

На правах рукописи

Хатум Хабиб Мазен



**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ
ПРИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ
МЕТРОПОЛИТЕНА НА ОСНОВЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО И ПЕРМАНЕНТНОГО ИХ
КОНТРОЛЯ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

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

Санкт-Петербург – 2021

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Мустафин Мурат Газизович

Официальные оппоненты:

Кафтан Владимир Иванович

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геофизический центр Российской академии наук», лаборатория геодинамики, главный научный сотрудник;

Афонин Дмитрий Андреевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Инженерная геодезия», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится 26 мая 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

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

Автореферат разослан 25 марта 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Геодезический мониторинг становится обязательной процедурой при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Связано это с необходимостью постоянного повышения безопасности жизнедеятельности. Традиционные геодезические методики измерений в связи с бурным ростом приборной базы и программного обеспечения претерпевают изменения с обеспечением нормативной точности и в ряде случаев ее повышением. Типичными объектами мониторинга являются мосты, выемки, плотины, башни, промышленные установки, а также природные сооружения, такие как склоны, подверженные опасности скольжения, ледники и тектонические плиты.

В последние годы особенно в мегаполисах интенсивно идет освоение подземного пространства. Строятся системы метро, паркинги, различные коммуникации и хранилища. При этом контроль деформационных процессов, как правило, возлагается на геодезические службы. Повышение требований к безопасности строительства, с одной стороны, и обеспечение точности проектных параметров, с другой, обязывают решать эти задачи с привлечением данных геомеханического анализа. Для решения этого вопроса и включения его в геодезический мониторинг существует целый ряд инженерных комплексов по оценке деформационных процессов.

Приобретает все большую популярность использование в наблюдениях роботизированных тахеометров. Безусловно их применение по крайней мере снимает важный вопрос об интервалах измерений. Очевидно, что можно выполнять весьма точные измерения, но если они выполняются не вовремя, то высокая точность не спасает. Вместе с тем, применение роботизированных тахеометров требует особой тщательности определения места расположения измерительной станции в связи с возведением сооружения. Эти вопросы представляют актуальные задачи настоящих исследований.

Интенсивное развитие транспортной инфраструктуры стран Ближнего Востока и в, частности, в городе Эр Рияд (Саудовская Аравия) обуславливает чрезвычайную важность решения вопросов о геодезическом мониторинге деформационных процессов.

Степень разработанности темы исследования.

Предпосылками к выполнению диссертационных исследований послужили разработки целого ряда специалистов. Накоплен большой практический опыт и подготовлена теоретическая база для определения деформации с использованием геодезических наблюдений и методов. Многочисленные исследования известных российских и зарубежных ученых, а также инженеров посвящены разработке методов контроля и прогнозирования деформаций геодезическими способами. Следует отметить таких ученых, как Афонин Д.А., Большаков В.Д., Брынъ М.Я., Буденков Н.А., Вальков В.А., Волков В.И., Ганьшин В.Н., Дьяков Б.Н., Жуков Б.Н., Зубов А.В., Кафтан В.И., Маркузе Ю.И., Милев Г., Михелев Д.Ш., Мустафин М.Г., Николаев С.А., Гантмахер Ф.Ф., Тески В.Ф., Уставич Г.А., Фрейзер К.С., Хиллер Бернд, Шеховцов Г.А., Грюндиг Л., Эбелинг А., Чоу Дж., Денли Х., Вольф П.Р. и Чарльз Д. Гилани и др. В работах этих авторов отмечается важность учета конфигурации геометрической схемы расположения опорных пунктов, но детального анализа с результатами для применения в конкретной ситуации не дается. Кроме того, много работ посвящено вертикальным смещениям, однако горизонтальным деформациям нет, и еще описаний вертикальных скальных обнажений почти не приводится. Также следует отметить на весьма небольшое количество работ, посвященных увязыванию геодезических наблюдений с оценкой напряженно-деформированного состояния изучаемого объекта. Все эти вопросы освещаются в настоящей работе. Таким образом, диссертация посвящена решению актуальной задачи по разработке и организации геодезического мониторинга на примере строительства метро в Эр-Рияде (Саудовская Аравия), и также будут весьма полезны полученные результаты для России.

Цель работы. Повышение точности оценки процесса деформаций инженерных сооружений за счет разработки методики перманентных наблюдений электронным тахеометром.

Идея работы состоит в применении технологии перманентного контроля деформационного процесса инженерных сооружений, включающей выбор места расположения роботизированных тахеометрических станций, оценку точности пунктов опорной сети и съемочных точек, обоснование размещения деформационных марок и обработку результатов измерений с оценкой точности и интерпретацией характера деформаций.

Задачи исследований:

1. Анализ разработок в области геодезического мониторинга зданий и сооружений с целью обоснования задач исследований.

2. Разработка методики проектирования геодезической сети для проведения перманентных наблюдений за деформациями сооружений на примере грунтовой выемки.

3. Разработка методики перманентных наблюдений за деформациями грунтовой выемки на основе предварительных расчетов деформационного процесса.

4. Разработка методики геодезического мониторинга и ее проверка в натуре при строительстве инженерных сооружений станций метро.

Научная новизна исследований:

1. Разработаны модели и программная алгоритмизация вычислений, получена зависимость точности всех пунктов деформационной сети от ее конфигурации.

2. Разработан алгоритм построения деформационной сети с учетом предварительной оценки деформированного состояния объекта мониторинга и зоны его влияния.

3. Разработан алгоритм расчета вида деформаций на основе сравнения остаточных матриц при повторных циклических измерениях.

Теоретическая и практическая значимость исследований состоит в применении технологии перманентного контроля деформационного процесса инженерных сооружений, включающей выбор места расположения роботизированных тахеометрических станций, оценку точности пунктов опорной сети и съемочных точек, обоснование размещения деформационных марок и обработку результатов измерений с оценкой точности и интерпретацией характера деформаций.

Методология и методы исследования. Анализ и обобщение результатов теоретических и практических исследований при обосновании актуальности темы работы и решаемых задач; полевые исследования, включая экспериментальные геодезические измерения; методы математической статистики и теории вероятностей, включая метод наименьших квадратов при обработке измеренных необработанных данных; математическое моделирование геодезических сетей мониторинга и напряженно-деформированного состояния грунтового массива, включающего выемку.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обеспечение точности и стабильности положения станции наблюдений при геодезическом мониторинге деформаций инженерных сооружений с использованием роботизированных тахеометров достигается применением разработанного программного алгоритма и моделированием для конкретной ситуации оптимальной конфигурации деформационной сети с дальнейшей проверкой на каждом цикле измерений относительных смещений исходных пунктов.

2. Оценка деформационного процесса грунтовой выемки по данным геодезических измерений наиболее эффективно может быть выполнена с учетом уточнения мест расположения роботизированной тахеометрической станции и деформационных марок на основе моделирования по разработанной программе, реализующей метод конечных элементов.

3. Геодезический мониторинг деформаций грунтовых выемок целесообразно выполнять по оригинальной схеме, предусматривающей разработанные алгоритмы по оптимизации расположения пунктов деформационной сети и учету деформированного состояния грунтового массива, а также по прогнозу развития процесса деформирования на основе сравнения остаточных и ковариационных матриц ошибок измерений на каждом цикле наблюдений.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена необходимым объемом фактических измерений по разработанной методике наблюдений, обоснованностью теоретических расчетов, согласованностью результатов с альтернативными исследованиями, применением сертифицированного оборудования, приборов и программного обеспечения, а также контрольными замерами независимых экспертов.

Апробация результатов исследования проведена на следующих научно-практических мероприятиях:

1. I Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы геодезии, кадастра, рационального земле- и природопользования» (г. Тюмень, ТГУ ТИУ, 2018 г.).

2. Международный форум «Геострой-2019: Цифровые технологии в архитектуре, территориальном планировании, управлении урбанизированными территориями, рисками и чрезвычайными ситуациями, технологии информационного моделирования» (г. Новосибирск, 2019 г.).

3. Международная научно-техническая конференция «Строительство и архитектура: теория и практика развития отрасли» (г. Kislovodsk, 2019 г.).

4. Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы инженерной геодезии» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2019 г.).

5. Международная конференция по инженерным исследованиям и приложениям «Structure Deformation Monitoring» (г. Бейрут, Ливан, 2019 г.).

Практическая реализация. Результаты диссертационной работы могут быть использованы геодезическими и геотехническими, а также проектными организациями, работающими в области мониторинга деформаций. В России результаты исследований могут быть использованы геодезическими фирмами: ООО «БЕНТА», ООО «Промышленная геодезия», АО «Аэрогеодезия», ООО «Геодезические приборы» и другими.

По результатам исследований автора в Саудовской Аравии создана геодезическая сеть и система мониторинга для геодезических и инженерных служб, обеспечивающих строительство метро.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследований, в проведении полевых и камеральных работ по построению геодезической сети в городе Эр-Рияд (Саудовская Аравия); в самостоятельном проведении геодезических измерений на всех этапах геодезического мониторинга, анализе и обработке полученных результатов и подготовке итогового отчета для компании «BACS»; в обобщении результатов исследований, разработке программных модулей по оптимизации места расположения тахеометрической станции и в разработке программного комплекса по моделированию деформированного состояния котлована.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 3 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 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы, включающего 164 наименования. Диссертация изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 22 таблицы и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены основные разделы и показатели диссертации.

В первой главе представлен обзор традиционных и современных методов мониторинга смещения и деформации инженерных конструкций и зданий. Описаны стандарты и нормативные документы, действующие в Ливане, России и других странах. Подробно описывается использование традиционных и разработанных методов, методик и инструментов, а также преимущества и недостатки каждого метода. Показана целесообразность использования роботизированного тахеометра для мониторинга измерений. Обоснована тема диссертации, поставлена ее цель и сформулированы необходимые задачи для ее достижения.

Во второй главе разработана методика оптимизации расположения тахеометрической станции. Разработан алгоритм решения задачи. Выполнены расчеты по традиционным упрощенным методикам и разработанному автоматизированному алгоритму на основе метода наименьших квадратов (далее – МНК). Разработана методика учета напряженно-деформированного состояния грунтовой выемки и интерпретации результатов наблюдений. Приведены расчеты по определению интервала измерений.

В третьей главе на основе результатов исследований, показанных в предыдущих главах, приведена общая схема мониторинга и приведено подробное описание работ в каждом пункте схемы.

В четвертой главе подробно показана разработанная методика геодезического мониторинга. Приведено описание

практической реализации данной методики на примере строительства станции метро в городе Эр-Рияд в Саудовской Аравии. Представлены все работы по созданию системы геодезического контроля смещений и деформаций.

В заключении представлены основные результаты исследований по теме создания системы геодезического мониторинга смещений и деформаций инженерных сооружений в грунтовом массиве.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Обеспечение точности и стабильности положения станции наблюдений при геодезическом мониторинге деформаций инженерных сооружений с использованием роботизированных тахеометров достигается применением разработанного программного алгоритма и моделированием для конкретной ситуации оптимальной конфигурации деформационной сети с дальнейшей проверкой на каждом цикле измерения относительных смещений исходных пунктов.

Традиционно оптимизация места заложения тахеометрической станции выполняется на основе решения классической обратной засечки (три исходных пункта), как показано на рисунке 1. При этом существуют некоторые ограничения при построении геометрической схемы, не дающие возможность использовать весь спектр линейно-угловых параметров.

При использовании роботизированного тахеометра ввиду создания специальной стационарной площадки следует более тщательно выполнить процедуру выбора места заложения съемочной (тахеометрической) станции.

В диссертации разработан автоматизированный алгоритм на основе МНК моделирования геодезической схемы, реализующей способ обратной линейно-угловой засечки с произвольным количеством исходных точек. Алгоритм основан на использовании как угловых измерений, так и расстояний. Начальные (приближенные) координаты тахеометра вычисляются с

использованием длин сторон и углов первого треугольника по двум квазиопорным точкам с известными координатами. Затем можно использовать дополнительные квазиопорные точки, которые будут избыточными измерениями и позволят добиваться требуемой точности. Этот программный алгоритм реализуется на основе МНК.

Программирование этого метода и процесса, который приводит к определению окончательных координат точки P , показано в виде диаграммы на рисунке 2. А результаты программирования приведены на рисунке 3.

Приведено сравнение двух способов оптимизации места расположения тахеометрической станции: упрощенного и с использованием МНК.

Результаты моделирования показали, что разработанный метод приводит к более точным результатам (см. рисунок 3б).

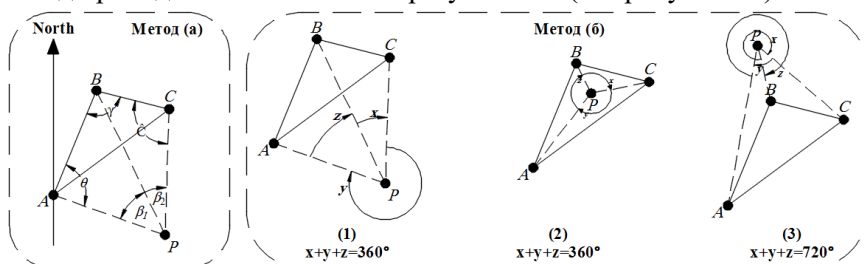


Рисунок 1 – Схемы реализации упрощенного метода на основе решения обратной угловой засечки (а – измерены внутренние углы; б – измерены все углы на АТС)

Кроме того, по упрощенному способу погрешности положения искомой точки по схеме обратной засечки в диапазоне измеряемых углов близких к $20\text{--}30^\circ$ имеет погрешность в 3 и более раза выше, чем при углах $60\text{--}120^\circ$.

Использование автоматизированного алгоритма по МНК показало его эффективность при оптимизации положения роботизированной тахеометрической станции. Выполненные модельные расчеты оценки СКП ее координат в типизированных схемах с широким диапазоном линейно-угловых величин позволили

определить лучшее расположение станции относительно квазиопорных пунктов.

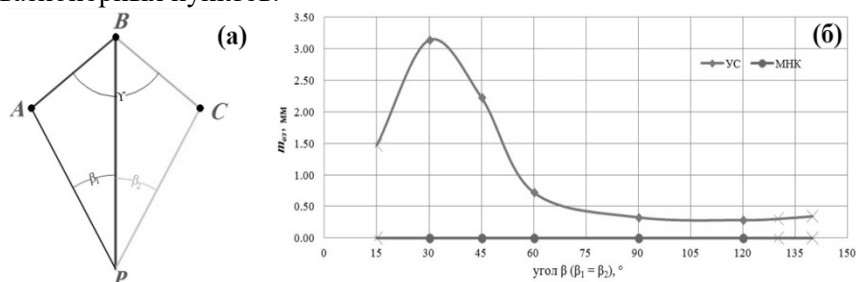


Рисунок 3 – (а) Схема расположения геодезических пунктов при решении обратной засечки, (б) СКП определения положения точки Р (УС – упрощенный способ, МНК – строгий способ, β ($\beta_1 = \beta_2$))

По разработанному автоматизированному алгоритму возможно выполнение проверки стабильности квазиопорных точек и обнаружения величин их смещений. Выполняется проверка путем сравнения остаточной матрицы любой эпохи с исходной остаточной матрицей в эпоху «0» ($V_i - V_0$). При этом, в таблице 1, при сравнении $V_3 - V_{нач}$ предполагается возможность смещения самой тахеометрической станции.

2. Оценка деформационного процесса грунтовой выемки по данным геодезических измерений наиболее эффективно может быть выполнена с учетом уточнения мест расположения роботизированной тахеометрической станции и деформационных марок на основе моделирования по разработанной программе, реализующей метод конечных элементов.

Разработанный автоматизированный алгоритм оптимизации расположения тахеометрической станции непосредственно на объекте съемки следует применять с учетом деформаций строящегося сооружения. В нормативных документах рекомендуется исходные пункты и тахеометрические станции располагать вне зоны влияния строящегося объекта. Определение

зон влияния чрезвычайно важная задача. Выполнение измерений с высокой точностью порой нивелируется или вовсе становится непригодным при условии подвижности исходных пунктов.

Таким образом, важной задачей при геодезическом мониторинге является выполнение предварительной оценки зоны влияния строящегося или эксплуатируемого объекта. Не менее важной задачей является определение наиболее чувствительных или репрезентативных областей испытываемого объекта, в которых следует размещать деформационные марки. В противном случае получается либо их избыточность или недостаточность.

Автором разработан программный комплекс (ПК «Котлован»), реализующий метод конечных элементов (далее – МКЭ) применительно к оценке смещений грунтового массива. В ПК «Котлован» вводятся размеры модели, размеры грунтовой выемки, физико-механические характеристики массива грунта. Программа по этим данным разбивает область на конечные элементы и рассчитывает смещения грунтового массива.

Проведено моделирование для ситуации, приведенной на рисунке 5 (схема вестибюля метрополитена). Построен котлован с размерами: с шириной 25 м на глубину 32 м. Вмещающие породы довольно крепкие, типа песчаника с пределом прочности на сжатие 100 МПа, модуль упругости составляет 50 ГПа.

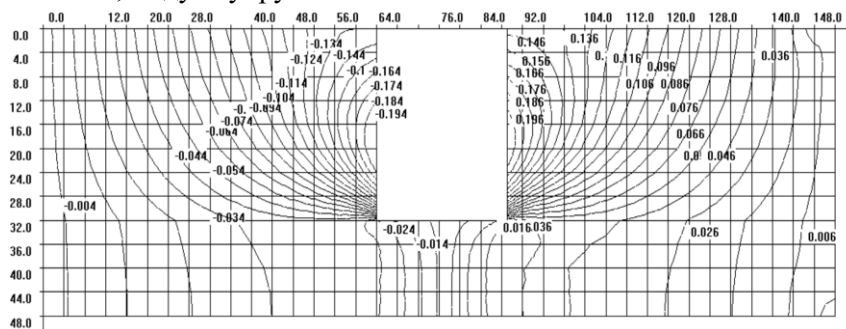


Рисунок 5 – Распределение горизонтальных смещений (мм) в грунтовом массиве в окрестности выемки

Результаты расчета горизонтальных смещений представлены на рисунке 5. Смещения на всей рассматриваемой области не велики и составляют доли миллиметра, что соизмеримо с точностью измерений. Наибольшие смещения возникают на обнажениях выемки в средней части поверхности, несколько большие у ее подошвы. Здесь надо заметить, что эти смещения возникнут сразу после возведения выработки. Геодезические наблюдения проводятся с целью контроля дальнейших деформаций.

Результаты моделирования позволили определиться с размещением деформационных марок на обнажении котлована. Они были запроектированы в средней части выемки (см. рисунок 6), где по расчету наблюдаются наибольшие деформации. Заложены четыре ряда марок через 6 метров с отступом от земной поверхности на 4 м. На рисунке 5 также видно, что смещения у границы почти отсутствуют. В пределах десятой доли мм они и на расстоянии до 30 м от выемки. Расчеты выполнены для условий плоской задачи, поэтому в торцах выемки (в перпендикулярном сечении) смещения будут еще меньше. Это позволяет принять торцевые участки выемки хорошими зонами для размещения тахеометрических станций, которые впоследствии и были заложены в торцевых зонах котлована.

Таким образом, предварительный анализ деформированного состояния грунтового массива позволил оптимизировать места заложения деформационных марок, тахеометрических станций наблюдений и квазиопорных точек (см. рисунки 5 и 6).

3. Геодезический мониторинг деформаций грунтовых выемок целесообразно выполнять по оригинальной схеме, предусматривающей разработанные алгоритмы по оптимизации расположения пунктов деформационной сети и учету деформированного состояния грунтового массива, а также по прогнозу развития процесса деформирования на основе сравнения остаточных и ковариационных матриц ошибок измерений на каждом цикле наблюдений.

В результате проведенных исследований разработана схема геодезического мониторинга инженерных приповерхностных сооружений (см. рисунок 7). В данном случае это грунтовая выработка для вестибюля метрополитена.

На **первом этапе** (*желтый цвет «1»*) выполняется проектирование деформационной сети. Два подэтапа («А» и «Б») иллюстрируют необходимое сочетание геодезических измерений и геомеханических данных. Моделирование сети (*этап «Б»*) состоит из трёх основных задач: (б1) – оценка точности и выбор расположения тахеометрической станции и конфигурации опорных (квазиопорных) пунктов, это также называется «оптимизацией геодезической (опорной) сети»; (б2) – порядок размещения деформационных марок (геомеханический расчет); (б3) – выбор соответствующих приборов, отвечающих точности измерений.

Второй этап (*синий цвет «2»*) - геодезические измерения, с помощью которых определяется допустимая погрешность и допуск измерения. На этом этапе также необходимо выполнить 3 важные задачи:

В) Предельные ошибки измерений (нормативные значения).

Г) Создается схема способа измерений (см. рисунок 6).

Д) Интервал между циклами наблюдений (при перманентных наблюдениях также возможна оптимизация).

Наконец, **на третьем этапе** (*красный цвет «3»*) выполняется обработка результатов и их сравнение по циклам наблюдений.

Обработка геодезических измерений выбрана красным цветом, потому что на этом этапе выполняется весь анализ, интерпретация чисел и графиков, чтобы определить фактическую деформацию в виде значения и направления.

Кроме того, на этом этапе интерпретация различных собранных данных в определенные временные рамки с соответствующей историей приводит к точному прогнозированию будущего состояния наблюдаемого объекта.

Согласно теории ошибок и результатам анализа с использованием МНК, случайную ошибку можно отличить от систематической или грубой, проверив невязки и определив, соответствует ли ошибка нормальному распределению или нет.

Эллипс ошибок определяется с определенной доверительной вероятностью его большой осью (a) и малой осью (b), а также углом поворота (φ). Эллипс представляет собой ожидаемую величину ошибки (ее значение и направление), его можно описать кругом радиуса (R), и тогда измеренные величины должны располагаться внутри этого круга, в противном случае либо измерения выполнены некорректно, либо имеется деформация объекта (см. рисунок 8).

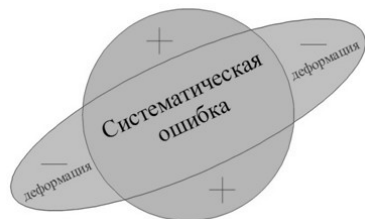


Рисунок 8 – Схема к определению деформаций по результатам измерений

Достоверность и надежность результатов измерений и оценки деформации определяется по эллипсу ошибок, по которому также можно отличить ошибку измерений от деформаций (смещений марки). Рассчитав радиус (R) 95% доверительного круга (по эллипсу ошибок), сравнивают его с вычисленными деформациями, и если значение деформации превышает радиус (R) ($\Delta > R$), то она есть и достоверна. Расстояния до деформационных марок измерялись тахеометром Leica TM50 с точностью $\pm 0,6$ мм и 0,5 секунды для горизонтальных углов. Координаты тахеометрической станции (TS) определялись на основе традиционной обратной угловой засечки. Погрешность определения положения марок, полученная с одной станции (со станции АТС 1) составила около 0,7 мм. В соответствии с нормативами (ГОСТ 24846-2012, Межгосударственный стандарт) при расчетных

значениях осадок до 50 мм СКП измерений деформации не должен быть более 1 мм. Показана возможность повышения точности путем усреднения координат, полученных по станциям АТС1 и АТС2. На рисунке 9 представлена диаграмма зависимости точности определения координат.

Таким образом, полученная точность определения координат деформационных марок отвечает требованиями, указанным в этом нормативном документе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – разработки мониторинга деформаций котлованов на основе использования технологии перманентных геодезических наблюдений, имеющей значение для развития знаний в области прикладной геодезии.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Разработана технологическая схема геодезического мониторинга инженерных сооружений приповерхностного типа, предполагающая использование перманентных наблюдений электронным тахеометром и предусматривающая использование разработанных алгоритмов по оптимизации расположения пунктов деформационной сети и учету деформированного состояния грунтового массива, а также по прогнозу развития процесса деформирования на основе сравнения остаточных и ковариационных матриц ошибок измерений на каждом цикле наблюдений.

2. Проведен анализ существующих способов оценки точности положения пунктов деформационной плановой сети. Проведено их сравнение. Выявлены тенденции развития методов наблюдений. Показаны преимущества применения роботизированных тахеометров, при этом подчеркнута важность определения местоположений станций наблюдений в связи с их

стационарностью. Практическими примерами продемонстрирована необходимость изучения деформированного состояния котлованов. На этой основе разработана методика исследований, ориентированная на использование роботизированных тахеометров и предрасчета деформаций в окрестности котлована.

3. В работе широкое применение получили программные модули по реализации МНК для разнообразных схем линейно-угловых измерений, что позволило получить зависимости точности местоположения станции наблюдения от конфигурации геодезической сети.

4. Разработан программный комплекс «Котлован» для предварительной оценки деформированного состояния грунтового массива, вмещающего выемку, что позволило обосновать расположение тахеометрических станций и оптимизировать расположение деформационных марок. Разработанное программное обеспечение позволяет определять зону влияния при выемке котлована, что дает возможность эффективного проектирования как станций наблюдения, так и деформационных марок.

5. Разработан упрощенный метод обнаружения смещения любого пункта деформационной сети, включая исходные. Этот метод основан на сравнении остаточных матриц в каждом цикле наблюдения с исходной остаточной матрицей, полученной в начальном цикле наблюдений (в эпоху «0»). Метод позволяет обнаруживать кроме смещений пунктов, еще и вид деформации, что дает возможность прогнозирования развития процесса.

6. Разработанные теоретические и практические рекомендации были реализованы на практике в виде создания геодезической сети для мониторинга деформаций при строительстве Эр-Риядского метрополитена в Саудовской Аравии. Предложенный автором комплекс геодезических работ обеспечил контроль деформационных процессов и способствовал успешному завершению строительных работ.

7. Перспективы дальнейших исследований состоят в расширении использования при геодезическом мониторинге

геометрических и деформационных моделей изучаемого объекта. При этом произойдет сближение понятий «геодезическое сопровождение» и «исполнительная съемка». Эти принципы составляют основу так называемой BIM-технологии (строительства с использованием информационного моделирования) строительства зданий и сооружений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Хатум, Х.М. Оптимизация места расположения роботизированных станций наблюдений за деформациями зданий и сооружений / Х.М. Хатум, М.Г. Мустафин // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 9. – С. 2–13.

2. Хатум, Х.М. Проектирование и оценка геодезических наблюдений за деформациями обнажений выемки при строительстве станции метрополитена/ Х.М. Хатум, М.Г. Мустафин // Вестник СГУГиТ. – Новосибирск. – 2020. – Т.25. – № 4. – С. 45-57.

3. Мустафин, М.Г. Некоторые особенности мониторинга деформационных процессов на горно-гидротехнических объектах / М.Г. Мустафин, Х.Д. Аль Фатин, **Х.М. Хатум** // Маркшейдерский вестник. – Москва. – 2020. – № 6 (139). – С. 51-60.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Hatoum, H.M. Geodesic methods for modeling and protection of megalopolis objects / H.M. Hatoum, H.M. Choker, M.G. Mustafin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2019. – Т.698. – pp. 1 – 7. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044009.

5. Choker, H. M. The big structures modeling and archiving using terrestrial laser scanner and proposing a new geodetic method for future monitoring / H. M. Choker., **H. M. Hatoum**, M. R. Abboud // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2019. –Т.698. –

pp. 1 – 7. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044017.

6. Аль Фатин, Х.Д. Влияние атмосферных условий и геометрии сети на результаты геодезических наблюдений / Х.Д. Аль Фатин, **Х.М. Хатум**, Х.М. Шокер, О.А. Колесник // Известия ТулГУ. Науки о Земле // Тульский государственный университет – Москва. – 2021. – Вып. 2 (469). – С. 3-20.

В прочих изданиях:

7. Мустафин М.Г. Мониторинг деформаций сооружений метрополитена в режиме реального времени / М.Г. Мустафин, **Х. Хатум** // Сборник статей научно-информационного центра «Знание» по материалам II Международной научно-практической конференции. «Актуальные проблемы геодезии, кадастра, рационального земле- и природопользования» – Тюменский индустриальный университет (Тюмень) – 2019. – С. 47-54.

8. Хатум, Х.М. Современные геодезические технологии измерений при создании моделей объектов и контроле деформационных процессов / Х.М. Хатум, Х.М. Шокер, М.Г. Мустафин, М.Р. Аббуд // Естественные и технические науки. – Москва. – 2019. – №4 (130). – С. 126-129.

Свидетельства:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613311 Российская Федерация. Программа «КОТЛОВАН» для расчета напряженно-деформированного состояния плотины: № 2021612430; заявл. 02.03.2021; опубл. 05.03.2021, Бюл. № 3. / Мустафин М.Г., **Хатум Х.М.** // заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

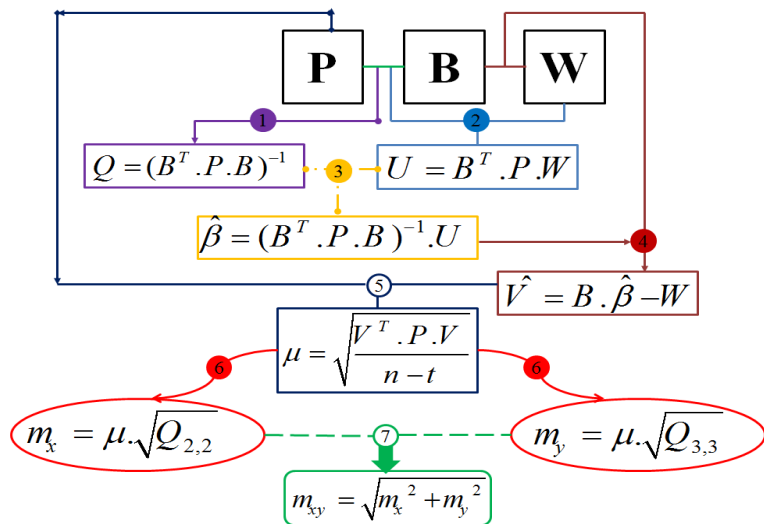
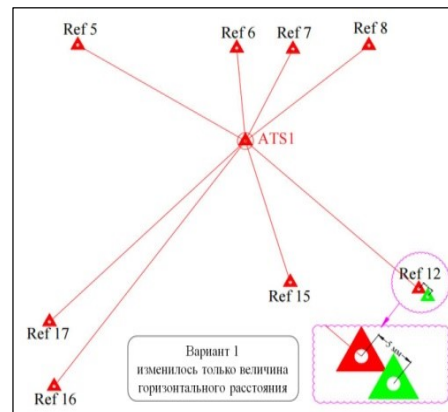
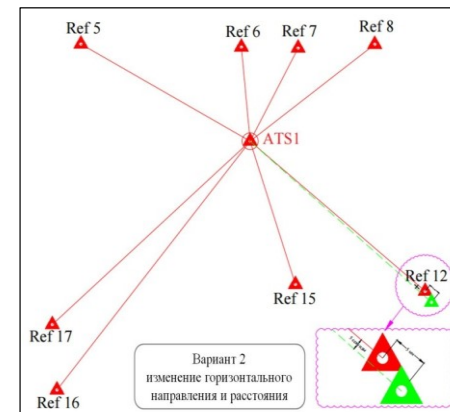


Рисунок 2 – Схема процесса определения координат и проведения оценки точности пунктов
 где N – нормальная матрица; Q – обратная матрица; U – матрица нормированных коэффициентов параметрических уравнений; $\hat{\beta}$ – матрица коррекции для приближенных координат; V – остаточная матрица

(а) Расстояние изменилось



(б) Расстояние и направление изменились



(в) Все расстояния и направления изменились

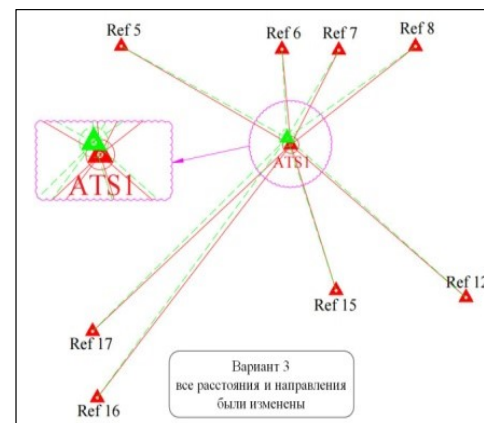


Рисунок 4 – Схема деформационных марок и параметры измерения

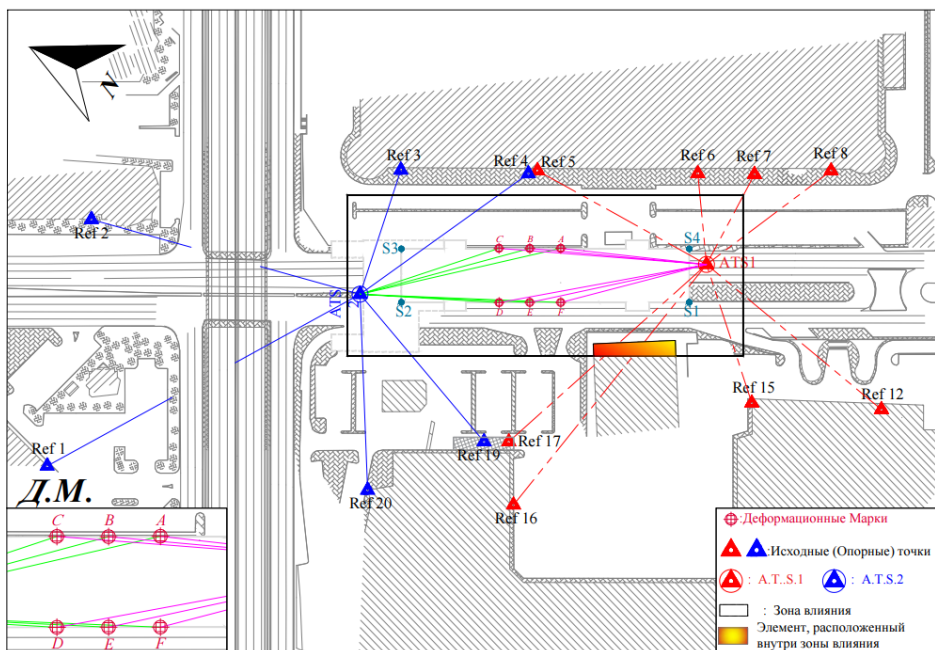


Рисунок 5 – План участка выемки под вестибюль метро с указанием расположения исходных пунктов (Ref); станций наблюдений (АТС) и деформационных марок (А-В)

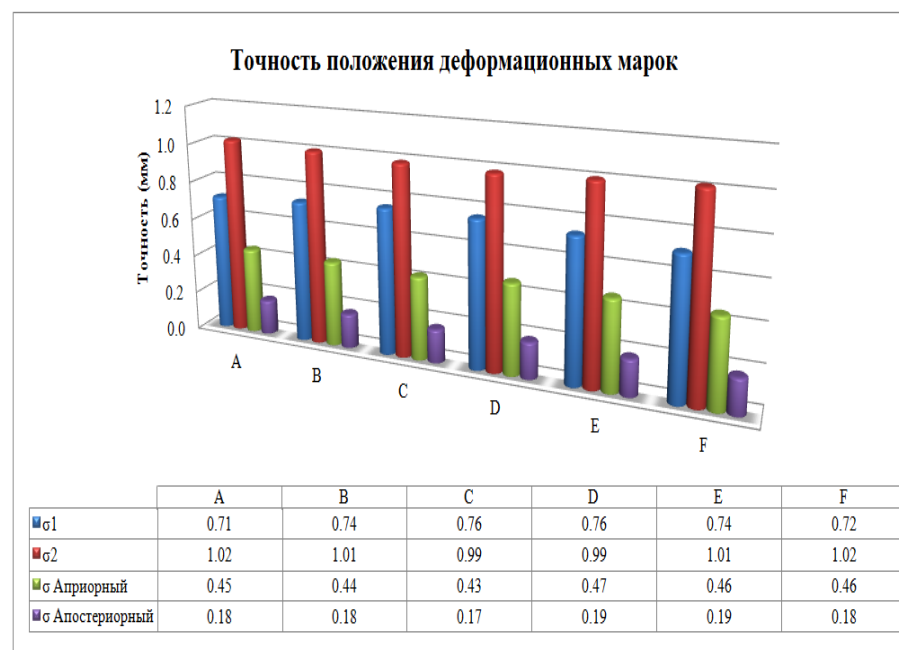


Рисунок 9 – Погрешности определения положения деформационных марок (упрощенный способ и МНК)

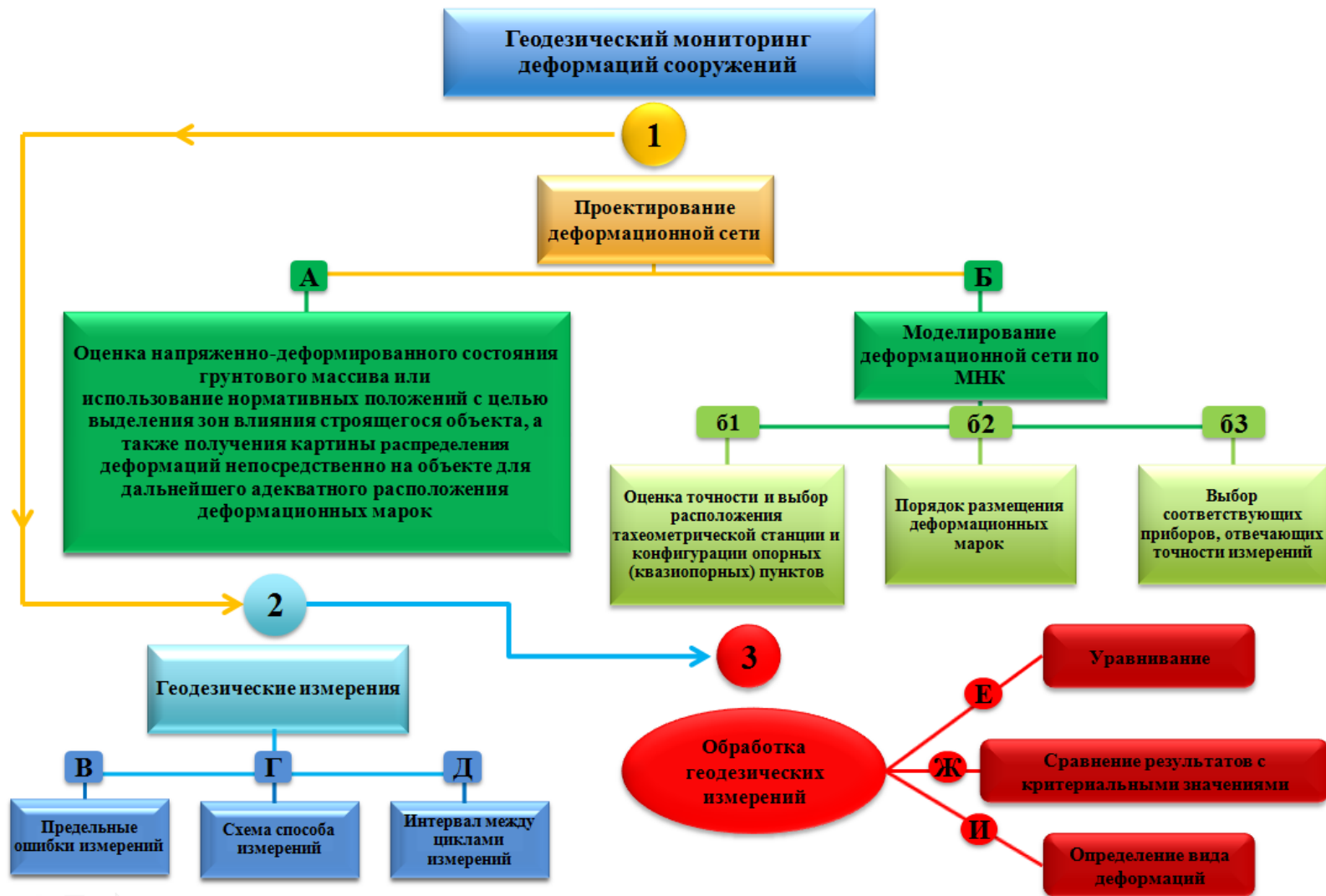


Рисунок 7 – Общая схема геодезического мониторинга деформаций сооружений