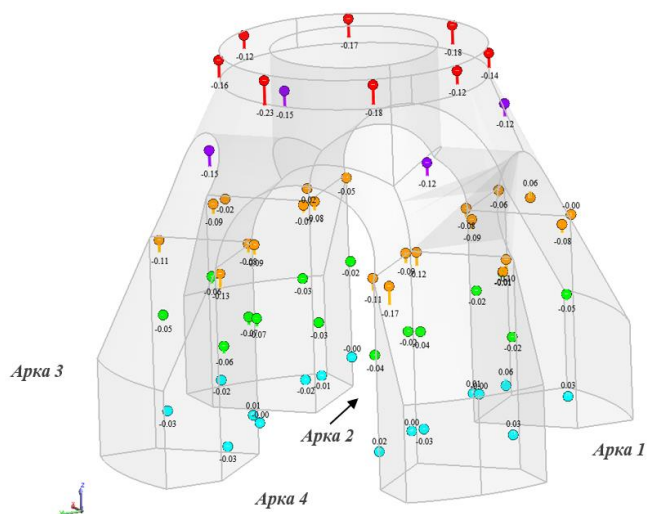


Рисунок 2 - Картограмма высотных смещений
пунктов опоры по состоянию на декабрь 2022
года, все значения приведены в мм

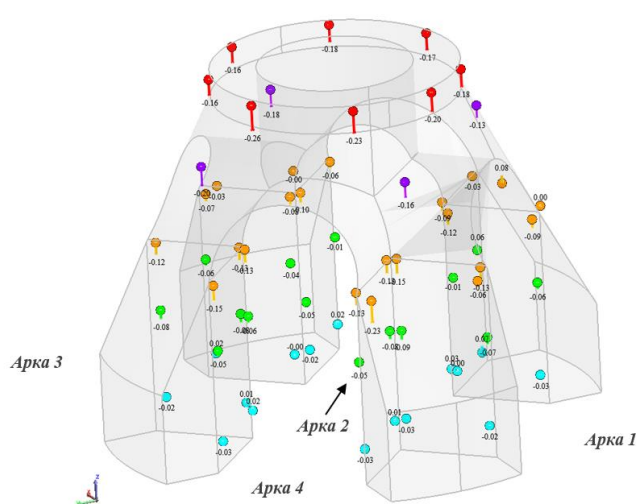


Рисунок 3 - Картограмма высотных смещений
пунктов опоры по состоянию на июль 2023
года, все значения приведены в мм

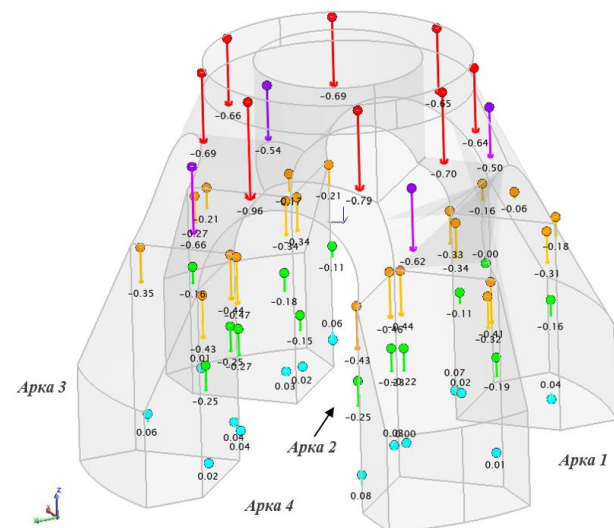


Рисунок 4 - Картограмма высотных смещений
пунктов опоры по состоянию на сентябрь
2024 года, все значения приведены в мм

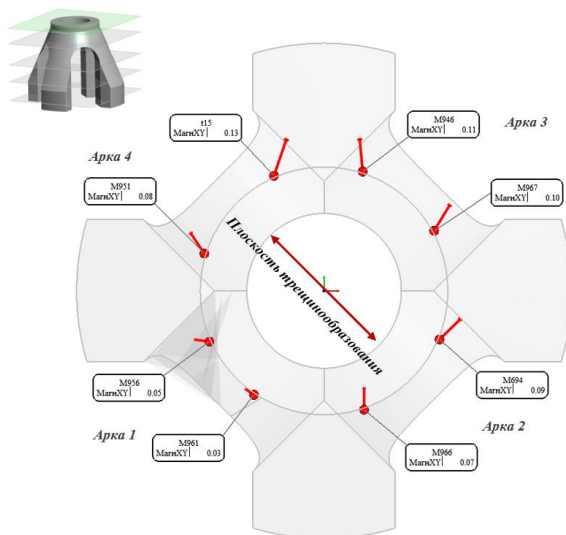


Рисунок 5 - Картограмма плановых смещений
пунктов пятого уровня опоры по состоянию на
декабрь 2022 года, все значения приведены в мм

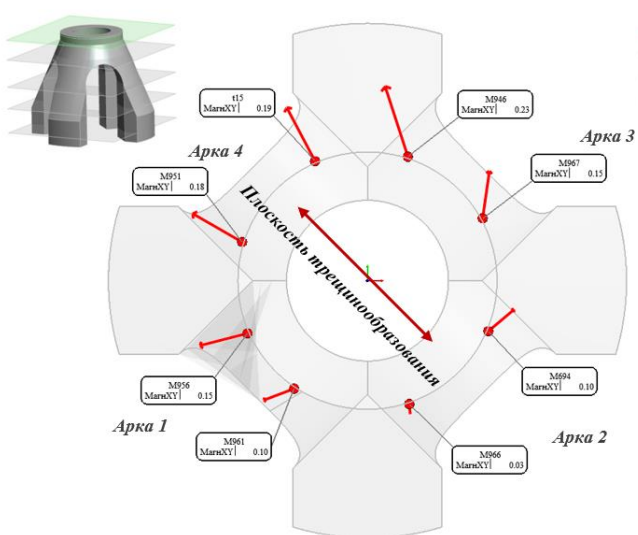


Рисунок 6 - Картограмма плановых смещений
пунктов пятого уровня опоры по состоянию на
июль 2023 года, все значения приведены в мм

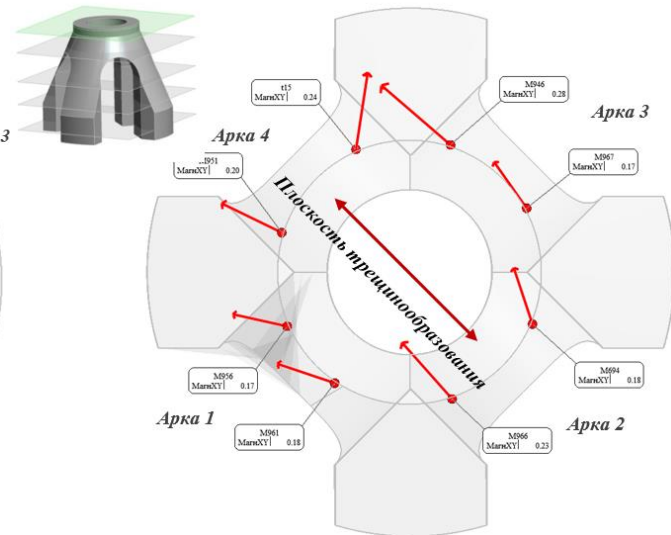


Рисунок 7 - Картограмма плановых смещений
пунктов пятого уровня опоры по состоянию на
сентябрь 2024 года, все значения приведены в мм