

На правах рукописи

Шевченко Гриттель Геннадьевна



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗДАНИЙ И
СООРУЖЕНИЙ СПОСОБОМ СВОБОДНОГО
СТАНЦИОНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОИСКОВОГО МЕТОДА НЕЛИНЕЙНОГО
ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

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

Санкт-Петербург – 2020

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Брынь Михаил Ярославович

Официальные оппоненты:

Кафтан Владимир Иванович

доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН), главный научный сотрудник.

Симонян Владимир Викторович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» кафедра инженерных изысканий и геоэкологии, доцент.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 24 декабря 2020 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., дом 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для обеспечения требований безопасности зданий и сооружений необходимо проводить систематические наблюдения за их техническим состоянием, наличием и скоростью развития деформационных процессов. Одним из видов мониторинга технического состояния зданий и сооружений является геодезический мониторинг, под которым понимается систематический контроль на основе геодезических измерений состояния строительных конструкций, зданий и сооружений с целью оперативного предупреждения или устранения выявленных негативных явлений и процессов.

Наибольшее распространение в производственной практике проведения геодезического мониторинга за смещениями зданий и сооружений получили методы на основе полигонометрии с использованием электронных тахеометров. Однако их применение в условиях плотной городской застройки не позволяет в большинстве случаев обеспечить достижение требований к точности определения деформаций. В настоящее время все большее развитие приобретает метод свободного стационарирования, суть которого заключается в проведении геодезических измерений электронным тахеометром с некоторой точки, положение которой определяется обратной засечкой от исходных пунктов, а передача координат на деформационные марки выполняется, как правило, полярным способом.

В тоже время в связи с нарастающей производительностью компьютеров, большим массивом измеряемых величин встает необходимость в быстрой автоматизированной обработке результатов геодезических измерений. Для обработки результатов геодезических измерений все большее применение начинают приобретать методы нелинейного программирования, в частности, поисковый метод, преимуществом которого является возможность математической обработки результатов измерений без вычисления частных производных. Кроме этого поисковые методы обладают простотой реализации алгоритмов решения задач.

Таким образом, разработка технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений способом свободного стационарирования с применением автоматизированной программы, работающей на основе поискового метода нелинейного программирования, представляется актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам совершенствования существующих и разработке новых методов геодезического мониторинга посвящено множество научных работ. Существенный вклад в развитие методов геодезического мониторинга внесли такие ученые как Ю.И. Беспалов, М.Я. Брынь, В.И. Волков, Ю.П. Гуляев, Ч.Н. Желтко, Б.Н. Жуков, А.К. Зайцев, В.И. Кафтан, Б.Т. Мазуров, М.Г. Мустафин, В.А. Середович, В.В. Симонян, Г.А. Уставич, Ю.Е. Федосеев, Г.А. Шеховцов, Х.К. Ямбаев и др.

Развитием методов математической обработки геодезических измерений занимались известные ученые В.Д. Большаков, М.Д. Герасименко, В.В. Голубев, В.А. Гордеев, Л.Н. Келль, Н.Г. Келль, В.А. Коугия, Г.П. Левчук, Ю.И. Маркузе, М.М. Машимов, Н.А. Урмаев, А.С. Чеботарёв и др.

Развитием методов нелинейного программирования занимались такие видные ученые-математики как David M. Himmelblau, Willard I. Zangwill, Ходоковский В.А. Заметный вклад в изучение методов нелинейного программирования при решении различных геодезических задач, в т.ч. поисковыми методами, внесли польский ученый Z. Adamczewski, российские ученые Ч.Н. Желтко, А.В. Зубов, М.И. Коробочкин, В.А. Коугия, Г.В. Макаров, В.И. Мицкевич, В.Г. Назаренко, Л.А. Растрин, З.М. Юршанский и др.

Цель работы: разработать технологию геодезического мониторинга, повышающую точность определения деформационных характеристик зданий и сооружений.

Идея работы: в качестве средства для повышения точности предлагается использование способа свободного стационарирования для определения положения деформационных марок с обработкой результатов измерений поисковым методом нелинейного программирования.

Задачи исследования:

1. Проанализировать состояние вопроса по существующей технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений различного уровня ответственности с выявлением ее достоинств и недостатков.

2. Обосновать требования к точности выполнения геодезических измерений способом свободного стационарирования и на ее основе

разработать технологию геодезического мониторинга с применением поискового метода.

3. Разработать методику проектирования геодезических сетей на основе поискового метода и обосновать возможность его применения для уравнивания и оценки точности геодезических построений.

4. Составить прогнозную модель на основе поискового метода и проверить достоверность прогнозных значений.

5. Составить автоматизированную программу на основе поискового метода и проверить корректность ее работы на разных этапах геодезического мониторинга.

Научная новизна работы:

1. Обоснованы требования к точности геодезических измерений при реализации способа свободного стационарирования для определения положения деформационных марок.

2. Разработана методика проектирования геодезических построений поисковым методом на основе «неискаженной модели» сети.

3. Доказана возможность уравнивания и оценки точности большинства геодезических построений (как плановых, высотных, так и пространственных) поисковым методом при различных условиях: равноточные и неравноточные измерения, коррелированные и некоррелированные измерения, без учета и с учетом ошибок исходных данных, а также уравнивание свободных сетей.

4. Предложены методические решения по построению трендовой модели поисковым методом.

5. Разработаны автоматизированные программы обработки и уравнивания данных геодезических измерений поисковым методом.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке теоретических основ определения деформаций способом свободного стационарирования и обработке результатов измерений поисковым методом нелинейного программирования, применение которых позволяет создавать научно обоснованную базу для проведения геодезического мониторинга. *Практическая значимость работы* заключается в том, что разработанная технология геодезического мониторинга нашла применение на реальных объектах и может быть

реализована для широкого использования в условиях плотной застройки.

Методология и методы исследования. При выполнении исследований применялись теоретические и экспериментальные методы, включающие в себя методы сравнительного анализа, теорию ошибок измерений, методы аналитической геометрии на плоскости и в пространстве, метод наименьших квадратов, поисковые методы нелинейного программирования, методы статистических испытаний, методы моделирования геодезических сетей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная технология геодезического мониторинга на основе способа свободного стационарирования с обработкой результатов измерений поисковым методом, позволяет определять деформации зданий и сооружений нормального уровня ответственности в условиях плотной застройки и достигать требований, предъявляемых ко II классу точности измерений.

2. Проектирование геодезических сетей, уравнивание и оценка точности результатов измерений поисковым методом нелинейного программирования, позволяют обрабатывать большинство видов свободных и несвободных геодезических построений как без учета, так и с учетом ошибок исходных данных и их корреляционных связей.

3. Построение прогнозной модели поисковым методом позволяет корректно изучать закономерности процесса деформации и планировать частоту циклов геодезического мониторинга.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается: совпадением результатов проектирования, уравнивания, оценки точности и преобразования результатов геодезических измерений, выполненных поисковым методом, и параметрическим способом метода наименьших квадратов; согласованностью результатов работы разработанной автоматизированной программы на основе поискового метода с программными продуктами «*NW*» проф. Коугия В.А. и «*CREDO_DAT PROFESSIONAL*»; совпадением видов уравнений тренда, подобранных разработанной автоматизированной программой на основе поискового метода, с уравнениями тренда, полученными специальной функцией встроенной в *Microsoft Excel* для этих целей; соответствием спрогнозированных значений деформационных марок, полученных по

подобранному поисковым методом уравнению тренда, с их фактическими значениями, полученными натурными наблюдениями.

Апробация результатов исследования. Основные положения и выводы проведенных исследований докладывались на 8 всероссийских и международных научно-практических конференциях по проблемам геодезии, строительства, техническим наукам, в том числе.: XII Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии при недропользовании» (секция «Инновационные технологии в маркшейдерском деле, геодезии и кадастре»), г. Санкт–Петербург, 27-28 октября 2016 г.; Международная научно-техническая конференция «Пространственные данные – основа стратегического планирования, управления и развития», г. Москва (МИИГАиК), 27-29 мая 2019 г.; Международная научно-техническая конференция «Транспортное строительство в холодных регионах (TRANSOILCOLD 2019)», г. Санкт-Петербург, 20-23 мая 2019 г.; Международная научно–техническая конференция «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (САТРИД-2019), г. Кисловодск, 1-5 октября 2019 г. Результаты диссертационных исследований докладывались на конкурсе проектов НИОКР в рамках программы «У.М.Н.И.К.», а так же на II и IV конкурсе молодежных научных и инновационных проектов «InnoTech» (г. Краснодар), по итогам которых были получены дипломы лауреата второй и первой степени соответственно.

Практическая реализация. Разработанная технология геодезического мониторинга использована при наблюдении за деформациями строящихся и введенных в эксплуатацию жилых зданий и сооружений в Краснодарском крае и на объектах ООО «ТюменьПромИзыскания» (подтверждается актом внедрения).

Личный вклад автора состоит в проведении анализа нормативно–методических документов, регулирующих порядок проведения геодезического мониторинга и требований к точности определения деформаций; самостоятельной разработке приведенной в диссертации технологии определения деформаций зданий и сооружений на основе поискового метода нелинейного программирования; составлении автоматизированной программы на основе поискового метода языком программирования Visual Basic; проведении экспериментальных исследований по определению корректности работы

автоматизированной программы на основе поискового метода. Автором самостоятельно выполнено не менее 90% экспериментальных наблюдений за стабильностью зданий и сооружений.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них: 2 статьи, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science; 1 статья в российском издании, входящем в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science; 2 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК России по специальности 25.00.32 – Геодезия и 2 статьи, входящие в перечень ВАК России по отрасли науки 25.00.00 – Науки о Земле. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 167 наименований, и 5 приложений. Диссертация изложена на 212 страницах машинопечатного текста, содержит 40 рисунков и 54 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационных исследований, формулируются цели и задачи этих исследований, их научная новизна, практическая и теоретическая значимость, а также представляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ существующей технологии геодезического мониторинга и опыта проведения работ на всех этапах геодезического мониторинга от проектирования опорных сетей до прогнозирования деформаций зданий и сооружений различного уровня ответственности. Обоснована необходимость разработки технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений способом свободного стационарирования с использованием поискового метода.

Во второй главе приведено теоретическое обоснование разработанной технологии проведения геодезического мониторинга зданий и сооружений способом свободного стационарирования. Обосновано применение поискового метода для проектирования, уравнивания и оценки точности плановых, высотных и пространственных построений. Показана возможность применения поискового метода для преобразования систем координат и построения уравнения тренда для прогнозирования деформаций.

В третьей главе приведены программные коды разработанных автоматизированных программ, реализующих алгоритм поискового

метода, и позволяющих выполнять обработку результатов измерений на каждом этапе, разработанной технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений. Корректность работы программ проверена на экспериментальных математических моделях.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований этапов технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений, расположенных в г. Краснодар, г. Анапа и других населенных пунктах Краснодарского края. На реальных объектах проверена работа автоматизированных программ и их отдельных кодов для определения горизонтальных смещений, осадок, крена и кручения высоких стальных сооружений.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Разработанная технология геодезического мониторинга на основе способа свободного стационарирования с обработкой результатов измерений поисковым методом, позволяет определять деформации зданий и сооружений нормального уровня ответственности в условиях плотной застройки и достигать требований, предъявляемых ко II классу точности измерений.

Согласно требованиям II класса точности измерений, средняя квадратическая ошибка (СКО) m_{δ} определения горизонтального смещения равна 5 мм. Горизонтальные смещения по осям характеризуются разностью соответствующих координат деформационной марки в разных циклах. СКО определения горизонтального смещения является функцией от смещений по осям, таким образом, $m_p = m_{xy} \sqrt{2} = m_{\delta}$, где m_p – СКО положения деформационной марки; m_{xy} – СКО координат деформационной марки.

Известно, что СКО положения определяемой точки P вычисляется по формуле: $m_p = \sqrt{m_{исх}^2 + m_{изм}^2}$. При определении горизонтальных смещений деформационных марок может быть реализован способ свободного стационарирования. Тогда погрешность измерений $m_{изм}$ будет включать ошибки определения положения тахеометра $m_{ЭТ}$ и ошибки измерений полярным способом $m_{ПС}$ по формуле (1)

$$m_{изм} = \sqrt{m_{ЭТ}^2 + m_{ПС}^2} \cdot \quad (1)$$

Для того чтобы ошибками положения исходных пунктов можно было пренебречь, их доля в общей погрешности не должна превышать 5-10%. Таким образом, для обеспечения точности измерения

горизонтальных смещений в 5 мм по II классу точности $m_{\text{исх}} = 1,6$ мм,

$$m_{\text{изм}} = 4,7 \text{ мм}, m_{\text{ЭТ}} = m_{\text{ПС}} = \frac{m_{\text{изм}}}{\sqrt{2}} = \frac{4,7}{\sqrt{2}} = 3,3 \text{ мм}.$$

Аналогично для вертикальных смещений были получены следующие значения: для II класса точности измерений $m_{\text{исх}} = m_{\text{ЭТ}} = 0,4$ мм, $m_{\text{изм}} = 1,3$ мм.

На основе указанных выше требований к точности определения положения свободной станции, разработана технология геодезического мониторинга способом свободного stationирования (рисунок 1).

Для того чтобы определить величину горизонтальных смещений зданий и сооружений способом свободного stationирования для обеспечения требований II класса точности измерений, предлагается закреплять исходные пункты и деформационные марки отражательными пленками, а работы проводить в следующей последовательности:

1. Определение положения исходных пунктов плановой геодезической сети. Для этого предлагается на первом этапе развить линейно-угловую сеть, с точек которой на втором этапе электронным тахеометром будет выполнено определение положения отражательных пленок – исходных пунктов плановой сети, которые в дальнейшем будут использоваться для проведения геодезического мониторинга способом свободного stationирования. Определение координат исходных пунктов плановой сети выполняется с двух-трех пунктов линейно-угловой сети, но только один раз в нулевом цикле измерений. В последующих циклах выполняется контроль стабильности положения исходных пунктов любым известным методом.

2. Определение положения свободной станции электронного тахеометра от исходных пунктов выполняется обратной засечкой (линейно-угловой, угловой или линейной). Прибор устанавливают в любом месте удобном для дальнейшего наблюдения за деформационными марками.

3. Определение координат деформационных марок осуществляется полярным способом с одной или нескольких станций тахеометра в зависимости от видимости. В последнем случае в схеме измерений появляются избыточные измерения, которые, в свою очередь, позволяют повысить точность конечного результата.

После уравнивания результатов измерений, выполняется преобразование координат в систему координат объекта. Обе задачи решаются поисковым методом, описанным далее. Затем по разностям соответствующих координат деформационных марок вычисляются величины горизонтальных смещений зданий и сооружений.

Осадки предлагается наблюдать в следующей последовательности:

1. *Определяются высоты опорных пунктов (реперов) нивелирной сети.* Сначала развивается нивелирная сеть, состоящая из нескольких реперов, высотное положение которых определяется цифровым нивелиром по программе геометрического нивелирования в соответствии с требованиями класса измерений.

2. *Передается высота с репера нивелирной сети на горизонтальную ось тахеометра:* цифровой нивелир устанавливается между репером нивелирной сети и электронным тахеометром; определяется превышение между репером и горизонтальной осью прибора; вычисляется значение высоты горизонтальной оси электронного тахеометра. Данная процедура выполняется несколько раз для повышения точности определения высоты горизонтальной оси прибора. За итоговое значение высоты горизонтальной оси принимается среднее.

3. *Установка станции электронного тахеометра по высоте:* указывается значение высоты станции, равное вычисленному значению высоты горизонтальной оси прибора, тогда значение высоты прибора принимается равным нулю.

4. *Определение высоты деформационных марок* осуществляется по программе тригонометрического нивелирования.

После уравнивания результатов измерений по разностям соответствующих высот деформационных марок в каждом цикле относительно нулевого и (или) предыдущего определяется величина вертикального смещения зданий и сооружений.

Отметим, что выполнение наблюдений за плановыми и высотными смещениями деформационных марок целесообразно выполнять с одних и тех же установок электронного тахеометра, т.е. с одних и тех же станций, если позволяет обстановка на объекте работ. Так же определение планового и высотного положения деформационных марок, предложенными выше способами, можно выполнять независимо, т.е. с разных станций прибора.

2. Проектирование геодезических сетей, уравнивание и оценка точности результатов измерений поисковым методом нелинейного программирования, позволяют обрабатывать большинство видов свободных и несвободных геодезических построений как без учета, так и с учетом ошибок исходных данных и их корреляционных связей.

Основной задачей нелинейного программирования, в т.ч. поисковых методов, является минимизация функции $f(x)$, где $x \in E^n$, а точка x^* – точка локального минимума функции $f(x)$.

Поиск минимума целевой функции предлагается осуществлять комбинацией алгоритмов Пауэлла и Девиса-Свенна-Кемпи (ДСК): на первом этапе (шаги 1-6) используется алгоритм Пауэлла, а на заключительном этапе (шаги 7-8) алгоритм ДСК (рисунки 2, 3).

Особенности применения поискового метода проверены на различных этапах технологии геодезического мониторинга.

1. Разработанная методика **проектирования** плановой опорной сети на основе «неискаженной модели» сети, предложенной автором, включает в себя следующие этапы:

1) устанавливается положение известных элементов сети;

2) задаются координаты исходных пунктов и приближенные значения координат определяемых пунктов;

3) по формулам обратной геодезической задачи вычисляются значения «результатов измерений» и составляется матрица весов P «результатов измерений», при этом должно выполняться условие $G_0 = V_0^T P V_0 = 0$;

4) придается координате x некоторого пункта, например 1, небольшое приращение Δx_1 . Тогда вектор поправок V_1 к «результатам измерений» будет $V_1 = B \delta x + L$, где B – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок размера $n \times k$ (k – число необходимых измерений), δx – вектор поправок к приближенным значениям координат пунктов размера $k \times 1$, L – вектор свободных членов размера $n \times 1$. Вектор свободных членов $L = 0$. Разность $V_1 - V_0 = B \delta x$. Тогда будем иметь $\Delta G_1 = G_1 - G_0 = \delta x^T B^T P B \delta x$. Или, считая, что $B^T P B = N$, где N – матрица коэффициентов нормальных уравнений порядка k , тогда $\Delta G_1 = N_{11} \Delta x_1^2$. Откуда получим формулу (2):

$$N_{11} = \Delta G_1 / \Delta x_1^2. \quad (2)$$

Если придать координате y пункта 1 небольшое приращение Δy_1 , то будем иметь формулу (3):

$$N_{22} = \Delta G_2 / \Delta y_1^2. \quad (3)$$

И наконец, придав приращения Δx_1 , Δy_1 абсциссе и ординате пункта 1 получим недиагональный элемент по формуле (4):

$$N_{12} = (\Delta G_{12} - \Delta G_1 - \Delta G_2) / 2\Delta x_1 \Delta y_1. \quad (4)$$

Реализуя поисковую процедуру можно найти все элементы матрицы N , например, придавая приращения Δx абсциссам пунктов 1 и 2, получим элемент N_{13} .

5) вычисляется полная обратная весовая матрица координат определяемых пунктов $Q = N^{-1}$;

6) определяется обратный вес положения наиболее слабого пункта сети и его средняя квадратическая ошибка;

7) выполняется анализ соответствия полученной СКО положения наиболее слабого пункта с требуемой СКО положения пункта. По результатам анализа оценки проекта сети делается вывод о принятии или непринятии мер для повышения точности.

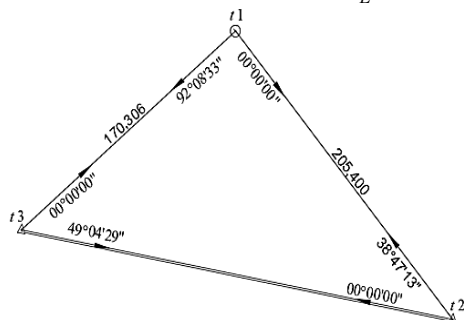
Проектирование с применением алгоритма поискового метода (рисунок 3) было выполнено на основе известного метода Монте-Карло. Ошибки «результатов измерений» моделировались 20 раз с вычислением каждый раз минимума целевой функции, согласно алгоритму поискового метода, и матрицы N . Затем была рассчитана средняя матрица $N_{ср}$, обращением которой была получена полная обратная весовая матрица и в последствии средние квадратические ошибки наиболее слабого пункта сети. Проверка результатов проектирования геодезических сетей поисковым методом, описанными выше двумя способами, была осуществлена при проектировании сети триангуляции, замкнутого нивелирного хода и геодезической сети по схеме свободного станционирования.

2. Уравнивание и оценка точности результатов измерений поисковым методом была выполнена на разных видах геодезических построений (плановые и пространственные) при условии равноточности и неравноточности измерений, когда измерения коррелированы, при уравнивании без учета и с учетом ошибок

исходных пунктов и их корреляционных связей, а также для свободных сетей. Обобщённая схема оценки точности результатов измерений для пространственного случая представлена на рисунке 4. Приведем пример уравнивания и оценки точности геодезического треугольника с учетом ошибок исходных данных и их корреляционных связей.

Пусть задана сеть, состоящая из трех пунктов, два из которых (t_2 и t_3) приняты за исходные. В данной сети измерены 6 направлений и 2 стороны (рисунок 5). Исходные пункты имеют следующие координаты: $x_{t_2} = 1964,947$ м; $y_{t_2} = 3418,836$ м; $x_{t_3} = 2013,231$ м; $y_{t_3} = 3151,480$ м.

1) ковариационная матрица K_E ошибок исходных пунктов:



$$K_E = \begin{bmatrix} 9 & 7 & -4 & 3 \\ 7 & 9 & 3 & -2 \\ -4 & 3 & 6 & -4 \\ 3 & -2 & -4 & 6 \end{bmatrix} \text{ мм}^2;$$

2) ковариационная матрица результатов измерений $K_{\Delta_{\text{изм}}}$ имеет размер 8×8 , диагональные элементы которой равны 25;

3) после определения матрицы Φ , размером 8×4 , влияния ошибок исходных данных на результаты измерений, была вычислена ковариационная матрица свободных членов по формуле (5) и весовая матрица по формуле (6):

$$K_L = K_{\Delta_{\text{изм}}} + \Phi K_E \Phi^T, \quad (5)$$

$$P = K_L^{-1} = K_{\Delta}^{-1}; \quad (6)$$

4) выполнив уравнивание поисковым методом, получили уравненные координаты определяемого пункта: $x_{t_1} = 2120,0245$ м; $y_{t_1} = 3284,1398$ м и вектор поправок к результатам измерений

$$V^T = [0,87 \quad -0,87 \quad 1,48 \quad -1,48 \quad 5,14 \quad -5,14 \quad 7,19 \quad -1,93];$$

5) выполняя оценку точности, были получены следующие результаты:

– обратная весовая матрица уравненных координат пункта Q_{t_1}

$$Q_{t_1} = \begin{bmatrix} 0,068 & -0,012 \\ -0,012 & 0,037 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 15,599 & 5,059 \\ 5,059 & 28,668 \end{bmatrix};$$

– СКО единицы веса $\mu = 1,04$; СКО координат определяемого пункта $m_{x1} = 4,1$ мм; $m_{y1} = 5,6$ мм; СКО положения определяемого пункта $M_1 = 6,9$ мм.

Результаты уравнивания и оценки точности совпали с аналогичными расчетами, выполненными в программе «NW» проф. Коугия В. А.

3. Построение прогнозной модели поисковым методом позволяет корректно изучать закономерности процесса деформации и планировать частоту циклов геодезического мониторинга.

Предложенная методика построения прогнозной модели включает в себя: 1) определение уравнения тренда поисковым методом; 2) выполнение оценки точности определения коэффициентов уравнений тренда, подобранных поисковым методом; 3) выполнение оценки адекватности трендовых моделей; 4) выполнение прогнозирования на несколько циклов вперед.

Приведем пример построения прогнозной модели для определения осадки деформационной марки по ее высотным отметкам при выполнении мониторинга гостиничного комплекса в г. Краснодар. Высоты деформационной марки ДМ6 были измерены в 11 циклах (таблица 1). Неизвестные коэффициенты анализируемых уравнений тренда определены поисковым методом. Целевая функция в данном случае представлена в виде $f(x) = [v^2] = [(y_i - \hat{y})^2]$, где y_i – исходные значения временного ряда; \hat{y} – значения временного ряда, вычисленные по уравнению тренда. Поиск коэффициентов уравнений тренда выполнялся до достижения условия $f(x) = \min$.

Виды подобранных уравнений тренда представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Виды уравнений тренда, подобранные поисковым методом

Вид уравнений тренда	Уравнения тренда
линейное	$y = -1,0409x + 893,1550$
логарифмическое	$y = -5,0020 \cdot \ln(x) + 894,8680$
полином второй степени	$y = 0,1463x^2 - 2,7962x + 896,9580$
полином третьей степени	$y = -0,0218x^3 + 0,5379x^2 - 4,7585x + 899,3330$

Из полученных уравнений тренда выбиралось наилучшее. Для этого использовались эмпирические методы анализа закономерностей

развития исследуемого временного ряда (таблица 3), такие как: расчет общей, случайной вариации, величин дисперсии, F -критерий Фишера-Снедекора; расчет и анализ средней квадратической ошибки аппроксимации; критерий наименьшей суммы квадратов отклонений эмпирических и теоретических значений уровней временного ряда; расчет коэффициента детерминации R^2 , стандартной ошибки аппроксимации σ , нормированного R -квадрата, относительной ошибки аппроксимации E_t , средней ошибки аппроксимации \bar{A} .

Оценка точности коэффициентов уравнений тренда выполнялась в последовательности, указанной во втором защищаемом положении.

Проверка на адекватность выполнялась по случайности остаточной компоненты через расчет критерия серий и критерия пиков. Согласно проверке на адекватность по критерию серий, все рассматриваемые трендовые модели признаются адекватными. Для проведения проверки по критерию пиков, определялось общее число пиковых точек p ряда ε_t , при условии $\varepsilon_{t-1} < \varepsilon_t > \varepsilon_{t+1}$ или $\varepsilon_{t-1} > \varepsilon_t < \varepsilon_{t+1}$. Для линейной модели число поворотных точек равно 3, для логарифмической модели – 9, для полинома второй степени – 8, для полинома третьей степени – 9. Наилучшие показатели адекватности согласно критерию пиков у логарифмической трендовой модели и полинома третьей степени.

Для проверки автокорреляции были вычислены значения d -критерия Дарбина-Уотсона. По результатам расчетов для логарифмического уравнения d -критерий составил 1,782, для полинома третьей степени – 3,585. Сравнив рассчитанные значения d -критерия трендовых моделей с табличными данными, где определены его критические значения, были получены следующие результаты: логарифмическая трендовая модель не имеет автокорреляцию – признана адекватной; трендовая модель полинома третьей степени имеет автокорреляцию и не может быть признана адекватной.

Для проверки было выполнено сравнение прогнозных значений отметок деформационной марки ДМ6 с фактическими, измеренными при наблюдениях за стабильностью здания (таблицу 4).

Таблица 4 – Сравнение прогнозируемых значений с фактическими

Наименование элементов сравниваемых моделей	Номер цикла		
	12	13	14
Отметки фактические $H_{\text{выч}}$, м	0,8800	0,8816	0,8810

Продолжение таблицы 4

Отметки прогнозные $H_{\text{прогноз}}, \text{ М}$	Линейная модель	0,8807	0,8796	0,8786
	Логарифмическая модель	0,8824	0,8820	0,8817
	Полином второй степени	0,8845	0,8853	0,8865
	Полином третьей степени	0,8821	0,8809	0,8784
Ошибки прогноза Δ , мм	Линейная модель	-0,7	+2,0	+2,4
	Логарифмическая модель	-2,4	-0,4	-0,7
	Полином второй степени	-4,5	-3,7	-5,5
	Полином третьей степени	-2,1	+0,7	+2,6

Прогнозирование выполнялось на глубину не более 20-25% от длины временного ряда согласно требованиям нормативных документов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проанализирована существующая технология геодезического мониторинга зданий и сооружений. Выявлено отсутствие требований к составу, порядку и точности выполнения работ для каждого этапа технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений с нормальным уровнем ответственности. Проведенный анализ показал, что применение метода полигонометрии, который рекомендуется рядом нормативных документов как основной метод наблюдения за деформациями, в большинстве случаев не обеспечивает II класс точности измерений. Отсутствуют требования и рекомендации по выполнению прогнозирования деформаций зданий и сооружений.

2. Обоснованы требования геодезического мониторинга зданий и сооружений нормального уровня ответственности способом свободного стационарирования через обоснование требований к точности выполнения геодезических измерений по II классу точности: согласно принципу ничтожно малого влияния ошибок исходных пунктов СКО положения свободной станции $m_{\text{эт}} = 3,3 \text{ мм}$, а СКО линейных и угловых измерений на деформационную марку $m_d = 2,3 \text{ мм}$, $m_{\beta} = 4,8''$.

3. Внесены предложения по наблюдению за горизонтальными смещениями зданий и сооружений на основе способа свободного стационарирования, включающие в себя: создание на объекте работ исходных пунктов первого и второго уровня, определение положения

свободной станции электронного тахеометра от исходных пунктов второго уровня обратной засечкой и определение полярным способом планового положения деформационных марок.

4. Предложен алгоритм поискового метода нелинейного программирования, основанный на комбинации методов Пауэлла и Девиса-Свенна-Кемпи, используя который было выполнено теоретическое обоснование возможности его применения для математической обработки на всех этапах геодезического мониторинга: от проектирования плановых и высотных геодезических сетей до прогнозирования результатов деформаций.

5. Предложены и разработаны два способа проектирования геодезических сетей: 1) на основе «неискаженной модели» сети; 2) поисковым методом нелинейного программирования с применением метода Монте-Карло.

6. Обоснована и доказана корректность применения поискового метода для уравнивания и оценки точности большинства видов геодезических построений (плановых, высотных, пространственных): при коррелированных измерениях, без учета ошибок исходных данных, с учетом ошибок исходных данных при наличии и отсутствии корреляционных связей между ними. Показана корректность уравнивания свободных геодезических сетей поисковым методом.

7. Приведена последовательность определения элементов преобразования плановых и пространственных систем координат с использованием поискового метода. Доказана корректность применения поискового метода для решения такой геодезической задачи.

8. Предложены методические решения по определению уравнения тренда с использованием поискового метода и обоснованы требования к ее анализу, включающие: эмпирические методы анализа закономерностей развития исследуемого временного ряда; расчёт показателей коэффициента корреляции, коэффициента детерминации, стандартной ошибки аппроксимации и ряда дополнительных показателей; оценку точности определения коэффициентов уравнений тренда, разработанным поисковым методом; проверку трендовой модели на адекватность.

9. Разработаны автоматизированные программы, реализующие поисковый метод, дополняющие друг друга и позволяющие выполнять

автоматизированное уравнивание и оценку точности результатов измерений. Особенность программ: возможность осуществлять обработку данных по каждому этапу геодезического мониторинга.

10. Разработана технология геодезического мониторинга зданий и сооружений способом свободного стационарирования с применением поискового метода нелинейного программирования в качестве основного математического аппарата, которая позволяет проводить наблюдения за плано-высотным положением деформационных марок в условиях плотной городской застройки с выполнением требований по II классу точности измерений.

11. Рекомендации по дальнейшей разработке исследования состоят в применении других видов поисковых методов и методов нелинейного программирования для решения задач геодезического мониторинга.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В зарубежных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

1. *Shevchenko, G.G.* Experimental researches in defining deformations by free station method and results processing by search method / **G.G. Shevchenko**, M.J. Bryn, D.A. Afonin, D.A. Gura // Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2 Proceedings of TRANSOILCOLD-2019, Lecture Notes in Civil Engineering 50, Springer Nature Singapore Pte. Ltd. 2020, p. 163-175.

2. *Shevchenko, G.G.* Adjustments of correlated values by search method / **G.G. Shevchenko**, M.Ya. Bryn // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development» (CATPID-2019). – Vol. 698 (2019) 044019. – pp. 1-8.

В российских изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

3. *Шевченко, Г.Г.* Использование поисковых методов для уравнивания и оценки точности элементарных геодезических построений / **Г.Г. Шевченко** // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 10. – С. 10-19.

В изданиях, входящих в перечень ВАК России по специальности 25.00.32 – Геодезия:

4. *Брын, М.Я.* Построение прогнозной модели поисковым методом нелинейного программирования по геодезическим данным /

М.Я. Брынь, Г.Г. Шевченко // Инженерные изыскания. – 2019.– № 4.– С. 48-58.

5. Желтко, Ч.Н. Измерения геометрии высоких стальных трёхгранных сооружений / Ч.Н. Желтко, Д.А. Гура, Г.Г. Аветисян // Известия высших учебных заведений. – Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 6. – С. 13-19.

В изданиях, входящих в перечень ВАК России по отрасли науки 25.00.00 – Науки о Земле:

6. Шевченко, Г.Г. Об обработке результатов определения пространственного положения деформационных марок с использованием поискового способа метода наименьших квадратов / Г.Г. Шевченко, Д.А. Гура, Ю.В. Лобанова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 653-665.

7. Шевченко, Г.Г. Метод определения смещений и осадок сооружений с учетом особенностей работ на строительной площадке/ Г.Г. Шевченко, Ч.Н. Желтко, Д.А. Гура, М.А. Пастухов // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 11. – С.23-24.

Публикации в прочих изданиях:

8. Брынь, М.Я. Уравнение пространственных геодезических построений поисковыми методами Пауэлла и Девиса-Свенна-Кемпи / М.Я. Брынь, Г.Г. Шевченко // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. – 2019. – № 10. – С. 26-31.

Патенты на полученные новые результаты исследования

1. Шевченко, Г.Г. Программа уравнивания и оценки точности геодезических построений поисковым методом нелинейного программирования / Г.Г. Шевченко, М.Я. Брынь // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.: правообладатель Кубан. гос. технол. ун-т. – рег. № 2020617236 от 02.07.20. – М.: Роспатент, 2020.

2. Шевченко, Г.Г. Универсальная программа определения трехмерных координат точек через обработку измерений горизонтальных, вертикальных углов и расстояний поисковым способом / Г.Г. Шевченко, Ч.Н. Желтко, Д.А. Гура, М.А. Пастухов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.: правообладатель Кубан. гос. технол. ун-т. – рег. № 2015617205 от 03.07.15. – М.: Роспатент, 2015.

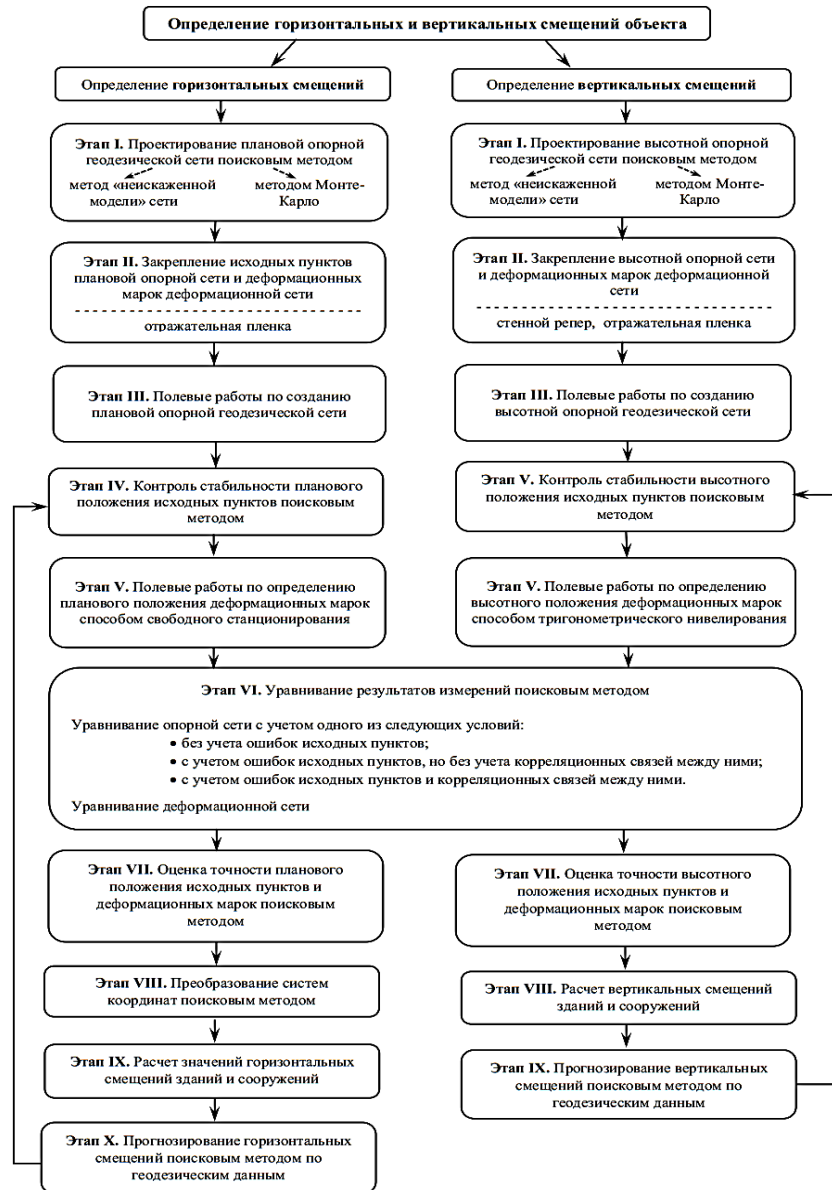


Рисунок 1 – Технологическая схема геодезического мониторинга зданий и сооружений способом свободного stationирования с использованием поискового метода

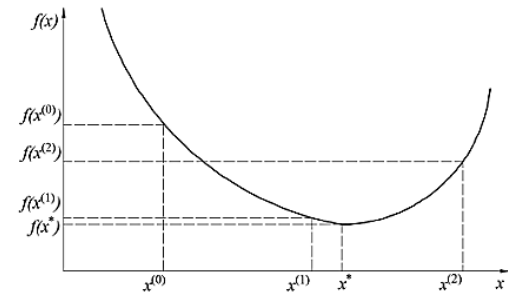


Рисунок 2 – Геометрическая интерпретация минимизации функции $f(x)$ методом Пауэлла-ДСК

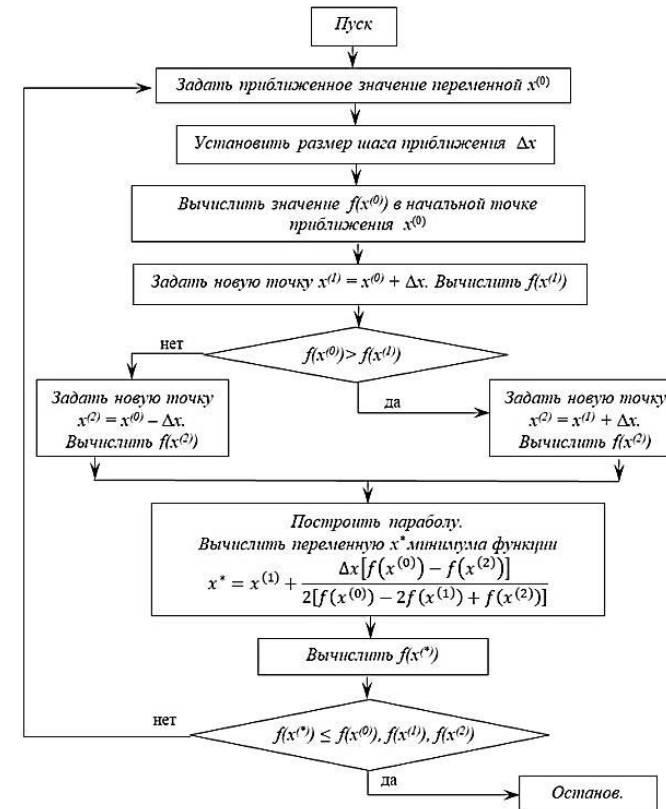


Рисунок 3 – Информационная блок-схема минимизации целевой функции поисковым методом

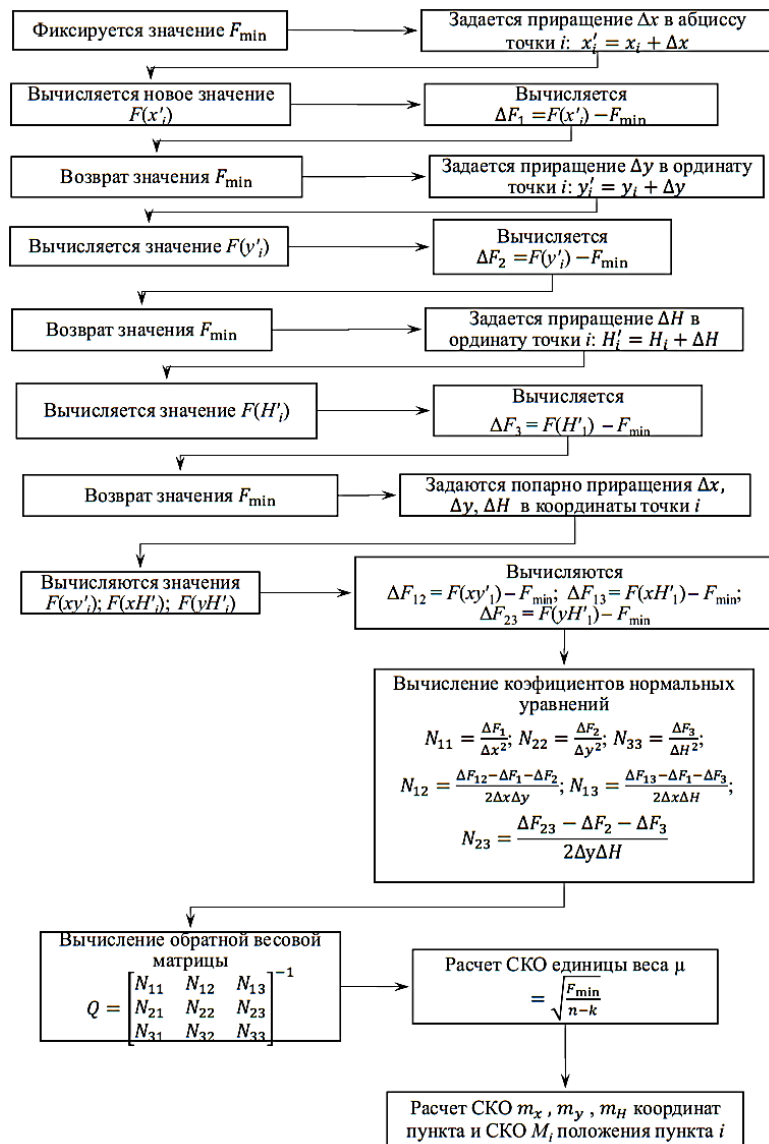


Рисунок 4 – Обобщённая схема оценки точности результатов измерений для пространственного случая

Таблица 1 – Измеренные значения высот деформационной марки ДМ6

Номер цикла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Дата	25.09	28.10	27.11	28.12	27.01	25.02	28.03	27.04	29.05	27.06	27.07
ДМ6	0,8950	0,8920	0,8890	0,8880	0,8860	0,8860	0,8855	0,8845	0,8840	0,8840	0,8830

Таблица 3 – Результаты анализа уравнений тренда, полученных поисковым методом, для марки ДМ6

Наименование показателя	Линейное уравнение	Логарифмическое уравнение	Полином второй степени	Полином третьей степени
<i>Результаты дисперсионного анализа</i>				
Общая вариация $V_{\text{общ}}$, мм ²	141,409			
Случайная вариация V_{ϵ} , мм ²	22,225	2,493	3,868	0,944
Вариация вследствие тенденции $V_{f(t)}$, мм ²	119,184	138,916	137,541	140,465
Общая дисперсия $\sigma^2_{\text{общ}}$, мм ²	14,141			
Дисперсия случайного компонента σ^2_{ϵ} , мм ²	2,469	0,277	0,484	0,135
Дисперсия тенденции $\sigma^2_{f(t)}$, мм ²	119,184	138,916	68,771	46,822
F -критерий Фишера-Снедекора F_p	48,264	501,570	142,232	347,174
<i>Расчет и анализ средней квадратической ошибки аппроксимации</i>				
Средняя квадратическая ошибка $\sigma_{\text{ош}}$, мм	1,667	0,558	0,743	0,397
<i>Критерий наименьшей суммы квадратов отклонений эмпирических и теоретических значений уровней временного ряда</i>				
Сумма квадратов отклонений, мм ²	22,225	2,493	3,868	0,944
<i>Значения коэффициентов регрессионной статистики</i>				
Коэффициент корреляции (множественный R)	0,9181	0,9911	0,9862	0,9967
Коэффициент детерминации R^2	0,8428	0,9824	0,9726	0,9933
Нормированный R -квадрат	0,8254	0,9804	0,9696	0,9926
Стандартная ошибка аппроксимации σ_t , мм	1,5714	0,5263	0,6953	0,3672
Относительная ошибка аппроксимации E_t , %	0,1772	0,0593	0,0784	0,0414
Средняя ошибка аппроксимации \bar{A} , %	0,1382	0,0457	0,0530	0,0291