

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Мустафин М.Г.

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА О МОНИТОРИНГЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	12
1.1 Постановка задачи определения деформаций.....	12
1.2 Некоторые факторы, влияющие на деформации сооружений	16
1.3 Анализ существующих нормативно-методических документов по мониторингу деформаций зданий и сооружений	18
1.4 Обзор научно-технической литературы по мониторингу деформаций зданий и сооружений	24
1.4.1 Частота наблюдений и требуемая точность обнаружения деформаций	24
1.4.2 Распределение геодезических марок и устойчивость опорных точек.....	26
1.5. Анализ методов и имеющегося опыта наблюдения деформаций зданий, сооружений и земной поверхности	28
1.5.1 Методы измерений горизонтальных и вертикальных смещений	31
1.6 Использование автоматизированной тахеометрической станции (АТС) для измерения горизонтальных и вертикальных смещений.....	44
1.7 Выводы по первой главе.....	47
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПЕРМАНЕНТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГРУНТОВОЙ ВЫЕМКИ	50
2.1 Расчет точности положения места расположения станций наблюдений.....	50
2.1.1 Способы ориентации для начальной настройки	51
2.1.2 Анализ различной конфигурации геодезической сети.....	54
2.1.3 Разработка алгоритма обнаружения смещений деформационных марок и возможных смещений исходных пунктов	71
2.2 Расчет точности положения деформационных марок.....	76
2.3 Определение порядка (места) размещения деформационных марок на основе предрасчета деформированного состояния грунтовой выемки	86

2.3.1 Геомеханический анализ, цель и требования проектирования	90
2.3.2 Определение зоны влияния строящегося объекта и мест размещения деформационных марок.....	90
2.4 Прогноз деформирования грунтовой выемки по данным геодезических измерений.....	92
2.5 Выводы по второй главе	96
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ ГРУНТОВОЙ ВЫЕМКИ ПОД ВЕСТИБЮЛЬ МЕТРО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТАХЕОМЕТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ	99
3.1 Принципиальная схема геодезических наблюдений.....	100
3.2 Описание основных пунктов схемы.....	101
3.2.1 Проектирование деформационной сети.....	101
3.2.2 Геодезические измерения.....	106
3.2.3 Обработка геодезических измерений.....	111
3.3 Выводы по третьей главе.....	114
ГЛАВА 4 ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА КОНКРЕТНОМ ОБЪЕКТЕ ИНЖЕНЕРНОГО СООРУЖЕНИЯ.....	115
4.1 Описание объекта практической реализации разработанной методики	115
4.2 Проектирование деформационной сети.....	118
4.2.1 Поправка в масштабную и аддитивную константу	122
4.3 Геодезические измерения	124
4.3.1 Приведение в единую систему координат двух наблюдательных станций.	124
4.3.2 Определение координат квазиопорных точек.....	126
4.3.3 Определение координаты деформационных марок	127
4.4 Обработка геодезических измерений.....	133
4.5 Выводы по четвертой главе.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	144

ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты расчета координат «АТС 1» и оценки точности его положения с использованием упрощенного метода обратной-угловой засечки (традиционный метод).....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты расчета координат «АТС 2» и оценки точности его положения с использованием упрощенного метода обратной-угловой засечки (традиционный метод).....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты расчета координат «АТС 1» и оценки точности его положения путем разработанного метода и алгоритма с использованием Метода Наименьших Квадратов (МНК)	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Результаты расчета координат «АТС 2» и оценки точности его положения путем разработанного метода и алгоритма с использованием Метода Наименьших Квадратов (МНК)	181
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Результаты расчета координат «Деформационных марок» и оценки точности их положения путем разработанного метода и алгоритма с использованием Метода Наименьших Квадратов (МНК)	191

ВВЕДЕНИЕ

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 существуют целый ряд инженерных комплексов по оценки деформационных процессов.

Приобретают 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 Эр Рияде (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., Брынь 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 отмеченных авторов отмечается на 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, да еще вертикальных скальных обнажений описаний почти нет. 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 разработки и организации геодезического мониторинга на примере строительства метро в Эр-Рияде (Саудовская Аравия) и будет весьма полезно 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, программная алгоритмизация вычислений и 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 заключается в создании методики тахеометрических перманентных наблюдений за деформациями грунтовых выемок, позволяющей повысить точность оценки деформационного процесса. По результатам исследований автора в Саудовской Аравии создана геодезическая сеть и система мониторинга для геодезических и

инженерных служб, обеспечивающих строительство метро.

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 измерения 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. Полученные результаты не противоречат и дополняют ранее опубликованные работы по теме диссертации в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, а также в других изданиях отечественных и зарубежных исследователей.

Апробация результатов исследования проведена на следующих научно-практических мероприятиях:

1. II 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 убранизированными 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. Кисловодск, 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.

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.

Благодарности. Выражаю благодарность своему научному руководителю – д.т.н., профессору кафедры инженерной геодезии Горного университета Мустафину М.Г. за его ценные советы и помощь при работе над диссертацией. Кроме того, я хотел бы поблагодарить всех сотрудников кафедры инженерной геодезии за постоянную поддержку, которая позволила мне чувствовать себя как в своей семье.

Я бесконечно признателен к.т.н. Аббуду М.Р. за рекомендацию поступления

в аспирантуру и ценные наставления по работе и подготовке к защите диссертации.

Я также выражаю глубокое почтение и благодарность моим родителям и членам моей семьи, которые всегда верили в меня и гордились моими достижениями, что поддерживало меня в сложных периодах.

Любое упущение в этом кратком признании не означает недостатка благодарности.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА О МОНИТОРИНГЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1.1 Постановка задачи определения деформаций

Разрушение массивного объекта (здания или сооружения) может иметь чрезвычайные последствия. По этой причине раннее выявление опасности имеет решающее значение и обуславливает потребность в надежной методологии для регулярного, структурного и мобильного мониторинга деформации. Большие выемки грунта (открытая разработка, котлован), районы, близкие к границам тектонических плит, карьеры для добычи полезных ископаемых, резервуары нефти или подземных вод – это объекты, которые должны быть подвергнуты постоянным наблюдениям за их стабильностью [136, 139, 141, 164]. В этой связи следует привести несколько примеров аварий, которые произошли в результате потери прочности конструкций и их разрушению.

В 2010 году дом в Санкт-Петербурге обрушился с первого по восьмой этаж (см. рисунок. 1.1). В результате аварии пострадал один человек.



Рисунок 1.1 – Фото аварийного дома (Санкт-Петербург)

В 2013 году в Барнауле обрушились перекрытия в трехэтажном доме, погибли два человека [41]. В июле 2015 года в Перми два человека погибли в результате обрушения жилого дома постройки 1950 года (см. рисунок 1.2). Обрушение произошло из-за ослабления несущих конструкций здания. Дом был в

плохом состоянии; однако до аварии не было предпринято никаких чрезвычайных мер [43].



Рисунок 1.2 – Вид жилого дома в Перми после аварии

Большая авария произошла в Шанхае (Китай) в июне 2009 года, когда разрушилось 13-этажное здание, строившееся на улице Лиан Хуанань в районе Миньшань [103] (см.рисунок 1.3а). Еще один случай обрушения конструкции произошел 20 апреля 2004 года в Сингапуре. Шоссе Николл внезапно рухнуло [153] (см. рисунок 1.3б).



Рисунок 1.3 – а) Вид разрушения здания в Шанхае;
б) Картина разрушений на шоссе Николл

Как сообщалось, из-за разрушения туннеля и земляных работ под автомагистралью на глубине 30 м образовалась подземное пространство, которое стала причиной обрушения автомагистрали. В результате обрушения погибли четыре человека и три получили ранения.

Из-за сбоев в работе произошло обрушение грунта на строительной площадке Маунт-Уэверли (Mount Waverley). Инженер-строитель и его компания были осуждены и оштрафованы на общую сумму 480 000 долларов [42].



Рисунок 1.4 – Вид обрушения грунта на строительной площадке
Маунт-Уэверли

В результате обрушения образовалась яма глубиной 15 метров у дороги Хайбери (Highbury Road) в Маунт-Уэверли. Выемка созданная для строительства медицинского и детского центра с двухэтажной автостоянкой в подвале обрушилась в 2015 году после проливного дождя (см. рисунок 1.4).

Исследования деформационных процессов являются одним из наиболее важных видов деятельности в геодезии. Их результаты имеют непосредственное отношение к безопасности человеческой жизни и стабильности инженерных сооружений. Изучение деформаций дает предоставление не только

геометрическое состояние деформированного объекта, но и информацию о его влиянии на окружающую среду. Это обеспечивает лучшее понимание и проектирование геодезических наблюдений.

Как и при обычном измерении, измерения деформации проводятся в три этапа:

- 1) разработка схемы мониторинга;
- 2) полевое наблюдение (геодезические измерения);
- 3) обработка и анализ полученных данных.

Особое внимание уделяется вопросу повышения точности геодезических работ при определении смещений по различным осям зданий и сооружений.

Для решения этой проблемы необходимо совершенствовать существующие и разрабатывать новые методы измерения. Возможность достигать высокоточных измерений с помощью новых инструментов порой недостаточно. Необходимо глубокое понимание этих возможностей и разработка новых способов обработки данных. В настоящее время вычисления с использованием компьютеров и программного обеспечения помогают повысить производительность системы мониторинга.

В этой связи необходимо решение следующих вопросов:

- Оценка как горизонтальных, так и вертикальных смещений, а также уравнивание специальных геодезических сетей.
- Интерпретация специфики смещений геодезических пунктов между циклами наблюдений для определения вида деформации.
- Обработка результатов повторных измерений и разработка алгоритмов, обеспечивающих их хранение и циклический алгоритм сравнения.
- Количественная оценка значений деформации и их прогноз.

Поиск ответов на эти вопросы позволит нам получить более надежные результаты при определении как величин, так и причин деформаций и повысить точность измерений.

Проблема оптимизации и разработки схем мониторинга была признана весьма важной и включена в программу исследований международного

специального комитета (ФИГ, Комиссия 6) по анализу деформации. Кафедра инженерной геодезии Университета «Нью-Брансуика (UNB)», именуемая «Фредериктон Групп», является членом специального комитета ФИГ [158]. Исследовательские проекты были созданы для решения следующих задач:

- 1) Оптимизация и проектирование сетей мониторинга для геодезических и негеодезических наблюдений.
- 2) Оценка результатов наблюдений, обнаружение выбросов и систематических ошибок.
- 3) Анализ вида деформаций.

Таким образом четко обозначены необходимые задачи, решение которых позволит повысить качество проведения мониторинговых наблюдений за зданиями и сооружениями.

1.2 Некоторые факторы, влияющие на деформации сооружений

Здания и сооружения подвержены деформациям из-за влияния различных природных и техногенных факторов, как на фундамент, так и на саму конструкцию. Геометрические параметры конструкции оказывают существенное влияние на величину ее деформации в особенности к действиям внешних сил. Например, высотное сооружение испытывает гораздо большую ветровую нагрузку, нежели здание небольшой высоты.

К основным природным факторам, влияющим на деформацию основания зданий и сооружений, можно отнести в первую очередь физико-механические свойства пород, слагающих основание. Далее, существенные изменения деформационного процесса вызываются влиянием температуры, обводненности и тектонических сил. Немаловажным зачастую бывает воздействие техногенное: проведение рядом строительных, осушительных или иных работ.

Некоторые авторы [9, 14, 15, 31, 52, 127, 128, 148, 161] относят к так называемым искусственным факторам такие воздействия:

1. Давление конструкции (осадка, неравномерная осадка).
2. Вибрация, вызванная работой различных машин, механизмов.

3. Ошибки проектирования, допущенные при инженерно-геологических и гидрогеологических изысканиях.
4. Ослабление фундамента из-за подработки сооружения.
5. Изменение давления на фундамент, вызванное надстройкой здания или строительством ряда новых сооружений.
6. Изменение свойств горных пород. Это изменение происходит за счет:
 - Недостаточно правильная конструкция или разработка дренажа, способствующая дополнительным нагрузкам, возникающим из-за скопления воды и в конце к перегрузке.
 - Искусственное понижение или повышение уровня грунтовых вод во время строительных или ремонтных работ.

Ниже приведем примеры задач, которые решаются геодезистами за счет мониторинга и качественное решение которых связано со знанием механики. При проектировании любой геотехнической конструкции инженер должен обеспечить ее устойчивость. Для этого геодезист должен обеспечить стабильность исходных пунктов и провести наблюдения для отражения физической сущности изучаемого процесса деформирования.

Проводя измерения, мы должны быть уверены в том, что АТС будет находиться в неподвижной зоне, обеспечив стабильность объекта и стабильность исходных пунктов геодезической сети (см. рисунок 1.5).

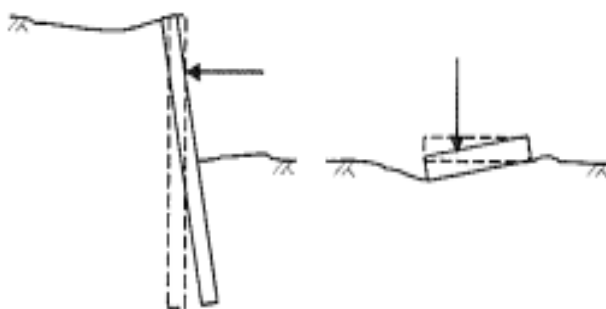


Рисунок 1.5 – Схема к обеспечению стабильности исходного пункта [161]

Во-вторых, геодезические наблюдения должны максимальным образом отследить характерные точки деформирования изучаемого объекта. Задача почти такая же, когда геодезист выполняет топографическую съемку – также проводя

измерения по характерным точкам. Ниже на рисунке 1.6а [148]. приведены типичные задачи мониторинга и для них еще предстоит разработать геодезический мониторинг. В нашем исследовании речь идет о котловане, однако принципиальные решения для мониторинга такие же.

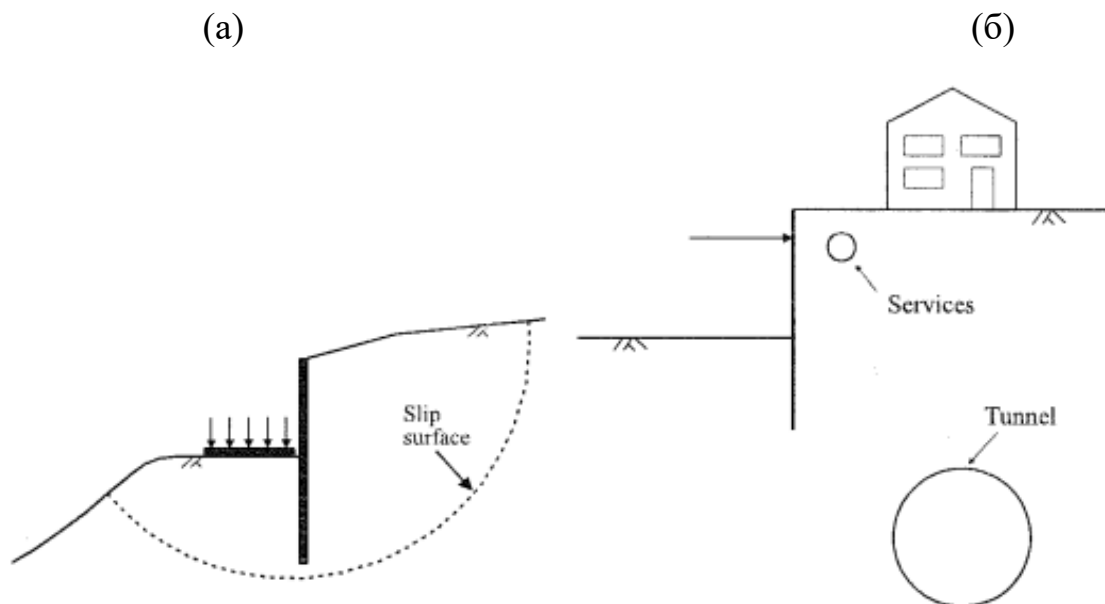


Рисунок 1.6 – Схема к оценке деформаций подпорной стены (а) и здания у откоса (б) [148]

1.3 Анализ существующих нормативно-методических документов по мониторингу деформаций зданий и сооружений

«ГОСТ 24846-2012 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» [19, 20] (Далее – ГОСТ. Грунты), регламентирует работы по обнаружению деформаций зданий и сооружений и является основным федеральным нормативным документом. Объекты и блоки, которые попадают в зону влияния строящегося объекта также рассматривается в этом документе.

Требования к точности геодезических горизонтальных и вертикальных измерений приведены в таблице 1.1 [19,20]. Структурные элементы здания, инженерно-геологические и гидрогеологические признаки основного грунта, а также предполагаемые значения деформации являются основой определения класса точности.

Таблица 1.1 – Классы точности измерения вертикальных и горизонтальных перемещений

Класс точности измерений	Допускаемая погрешность измерения перемещений, мм	
	Вертикальных	Горизонтальных
I	1	2
II	2	5
III	5	10
IV	10	15

I, II – Для зданий и сооружений: уникальные; длительное время (более 50 лет) в эксплуатации; возводится на каменистых и полугкальных почвах, на песчаных, глинистых и других сжимаемых почвах;

III – Для зданий и сооружений, построенных на насыпных, оседающих, торфяных и других исключительно сжимаемых почвах;

IV – Для земляных работ.

В ГОСТ Грунты представлены методы измерения горизонтальных и вертикальных деформаций. Так, согласно этому документу, вертикальные смещения могут быть определены с использованием одного или комбинации следующих методов: геометрическое, тригонометрическое или гидростатическое нивелирование. Рекомендуются также методы створных наблюдений, отдельных направлений, триангуляции, трилатерации, полигонометрии и фотограмметрии. Вместе с тем эти методы следует использовать по отдельности или в сочетании для определения горизонтальных смещений зданий и сооружений. В этом нормативном документе подробно рассматриваются типы реперов и деформационных марок и требования к их размещению. По точности измерений определяется тип реперов. Для классов I и II центры устанавливаются и закрепляются глубоко в практически несжимаемых грунтах. Грунтовые реперы, используются для классов точности III и IV; основы таких реперов должны быть заложены ниже глубины сезонного промерзания или перемещения грунта. А стенные реперы устанавливаются на несущих конструкциях зданий и сооружений, таких как фундаменты конструкций, которые обычно считаются

устойчивыми. Все упомянутые детали присутствуют в этом документе, но следует отметить, что вопросы, касающиеся организации процесса мониторинга отсутствуют.

На основании нормативного документа СНиП 3.01.01-84 «Пособие по производству геодезических работ в строительстве» [86], на всех этапах строительства зданий и сооружений должны выполняться геодезические наблюдения. Также в нем рассматриваются предпосылки обеспечения точности их реализации.

Инспекционные работы для зданий и сооружений в дополнение к их окружению должны выполняться во время геодезических наблюдений. Эти проверки регламентируются нормативным документом «Рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния эксплуатируемых зданий, расположенных вблизи нового строительства или реконструкции» [79]. В нем отмечается следующие виды работ:

- Определение причин деформации и степени опасности для нормальной эксплуатации здания.
- Обеспечение прогноза совершенствования естественных и техногенных подходов и оценки степени риска деформации зданий и сооружений.
- Получение закономерности процесса движения горных пород и зависимость их особенностей от ключевых влияющих факторов.
- Установление допустимого и максимального смещения для зданий и сооружений с уточнением методов расчета.
- Определить и оценить абсолютные и относительные значения искажений с помощью расчетных и допустимых значений.
- Принять своевременные меры для предотвращения недопустимых деформаций или их последствий.

В нормативном документе ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинг технического состояния» [21,22], рассматриваются состав деформационных характеристик для контроля объектов. Отмечается, что осадка фундамента, ее разность и крен являются факторами,

которые следует контролировать для строящихся зданий и сооружений. При строительстве вблизи существующих зданий также контролируется крен. В случае глубины выемки более 10 м факторы, которые необходимо контролировать — это горизонтальные перемещения конструкций и фундаментов. Но, контроль вертикальных и горизонтальных смещений должен применяться в случае строительства рядом котлована.

Приведенный выше документ рекомендует осуществлять мониторинг смещения и деформации как для строящихся, так и для других зданий и сооружений, попадающих в зону влияния подземного строительства (буферная зона). Этот процесс состоит из проверки положения реперов в течение определенного промежутка времени. Деформации земной поверхности и сдвигание грунта выполняются с использованием системы реперов. Следует отметить, что методология наблюдения за деформациями и метод определения зон влияния в данном документе отсутствуют.

Система мониторинга, рекомендованная в Территориальных нормах (РД 07-166-97 «Инструкция по наблюдениям за сдвижением земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений» [39]), состоит из наблюдательной станции, включающей ряд деформационных марок, заложенных в грунт. Основываясь на рекомендации этого документа, измерения должны выполняться с целью обнаружения смещений строящегося подземного сооружения, а также его влияния на объекты, расположенные на земной поверхности в зоне влияния подземного сооружения.

Кроме того, согласно рекомендации документа, прогнозирование ожидаемых смещений и деформаций земной поверхности при строительстве станции метрополитена наблюдения является обязательным. Для этого разрабатываются следующие параметры:

- Наиболее надежные методы наблюдения, соответствующие требованиям.
- Оптимальное расположение марок (реперов).
- Рациональная частота наблюдений.

- Точность измерений.

Рекомендуется распределять профильные линии перпендикулярно большому размеру подземного сооружения или открытой разработки. На основании нормативного документа рабочие реперы (деформационные марки), а также опорные реперы должны быть расположены на этих линиях и привязаны к нивелирующей сети. При этом опорные реперы должны быть заложены за пределами зоны вероятных оседаний земной поверхности. Оптимальное количество реперов по этим направлениям - 10 при открытом способе строительства подземных сооружений и 20 при подземном способе строительства сооружений (туннелирование). Расстояние между рабочими реперами варьирует от 5 до 10 м, в зависимости от ожидаемого смещения и характера строящейся конструкции. Смещения реперов следует определять с помощью систематических измерений и периодически проверять на наличие горизонтальных и вертикальных смещений. Для наблюдения горизонтального смещения должны соблюдаться следующие рекомендации:

- Использовать стальную компарированную рулетку.
- Измерения расстояний должны проводиться в прямом и обратном направлениях, принимая во внимание, что расхождение не должно превышать 1: 10000.

- Схемы характера смещений увязываются с динамикой добычи.

С другой стороны, для наблюдения вертикальных смещений рекомендуется:

- Геометрическое нивелирование рабочих реперов должно выполняться в несколько циклов, и абсолютные значения деформации, а также скорость их изменения могут быть определены путем сравнения результатов наблюдений в различных циклах.

- Нивелирование реперов должно выполняться по способу из середины с максимальным плечом $75 \text{ м} \pm 2 \text{ м}$.

- Различия в превышениях между соседними реперами, полученными на «черной» и «красной» сторонах рельса, не превышают 3 мм, а общее расхождение не должно превышать $h < 15 \text{ мм} \sqrt{L} \text{ км}$.

Ссылаясь на этот документ [39], устанавливаются границы зоны опасного влияния подземного строительства на земную поверхность: по уклонам $i = 4 \cdot 10^{-3}$ и растяжению $e = 2 \cdot 10^{-3}$.

Многие факторы влияют на определение размера этой зоны (мула сдвига). Их учет способствует правильному прогнозированию и, конечно, правильному анализу. Например: несущая способность основания, устойчивость склонов, прилегающих к сооружению, устойчивость самого сооружения и ее отдельных элементов, устойчивость ограждения котлованов и т. д. Поэтому в территориальном строительном кодексе «ТСН 50-302-2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге» [77], приведено руководство по определению зоны воздействия или влияния нового строительства с учетом характеристик фундаментов для Санкт-Петербурга. Отмечено, что в ходе строительства прогнозные значения перечисленных факторов могут быть проверены. При любых изменениях расчет может быть повторен, а затем определяется новая зона влияния. Кроме того, 30-метровое расстояние от внешнего периметра конструкции рассматривается как зона предварительного влияния, и все здания и сооружения, попадающие в эту зону, должны быть проверены на основе этого стандарта. Кроме того приводится распределение деформационных марок.

Требования к расчету зоны влияния строящегося сооружения приведены в нормативном документе «МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения» [70]. В документе определено на каких зданиях или сооружениях следует проводить мониторинг деформации. Также учитывается метод крепления стенки котлована и его глубина, по которым приближенно определяется зона влияния.

Несмотря на важные рекомендации нормативных документов, их анализ показал, что они позволяют определять не все выделенные факторы, обуславливающие опасные деформации, а также нет четкой методологии проведения геодезического мониторинга сооружений в увязке с геомеханическим фактором. В описанных документах было отмечена важность прогнозирования

зоны влияния, но не рекомендуется использовать методы математического прогнозирования влияния строящегося сооружения на окружающие существующие здания. В нормативных документах также не содержатся практических рекомендаций для автоматической системы мониторинга, а также применения непрерывных измерений.

1.4 Обзор научно-технической литературы по мониторингу деформаций зданий и сооружений

Точность, частота и стоимость наблюдений, а также достоверность результатов определяют выбор методов измерения [37, 59]. Следует отметить, что они зависят друг от друга.

1.4.1 Частота наблюдений и требуемая точность обнаружения деформаций

На этапе строительства происходит 50-85% деформации [37, 53], поэтому на протяжении всего периода строительства здания и сооружения должны контролироваться с помощью геодезических методов до достижения стабильного состояния [19, 20, 60, 149]. Кроме того, следует учитывать вышеприведенные факторы при проведении наблюдений.

Ссылаясь на нормативные документы, которые предлагают рекомендации по частоте наблюдения или основанные на геотехнических прогнозах возможной деформации, определяется предварительная или начальная частота наблюдения. Обычно, наблюдения проводятся один раз в месяц в течение всего периода строительства. А в эксплуатационный период до стабилизации конструкции (Деф. ≤ 1 мм в год). Как только смещения стабилизируются, частота наблюдений меняется с одного раза в месяц до одного раза в год и даже 5 лет.

В [37] отмечается, что частота наблюдения напрямую зависит от процента завершения строительства. Другими словами, наблюдение должно быть выполнено, когда массовая нагрузка на конструкцию достигает 25%, 50%, 75% и 100%.

Требования к точности измерений отличаются в зависимости от объекта и его конструкции, а также от типа грунта, характера и размера конструкции, относительно к ее высоте. Поэтому, ссылаясь на нормативные документы или посредством расчетов, определяется точность геодезических измерений [37, 59]. Предварительное определение точности поможет в выборе необходимых и надежных методов и инструментов измерения. В качестве примера можно привести расчет определения требуемой точности в зависимости от величины и скорости изменения деформации между циклами наблюдения, показанный в работе [72]. Поскольку скорость изменения деформаций в начале процесса мониторинга неизвестна, следовательно, оценочные значения этих факторов корректируются в процессе наблюдений, опираясь на полученные результаты. Причем не только размер и скорость деформации неизвестны. Точность должна рассматриваться как переменная, которая будет рассчитываться и обосновываться на каждом этапе геодезического контроля [28, 36, 38, 50, 56, 62, 89, 90, 99]. Эта переменная пропорциональна уровню близости результатов мониторинга к максимально допустимой деформации. Чем ближе к красной зоне (макс. допустимые деформации), тем более точный контроль требуется. Однако в [26] рекомендуется проводить геодезический контроль с той же точностью, которая требуется для строительства этих конструкций.

В работе [36] отмечается, что средняя квадратическая погрешность (СКП) деформации должна заменить ее допустимое значение (требование СНиП) для определения требуемой точности. Но следует учитывать, что ожидаемая деформация значительно больше СКП. Вычитание 0,2 из значения допустимой деформации (на основе [36]) также было введено в качестве метода определения точности.

Точность результатов первого цикла мониторинга следует сравнивать с допустимыми значениями деформации, чтобы проверить, была ли заданная точность правильной или требуется модификация [81]. В случае удовлетворения условий следует проводить анализ результатов измерений и некоторые документы должны быть подготовлены, чтобы объяснить вид и процесс

деформации (ведомости отметок, осадок, горизонтальных смещений, изменений кренов и т.д.). Графики, статистика и диаграммы также включены в эти документы.

1.4.2 Распределение геодезических марок и устойчивость опорных точек

Распределение геодезических марок, образующих систему мониторинга, является важнейшим этапом процесса мониторинга деформации [93]. Эти марки делятся на: опорные точки (исходные пункты) и деформационные марки [36, 37].

Исходные пункты должны быть закреплены на устойчивом основании: на земной поверхности вне зоны влияния строительства, эксплуатации сооружения или грунтовой выемки. Это условие распределения должно гарантировать, что исходные пункты будут стабильны в течение всего периода строительства и мониторинга.

Триангуляция, полигонометрия, трилатерация, построение линейно-угловых сетей могут использоваться индивидуально для установления горизонтальных опорных точек или могут быть объединены. Но для вертикальных исходных пунктов используется традиционное геометрическое нивелирование [36].

Поскольку требуемая точность наблюдений за деформацией определена, точность геодезической сети должна совпадать с требованиями таким образом, чтобы обеспечить обнаружение деформации конструкции в пределах допусков. В.Г. Селиханович Ю.И. Маркузе, Г.П. Левчук и др. изучали точность линейных и угловых измерений в период мониторинга [11, 54, 57, 58, 85].

Дизайн типов и места установки деформационных марок рассматриваются исходя из цели и предмета деформации. В настоящее время различные призмы являются отражателями, используемыми в качестве деформационных марок [60]. Они прикрепляются к наблюдаемому объекту и смещаются вместе с ним. Таким образом, любые изменения положения отражателя (координаты, расстояния или углы) отражают деформацию объекта.

В ряде работ в силу важности вопросов специально исследовано

устойчивость (стабильность) исходных пунктов [9, 10, 16, 63, 76, 89, 110, 135]. Проблема устойчивости *вертикальных реперов* была исследована во многих работах в России и за рубежом:

- В.Ф. Черников вводит принцип постоянного усреднения отметок реперов..
- В.А. Карпенко рекомендует метод анализа различий на основе корреляции.
- В.Н. Ганьшина и А.Ф. Стороженко основаны на неизменности средней высоты исходных реперов.

Но метод, введенный А. Костехелем, является наиболее практичным по простоте реализации расчетов. Этот метод основан на выявлении наиболее стабильного репера и использует его для коррекции сети [76, 93].

Основываясь на последнем методе, разработанном румынским геодезистом А. Костехелем, первоначальное наблюдение реперов сравнивается с наблюдением различных циклов (уравнение (1.1)). Различия считаются результатом потери устойчивости.

$$v = h_j - h_l \quad (1.1)$$

где v – значения осадок реперов, h_j – текущее наблюдение, h_l – наблюдение с первых циклов.

Репер, для которого полученная $[v^2] = \min$ считается стабильным и на основе его высоты рассчитываются все высоты других реперов.

Горизонтальная стабильность сети. Проверка основана на расстояниях между исходными пунктами сети трилатерации, но в триангуляционных сетях проверка зависит от углов. Поэтому неподвижность точки проверяется путем подтверждения неизменности расстояний и углов сети [36]. Поскольку эти различия после уравнивания не превышают погрешности измерения, точка считается стабильной и неподвижной. В противном случае точка деформируется. Упомянутые методы требуют автоматизации вычислительных процедур, что считается общим недостатком при анализе устойчивости точек горизонтальной сети [37].

Использование опции «Обратная линейно-угловая засечка», имеющейся в тахеометре, рекомендуется в работе [53], где автор рекомендует проверять устойчивость точек на основе СКП определения данных координат, полученных из измерений 3 исходных точек. Предлагается изменить комбинацию используемых точек и отслеживать полученную СКП. Затем на основе анализа результатов обнаруживается деформированная или смещенная точка [60].

Этот метод является практическим методом, который можно выполнить перед любой сессией наблюдения, чтобы обеспечить стабильность опорных точек и, конечно, повысить точность наблюдения и контроля деформации.

1.5 Анализ методов и имеющегося опыта наблюдения деформаций зданий, сооружений и земной поверхности

Поскольку деформации оснований зданий или сооружений наблюдаются как с использованием геодезических, так и негеодезических методов измерения, то при их сочетании увеличивается вероятность определения получения более точных значений.

Геотехнический мониторинг рассматривается как более системное рассмотрение устойчивости объекта, вмещающий в себя геодезический мониторинг [70]. Это представление все более видоизменяется в сторону объединения понятий «геотехнический мониторинг» и «геодезический мониторинг». На наш взгляд большой вес приобретают систематические наблюдения, которые выполняют геодезисты. Геотехнический анализ вполне по силам выполнить геодезисту в нынешних условиях обилия компьютерных технологий по геомеханической и геотехнической оценке состояния конкретного объекта. Это было подтверждено анализом научно-методических источников [9, 13, 18, 24, 60, 78, 79, 87]. Также вопросы сдвижения грунта в результате горных работ, а также защиты существующих зданий исследуются в [1, 74, 84].

Следует отметить, что геодезические наблюдения за смещениями и деформациями земной поверхности, зданий и сооружений, попадающих в зону влияния сооружения котлована, по-прежнему считаются актуальной проблемой,

требующей дальнейшего изучения.

К негеодезическим методам относятся автономные устройства, прикрепленные к сооружениям или установленные рядом с ней (контрольные точки). Эти устройства находятся либо на самой структуре, либо внутри нее, поэтому они движутся вместе с ней. Измеряются взаимные, относительные смещения. К этим устройствам относятся отвесные линии, клинометры, деформометры, измерители смещения, селекторы, микроренорометры, барьеры, стационарные гидростатические системы, кронштейны, инклинометры, маяки и все виды датчиков, которые работают дискретно или непрерывно в полуавтоматическом или автоматическом режимах и т. д.

В [15] датчики перемещения (экстензометр) закреплены на верхней части удлинительного стержня и проложены в скважинах, пробуренных в определенных местах, что позволяет проводить ручные и автоматические измерения. Точность 0,1-0,9 мм, простота эксплуатации и настройки в дополнение к возможности регулировки глубины формируют преимущества этой системы. Однако, когда речь заходит об автоматизации, обнаруживается главный недостаток - высокая стоимость.

Измерение горизонтальных расстояний с помощью измерительной ленты введено в [39] как метод обнаружения смещения земной поверхности из-за подземного строительства. Тем не менее, точность измерения, время и трудозатраты являются явными и очевидными недостатками этого метода.

Авторы [28, 37, 46, 54, 75, 90, 141-147, 159, 160] предложили методику геодезического мониторинга деформаций различных сооружений. Кроме того, они предложили принцип математической обработки для измерения деформации. Так же использование новых технологий и компьютерного моделирования было рекомендовано в работах [2, 59, 93, 97, 100, 101, 104-109, 117].

В этих работах [67, 68] рекомендуется осуществлять мониторинг и контроль зоны воздействия деформации и строительной среды подземного сооружения с помощью геодезической системы на протяжении всего периода строительных работ. Основываясь на [67], буферная зона влияния должна быть исследована

перед сооружением котлована в городской зоне, чтобы определить состояние существующих сооружений. Это поможет в будущем для сравнения деформаций. Методика предусматривает повторные тахеометрические измерения для определения координат деформационных марок.

В статье [67] автор утверждает, что измерение горизонтальной и вертикальной (3D) деформации зданий и земной поверхности, расположенных в зоне влияния подземного сооружения, необходимо и помогает в моделировании деформации, которая в свою очередь позволит сделать точный прогноз будущей деформации. Кроме того, метод конечных элементов считается наиболее надежным подходом для прогнозирования процесса деформации горных пород при возведении подземных сооружений [9, 13, 28, 29, 31, 44, 61, 64-66, 69].

Основными и современными методами наблюдения деформаций являются геодезические методы. Использование их позволяет одновременно измерять все деформационные марки контролируемого объекта, определять взаимное смещение любых двух наблюдаемых марок и даже индивидуальное смещение можно определять на основе опорных точек с известными и фиксированными координатами. Помимо указанных выше преимуществ, сочетание новых методов геодезических измерений и специальных методов математической обработки позволяет контролировать и обнаружить смещения не только деформационных марок, но даже основных опорных точек.

В практике наблюдения деформаций наиболее широко используются следующие высокоточные геодезические методы:

- 1) Геометрическое нивелирование для определения вертикальных смещений, где точки структур легко доступны для наблюдения.
- 2) Тригонометрическое нивелирование для определения вертикальных смещений, в том числе для труднодоступных точек конструкций.
- 3) Гидростатическое и гидродинамическое нивелирование для определения вертикальных смещений закрытых недоступных точек, расположенных приблизительно на одном и том же горизонте.

4) Микронивелирование для определения вертикальных смещений точек узлов технологического оборудования, расположенных приблизительно на одном горизонте (± 2 мм).

5) Створные измерения для определения горизонтальных смещений точек основания и конструкции.

6) Метод угловой или линейно-угловой микротриангуляции (включая геодезические четырехугольники без диагоналей, угловые и линейно-угловые наблюдения) для определения горизонтальных смещений открытых и труднодоступных точек.

7) Метод полигонометрии для определения горизонтальных смещений точек фундаментов и конструкций и т. д.

В дополнение к наблюдениям за деформацией по их результатам можно вычислить их вид.

Ожидаемая величина смещения в соответствии с допустимой погрешностью приводит к определению требуемой точности измерения, что, в свою очередь, играет основную роль при выборе метода измерения для вертикального и горизонтального смещения.

1.5.1 Методы измерений горизонтальных и вертикальных смещений

Наблюдения за деформациями могут быть выполнены с помощью комбинации измерений, таких как координат деформационных марок (X , Y и Z), разности координат (ΔX , ΔY и ΔZ), расстояния, направления, азимуты, отметки и т. д. При этом могут быть использованы наземные или спутниковые геодезические методы.

Существуют различные методы измерения горизонтальной или вертикальной деформации. И точность регламентируется требованиями, указанным в таблице 1.2 [19,20].

Таблица 1.2 – Допустимая погрешность (точность) измерения вертикальных и горизонтальных перемещений

Расчетная величина вертикальных и горизонтальных перемещений, предусмотренная проектом	Допустимая погрешность измерения перемещений (мм) для периода			
	эксплуатационного		строительного	
	Грунты			
	глинистые	песчаные	глинистые	песчаные
- 50	1	1	1	1
+ 50 - 100	1	2	1	1
+ 100 - 250	2	5	2	1
+ 250 - 500	5	10	5	2
+ 500	10	15	10	5

Вертикальные движения фундаментов зданий и сооружений могут быть измерены отдельными геодезическими методами или их комбинациями (см. рисунок 1.7).

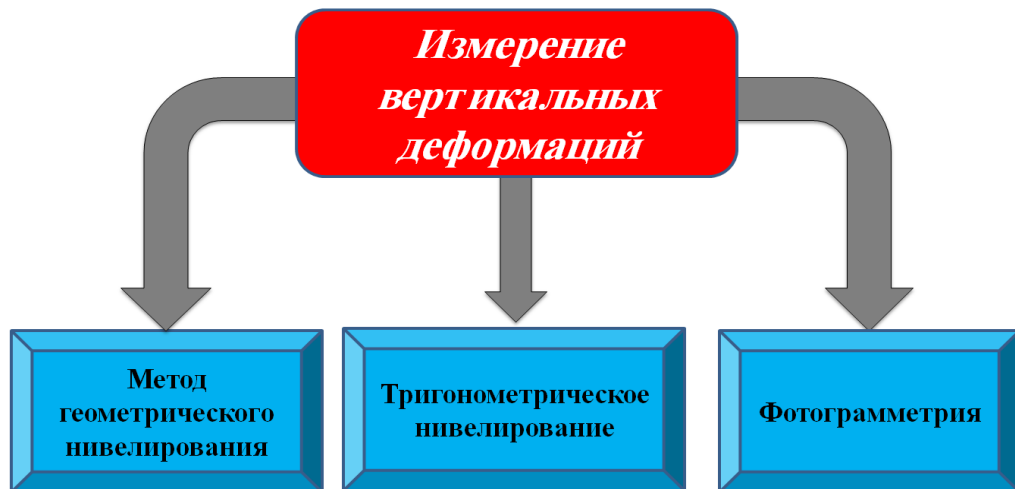


Рисунок 1.7 – Схематизация методов измерений вертикальных смещений

Нивелирование – это метод измерений для определения разницы (превышений Δh) отметок между точками местности [40]. Геометрическое нивелирование выполняется с использованием специальных геодезических приборов с уровнем (нивелир), которые обеспечивают горизонтальное положение линии визирования в процессе измерения. Тахеометры и теодолиты могут использоваться для нивелирования, но с ограниченной точностью. Способ измерения геометрического нивелирования показан на (см.рисунок 1.8) [40].

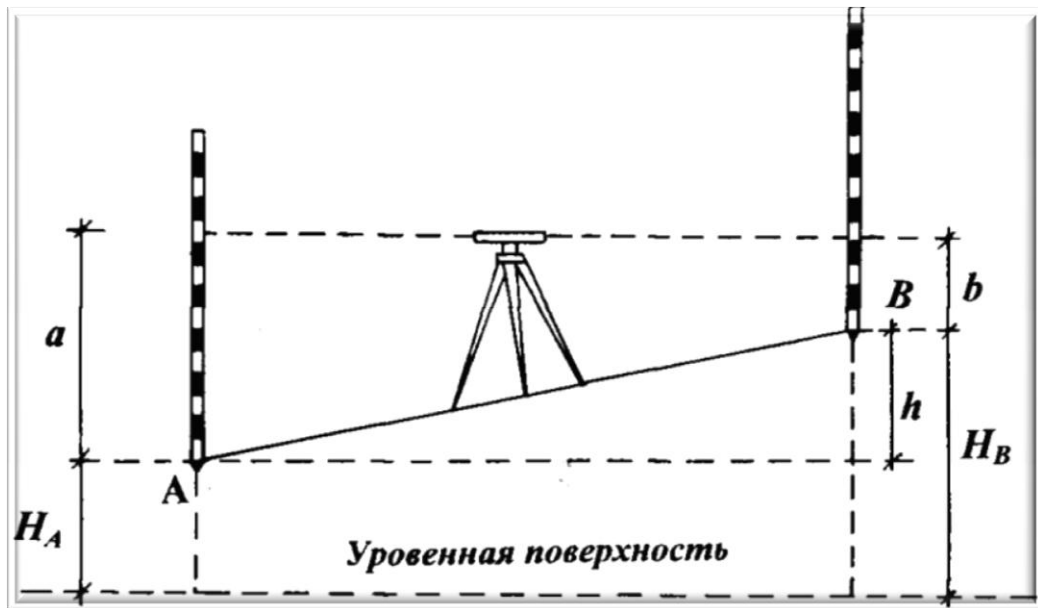


Рисунок 1.8 – Схема геометрического нивелирования из середины

Превышение между точками А и В определяем из выражения: (а и b – отсчеты по рейке).

$$h = a - b$$

Отметка точки В (H_B) равна согласно уравнению (1.2):

$$H_B = H_A + h \quad (1.2)$$

Тригонометрическое нивелирование выполняется путем измерения угла наклона линии визирования к горизонту (α) и горизонтального расстояния между точками (D). Превышение между точками (h) определяется по формулам (1.3):

$$\begin{aligned} h &= D \cdot \operatorname{tg} \alpha \\ H_P &= H_{B.M} + S - h' \\ H_Q &= H_{B.M} + h + S - f \end{aligned} \quad (1.3)$$

где f – поправка на кривизну Земли и преломление.

Тригонометрическое нивелирование обычно используется при определении вертикальных смещений сооружений на наклонных основаниях (см. рисунок 1.9) [40].

Описание и анализ различных методов выполняются, чтобы лучше ориентироваться при определении и выборе метода наблюдений, в особенности для горизонтальных деформаций.

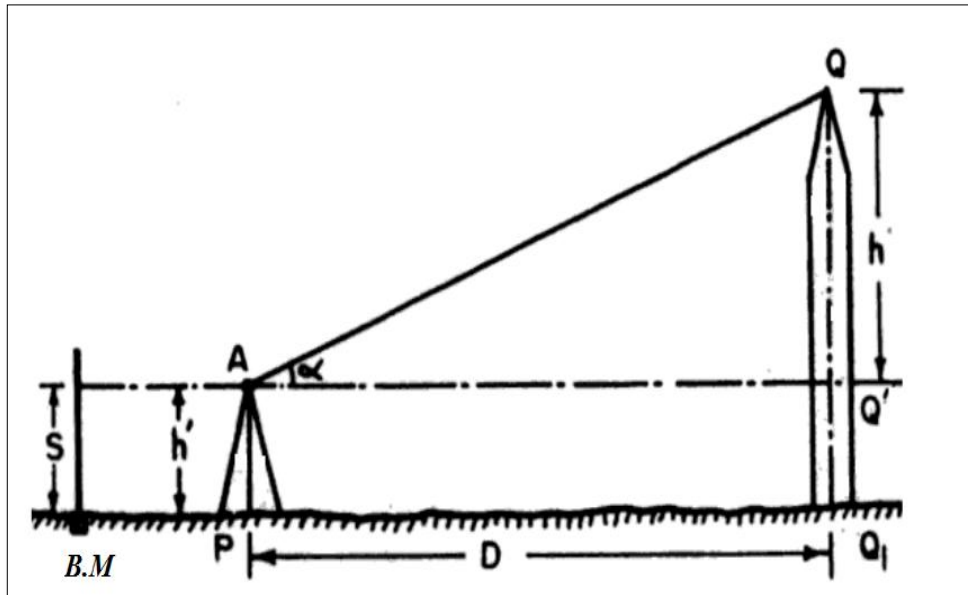


Рисунок 1.9 – Схема тригонометрического нивелирования

А) Фотограмметрический метод

Для измерений сдвигов, кренов и других деформаций зданий и сооружений при необходимости наблюдения большого количества деформационных марок, а также сложной конфигурации объекта используют фотограмметрические или стереофотограмметрические методы.

Фотограмметрический метод позволяет измерять деформации в одной плоскости вдоль двух координатных осей (X и Z), а стереофотограмметрический метод позволяет определять координаты вдоль трех координатных осей (X , Y и Z). Для измерения деформаций стереофотограмметрическим методом необходимо сфотографировать объект с помощью фототеодолита с двух фиксированных опорных пунктов, которые расположены на концах фотографической основы. Расположение и ориентация фототеодолита должны быть постоянными в последующих циклах наблюдения. Для выполнения фотограмметрической съемки достаточно использовать измерения с одной точки.

Существует несколько методов съемки фототеодолитом, используемых для определения различных деформаций: нормальный, одинаково расходящийся и сходящийся. Наиболее распространенным является нормальный. Если необходимо выполнить обследование для определения деформаций зданий и сооружений большой длины, то рекомендуется использовать одинаково

отклоненный метод съемки. Для определения общего уклона высоких зданий и сооружений целесообразно использовать сходящиеся направления съемки.

А.1) Обобщенный анализ ряда исследований: Многочисленные исследовательские работы были выполнены по измерению смещений крупномасштабных структур с использованием эталонных фотограмметрических методов. Примеры показаны на рисунках 9, 10 и 11.

В 2013 году Эсмаейли и др. [109] использовали фотограмметрию для измерения смещенных стен. Они показали, что, используя предложенную комбинированную фотограмметрическую регулировку смещения (CPDA), можно достичь точности измерения смещения 8 мм при условии, что на структуре были установлены фотограмметрические мишени [109].



Рисунок 1.10 – Вид камеры, установленной на БЛН Фантом 3



Рисунок 1.11 – Образцы наблюдений, снятые с использованием Phantom 3 Pro для мониторинга перемещений стен (Сеул)

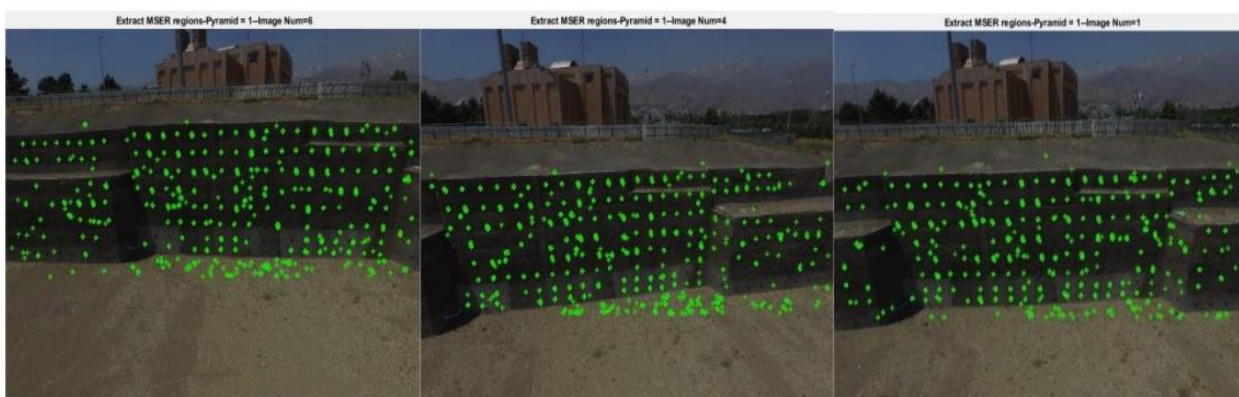


Рисунок 1.12 – Результаты съемки

В 2015 году Li et al. измеряли ненасыщенные влагой деформации почвы при трехосном нагружении с использованием метода фотограмметрии [124].

В исследовании, опубликованном в 2010 году, Xiao et al. провели измерение с помощью фотограмметрического метода смещений башни при различных нагрузках. В этом исследовании использован оригинальный простой метод определения координат точек, основанный на поиске ближайшей соседней стабильной точки [160].

В 2010 году Jiang et al. исследовали деформации вдоль стального транспортного моста под воздействием нагрузки с помощью фотограмметрии. Они предложили метод уточненного граничного расстояния (RDC) для управления фотограмметрической сетью и использовали для этой цели двусторонние цели [120, 121]. Scaioni et al. (2016) измеряли изменения поверхности в уменьшенной модели оползня с использованием высокоскоростных последовательностей стереоизображений [111].

В 2010 году Озбек и соавторы использовали систему мгновенной фотограмметрии для измерения частоты вибрации вращающейся лопасти ветротурбины [137]. Scaioni et al. (2010) представили разработку и результаты быстрого метода измерения перемещений на основе цифровых изображений, который позволил провести анализ деформации вдоль поперечных сечений туннеля с помощью метрологии зрения [96, 147].

В 2005 году Fraser et al. провели измерения поверхности радиотелескопа Хобарта по причине изменения угла антенны. Внедряя концепцию

гиперрезервации, им удалось достичь достаточную точность в своих измерениях [112].

Позже в 2014 году Cerminaro использовал фотограмметрию ближнего радиуса действия, чтобы улучшить проактивную оценку подпорных стен вдоль транспортных коридоров. Они использовали непрерывное измерение поверхности и сопоставление соответствия поверхности для измерения смещения [102].

В исследованиях Luo et al. (2017) изучено влияние давления на большие надувные конструкции с помощью ближней фотограмметрии. Комбинируя цифровую фотограмметрию с триангуляцией Делоне, они могли измерять смещения, вызванные давлением, на нерегулярных негладких поверхностях [152].

В другой работе Цветков и соавт. (2017) использовали фотограмметрию ближнего радиуса для мониторинга деформации несущего железобетона [156]. Для этой цели они использовали IP-камеры с сервером, на который захваченные изображения передавались по беспроводной сети.

А.2) Ограничение фотограмметрического метода (ФГМ): этот метод, как и многие другие, нуждается в последующей обработке; время обработки существенный фактор в мониторинге. Оценка, прогнозирование и наглядность представления любого небольшого смещении суть геодезических измерений. Поэтому результаты должны быть получены в реальном времени, другими словами, идеально во время измерений. Другая причина, которая уменьшает предпочтение использования *ФГМ* заключается в ограничении его применения в ночное время. В некоторых случаях возможно поменять камеру, что может привести к новой систематической ошибке. Кроме того, коэффициент отражения света на марках может повлиять на изображение и конечные результаты.

Представленные результаты измерений позволяют достичь требуемой точности для оценки деформации (менее 50 мм, см. Таблица 1.2.). Вместе с тем затраты временные на обработку измерений не позволяют эффективно использовать этот метод для оценки деформаций в режиме постоянного контроля.

Б) GPS / ГНСС

Технология измерений с использованием глобальных навигационных

спутниковых систем (ГНСС) имеет преимущества высокой точности и одновременного трехмерного позиционирования. Тем не менее, существуют препятствия для вертикального позиционирования [3, 5, 47, 73, 100, 118, 142], в связи с особенностями перерасчета нормальных высот и атмосферных ошибок [97, 163].

Эрол и Аян, 2003, посоветовали использовать оборудование для принудительного центрирования для устранения некоторых ошибок ГНСС-технологии. При этом производить измерения быстрым статическим методом при коротких базовых линиях и использовать специальное оборудование для точных измерений высоты приемника. Следовательно, когда требуется точность на уровне миллиметра, требуются существенное проработка методики измерений и использование дополнительного оборудования. Однако даже этих специальных мер может быть недостаточно для достижения необходимого уровня точности, в особенности для повышения точности по компоненте Z. Одновременное сочетание точного нивелирования с горизонтальными измерениями по ГНСС-технологии увеличивает возможности системы и позволяет достичь требуемой точности в некоторых случаях при идеальных условиях [104, 108].

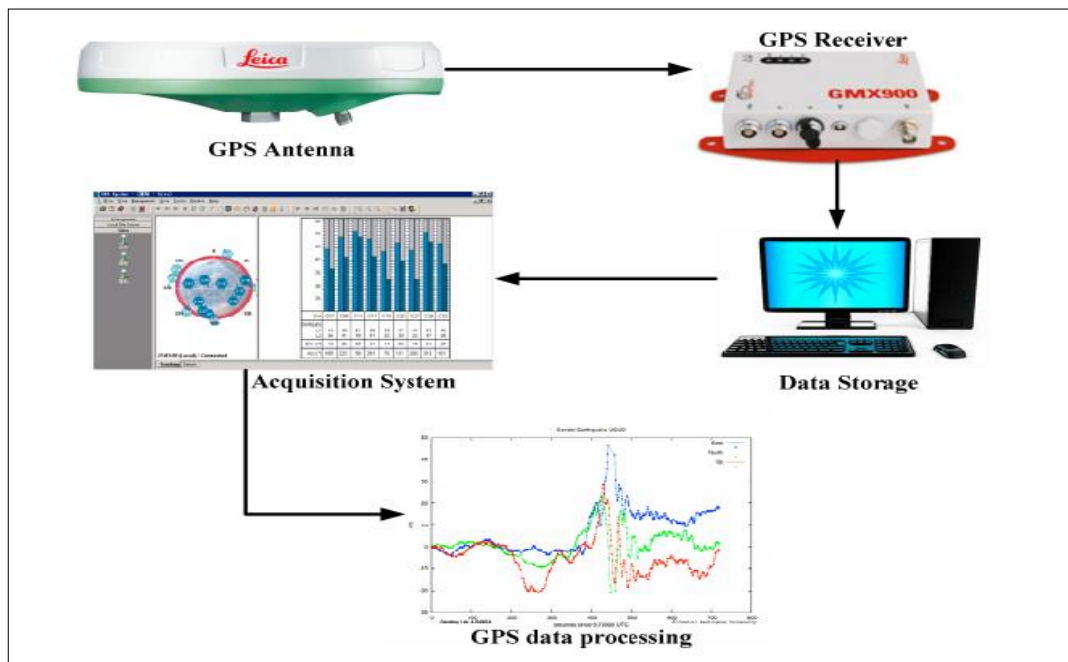


Рисунок 1.13 – Принципиальная схема системы мониторинга с использованием ГНСС-технологии [97]

Б.1) Результаты исследований измерений по ГНСС-технологии:

Точность измерений DGPS изучалась и оценивалась рядом исследователей (например, [104, 113, 134]). Чан и др. [104] исследовали точность DGPS (система повышения точности сигналов GPS). При этом использовали дроссельные кольцевые антенны Leica GX1230 и AT504 с частотой 20 Гц. Объектом наблюдений служили специальные пластины имеющие возможность перемещаться в трех направлениях, соединенный с компьютерной системой (см. рисунок 1.13). Были протестированы различные случаи движения, и их результаты показали, что процент точности измерения DGPS достиг 19,2% и 28,78% (от паспортной) при сильном движении пластины в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Кроме того, пластина испытывала реальные ветровые нагрузки. Точность измерений составила 3,8 и 7,62 мм соответственно [104].

Ge et al. [113] протестировал DGPS для имитационных измерений для реальных сейсмических наблюдений в Японии. Результаты для используемой системы (Trimble MS750 GPS, 20 Гц) сравнивались с измерениями акселерометра с велосипедным счетчиком. Было обнаружено, что система DGPS хорошо определяет координаты с учетом изменений ускорения и скорости.

Мошас и Стирос [134] изучили точность деформаций небольших мостов для системы мониторинга GPS 100 Гц и обнаружили, что точность измерений смещения мостов составляет 1–2 мм и 4–6 мм для горизонтального и вертикального направлений соответственно.

Yi et al. [163] (GPS с 50 и 100 Гц), Moschas и Stiros [133, 134] использовали GPS с частотой 100 Гц, Casciati и Fuggini [101] - GPS с частотой 20 Гц, и Kaloop and Hu [122] - GPS с частотой 20 Гц для оценки реальных различных поверхностей. В результате этих исследований сделан вывод, что ошибка положения перемещенных точек конструкций может достигать 15 мм по горизонтали и 25 мм по вертикали.

Б.2) Ограничение метода: использование системы повышения точности сигналов GPS для достижения высокой точности результатов требует многих

условий, которые во многих случаях трудно гарантировать, таких как:

1. Открытое небо с хорошим распределением спутников.
2. Отсутствие эффекта многопутности (помехи, здания с большими стеклянными окнами и т. д.).
3. Отсутствие или исключение тропосферной задержки сигнала.
4. Хороший GDOP.
5. Приемники должны быть закреплены и откалиброваны на квазигоризонтальной поверхности.

Упомянутые условия несколько ограничивают применение ГНСС-технологии для мониторинга, например, вертикальных поверхностей. ГНСС нельзя использовать в проектах вблизи высоких башен и зданий, а также в глубоких узких выемках (ширина < 50 м) из-за многопутности и малой вероятности захвата достаточного количества с хорошей конфигурацией спутников [126]. Кроме того, приемник не может использоваться непрерывно из-за изменений в значениях GDOP, HDOP и VDOP. Поэтому использование ГНСС технологии в мониторинге деформаций является предпочтительным в крупномасштабных проектах вдали от источников помех, а не в условиях плотной городской застройки.

В) Наземное лазерное сканирование (НЛС) для мониторинга деформации

Последние годы показали бурный рост разработки новых приборов и оборудования. Технология *НЛС* - прекрасный пример как современная техника (сканеры) буквально ворвались в область геодезических измерений. В настоящее время их точность соразмерна с традиционными методиками измерений. Более того, при построении моделей, что требуется в обмерных работах или, например, при мониторинге объектов культурного наследия эта многоточечная технология явно имеет приоритет [7, 12, 30, 129, 150, 157].

Расстояние до каждой точки в пределах диапазона измерений сканера измеряется путем вычисления времени прохождения луча лазера, следовательно, поверхность отражения напрямую влияют на сигнал, полученный сканером.

Таким образом, в настоящее время проводятся испытания и исследования воздействия материалов, особенно тех, которые наиболее отличаются своей текстурой, например, бетон и дерево. В связи с этим интересна работа, проделанная Лихти и Харви (D. Lichti, B. Harvey) [125], которые использовали различные материалы и сканировали их на ближнем (3 м) и среднем расстоянии (53 м). Используя различные материалы, способность сканеров также была проверена в университете Ноттингема [107].

Потенциал лазерных сканеров собирать миллионы точек за относительно короткий промежуток времени увеличивает конкуренцию между этой современной техникой и традиционной. Авторы [107] заявили, что до настоящего времени мониторинг деформации проводился с использованием традиционных методов съемки и фотограмметрии, и добавили, что точность этих методов, как правило, очень хорошая. Но они также указали на недостаток *НЛС*. Это время для настройки и проведения съемки, а также большой объем данных по сравнению с данными точечных наблюдений. В то же время авторы утверждают, что очень вероятна ситуация при мониторинге деформаций, например, при оценке наличия трещин, где традиционные точечные методы могут «пропустить» их в отличие от лазерного сканирования.

Полный охват объекта без необходимости маркировки или установки конкретных целей на нем, дает возможность связывать точки лазерных отражений (ТЛО) в общей системе координат с построением объекта в виде облака точек и далее трехмерной модели. После того, как начальная модель построена, будущие испытания могут быть выполнены таким же образом, определены в той же системе координат и сравнены с первоначальными испытаниями. Поэтому изменение объекта может быть оценено. Тем не менее, остается выяснить какова точность определений координат. В Ноттингемском университете проводятся испытания, чтобы определить, возможна ли такая техника съемки для мониторинга деформации.

В.1) Результаты исследований: В последние годы было представлено несколько тематических исследований с использованием технологии *НЛС* для

мониторинга деформации [7, 12, 30, 129, 150, 157]. Объектами исследования являются плотины, туннели, мосты, башни и другие здания в целом.

Schulz T и Ingensand H [150] провели ряд тестов с использованием калибровочного устройства, сосредоточив внимание на точности измерения расстояний. Лихти и др. [125] также использовали базовую линию в качестве эталона для оценки деформаций плотины, используя при этом известные координаты точек, определенные по ГНСС технологии.

Янинидис С. и др. [119] провели лазерное сканирование при раскопках во время строительных работ (археологические работы в Афинах), и сравнили данные с результатами с аналогичными, полученными по фотограмметрическому методу. Интересна работа Mills J и Barber D [132], в которой было выполнено сравнение результатов лазерного сканирования, тахеометрической съемки и фотограмметрии. Объект измерений - фасад башни Гастингса в замке Эшби. Было показано, что метод лазерного сканирования необходимо совершенствовать и пока использовать традиционные методы. Также были определены проблемы, возникающие при лазерном сканировании, которые состоят в тщательном выборе (расчете) позиции сканера относительно объекта съемки, что позволит уменьшить ошибки измерений. В настоящее время в мониторинге деформации рекомендуется использовать традиционные методы съемки, такие как фотограмметрия и тахеометры.

В работе [115] Гордон и др. (Университет Кертина) использовали сканер Leica HDS2500 для съемки нагруженных балок. Cridland, [107] совместно с Greenhatch Ltd., также провели мониторинг деформаций бетонных балок.

Альба и соавторы [95] представили результаты, которые свидетельствуют о возможности мониторинга деформаций крупных бетонных плотин методом наземного лазерного сканирования. В этом исследовании был сделан вывод о том, что стабильность системы отсчета имеет большое значение для отделения смещений «шумов», вызванных ошибками в процессе геопривязки.

В работе [114], Gonzales-Aguilera et al., для параметризации поверхности плотины была использована функция радиального базиса. При этом контроль

точности геопривязки был выполнен с помощью повторных измерений. Ван Гослига и соавторы [157] описали, как наведенные деформации цилиндрической стенки туннеля были обнаружены с использованием статистической процедуры настройки и тестирования (метод Делфта). В этой статье отсканированная поверхность была аппроксимирована цилиндрической моделью, а точечный анализ деформации был выполнен путем сравнения теоретической поверхности со смоделированной по данным измерений.

Сканирование моста выполнено Lovas, T et al. [129]. Результаты сканирования сравнивались с высокоточными физическими измерениями деформаций индуктивными преобразователями, установленными на конструкциях моста. Авторы приходят к выводу, что НЛС рекомендуется в качестве дополнительного метода при испытаниях объектов под нагрузкой и измерениях смещений и не может полностью заменить традиционные точечные методы.

В.2) Ограничение метода. Метод НЛС позволяет пользователю собирать данные с большим охватом для всей исследуемой области, но огромное количество точек нуждается в последующей обработке для получения деформационного смещения. Обработка требует значительного времени. Кроме того, эффективность этого метода все еще изучается и в отношении точности определений при съемке поверхностей с разной отражательной способностью, а также есть вопрос как сравнивать облака точек. Примеры таких исследований есть [12], однако для оценки деформаций вопрос остается открытым.

Таким образом, метод лазерного сканирования может быть полезен для мониторинга деформаций пока как дополнительное средство. Весьма эффективно его применение для построения различных моделей, в том числе для конечно-элементного анализа и обмерных работ (см. рисунок 1.14).

Упомянутые выше методы нельзя считать неподходящими для мониторинга деформаций, но, как показывает анализ каждый метод возможно использовать как дополнительный, позволяющий дать больше информации.

В анализе не уделено большого внимания мощному методу из области

ГНСС технологий – это радарная интерферометрия. Метод очень эффективный, однако требует специального программного обеспечения, достаточного набора космоснимков и по данным ряда исследователей довольно проблематично получение точности миллиметрового диапазона [45, 49, 52]. Опять же есть возможность комбинации методов, например ГНСС технология и лазерные трекеры. Это сочетание весьма перспективно, но также требует специальных исследований.

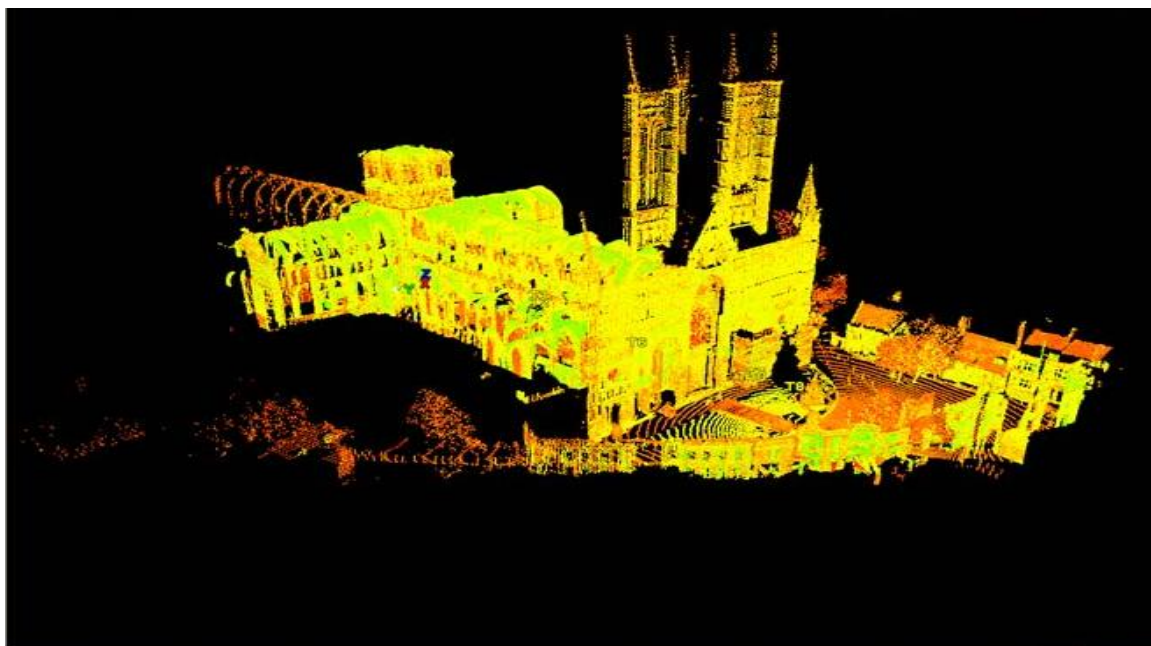


Рисунок 1.14 – 3D-модель, созданная из миллионов облаков точек для архивации и мониторинга деформации замка [119]

1.6 Использование автоматизированной тахеометрической станции (АТС) для измерения горизонтальных и вертикальных смещений

Ряд исследователей [94, 95, 98, 105], в том числе такие, как Palazzo и Friedmann [138], сообщили об использовании при мониторинге деформаций электронных роботизированных тахеометров для мониторинга деформаций конструкций с хорошими результатами. Hill and Sippel (2002) [118]; Кульман и Глейзер (2002) [131]; Захариадис и Цакири (2006) [164]. Палаццо и др. (2006) также описали непрерывный мониторинг как важную достижение при измерениях на карьере для обеспечения прогнозирования устойчивости борта. Использование тахеометров для контроля устойчивости бортов карьеров широко используется

[123, 145, 146, 151].

Применение роботизированного тахеометра (АТС) для геодезического мониторинга становится обычной практикой и определяет тенденцию измерений для в строительстве и изысканиях. Автоматизация обеспечивает непрерывный 24-часовой дистанционный сбор данных для анализа и предупреждения аварийной ситуации и оповещения персонала в отношении проблемы устойчивости сооружения. Главное при этом максимальное исключение так называемого человеческого фактора. Кроме того, одним из важным моментов при мониторинге является определение порядка наблюдений или интервала между циклами наблюдений. При использовании роботизированной АТС этот вопрос снимается.

Вместе с тем многие ученые и инженеры сходятся во мнении, что для непрерывного мониторинга требуются более совершенные системы, чтобы справляться с объемом записанных данных [143, 144, 159, 162]. Использование АТС стало популярным благодаря своей гибкости, высокой скорости, высокой эффективности и точности. Говоря о гибкости, в данном случае это означает способность инструмента находить призму, снимать показания и сохранять данные. Интервалы измерения могут быть установлены в соответствии с требованиями программы мониторинга, а интервалы измерения зон высокого риска могут быть установлены в соответствии с приоритетом, обеспечивая более частый мониторинг таких зон. Мониторинговые съемки используют два источника данных, а именно данные, которые измеряются АТС (например, расстояния и углы), и данные, которые являются внешними по отношению к тахеометру (например, метеорологический данные). Данные, которые являются внешними по отношению к тахеометру, являются дополнительными (то есть измерения атмосферного давления, температуры окружающей среды для вычисления соответствующих поправок) [4]. Ниже приведен обзор традиционной процедуры мониторинга с использованием тахеометра (не роботизированного) с выделением недостатков технологии.

Процедура предусматривает следующие действия:

- а. Начало: приведение прибора в рабочее состояние (возможно центрирование).
 - б. Фиксация времени съемки.
 - в. Определение оптимального места тахеометра откуда видны исходные пункты и деформационные марки.
 - г. Установка отражающих марок, либо отражающих призм (редко).
 - д. Возможные изменения положения TS (свободное стационарирование).
- При этом геодезист должен еще раз провести измерения для того, чтобы убедиться, что точность работы соответствует допустимой точности. (см. рисунок 1.15).

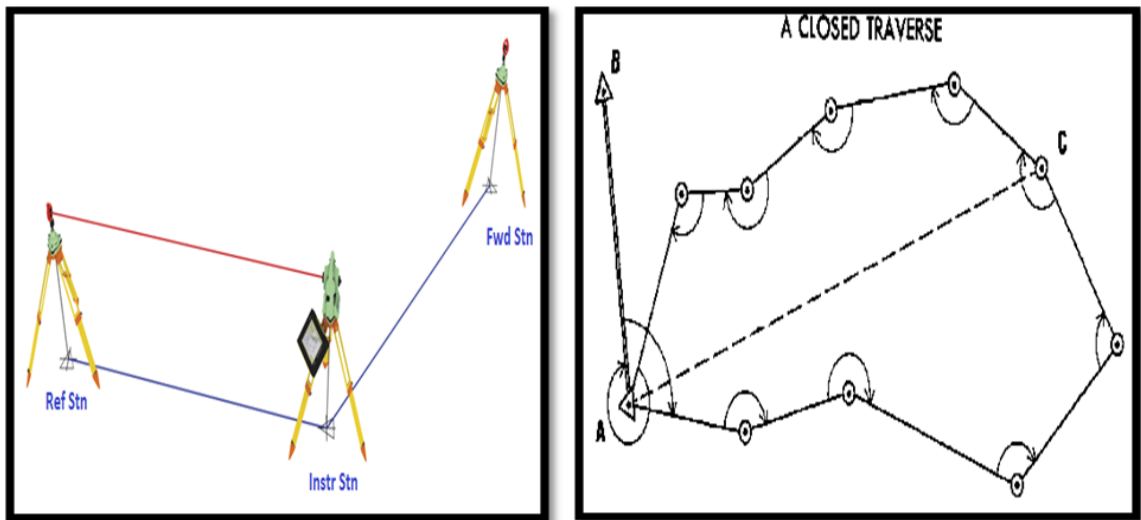


Рисунок 1.15 – Схематизация методики измерений при мониторинге деформаций с использованием электронного тахеометра

Недостатки:

- а. Много установок и измерений с разных точек означает больше ошибок.
- б. Деформационные марки постоянно измеряются под разными углами и расстояниями, что также приводит к дополнительным ошибкам.
- в. При выполнении измерений тахеометр должен находиться вдали от возможных помех. На практике это соблюсти очень сложно – идут работы постоянно.
- г. Время, которое необходимо затратить может оказаться слишком продолжительным, ввиду повторения измерений.

При выборе места съемки обычно используют предрасчет по формуле обратной засечки. Однако с учетом разных условий (разные расстояния и углы) и разные условия видимости приводят к разной СКП измерений.

Таким образом, для мониторинга деформаций весьма целесообразно применение АТС [82]. Вместе с тем такой подход для мониторинга деформаций требует решения некоторых задач, которые обоснованы в выводах.

1.7 Выводы по первой главе

Строительство зданий и сооружений – одно из самых важных и сложных научно-практических областей инженерной деятельности, в ходе которой приходится решать достаточно сложные задачи, но главное следует достичь безопасности как непосредственно строительства, так дальнейшей эксплуатации строящегося объекта. В этой связи в ходе проектирования необходимо предвидеть какие опасности и риски ожидаются и минимизировать их. На это направлены нормативные положения, в которых предписано для ряда условий и объектов выполнение геодезического мониторинга для обеспечения проектных параметров строящегося сооружения. Вместе с тем в нормативах регламентируются точностные параметры, обеспечение которых для ряда условий строительства требуют проведения специальных исследований.

На основании анализа стандартов и нормативных документов показано, что в вопросе применения роботизированных тахеометров нет четкой методики проведения геодезических измерений для контроля деформаций и достижения требуемой точности. В нормативных документах опорные точки должны быть размещены в зоне, считающемся стабильным, однако отсутствует информация о геометрии сети, оптимизации места расположения наблюдательных станций. Кроме того, представленная проверка стабильности опорных точек в этих стандартах, книгах и статьях состоит либо из сложных математических расчетов, либо путем выполнения обратной засечки с моделированием опорных точек, а затем путем сравнения СКП и при анализе различных симуляциях можно обнаружить как наиболее устойчивую точку, так и смещенную. Этот метод

зависит от алгоритма, встроенного в тахеометр, без какого-либо представления метода обработки данных. Также деформационные марки рекомендуется размещать на строящейся территории, их количество и правила распределения отсутствуют.

Основными методами измерения горизонтальных смещений являются линейно-угловые измерения и метод измерения деформационных марок [23, 27, 88, 116, 117]. Ограничение исследуемых методов (фотограмметрия, ГНСС и лазерное сканирование) позволяет сделать вывод, что использование тахеометра по-прежнему актуально для контроля деформации. Поскольку повышение точности и автоматизация процесса мониторинга также является актуальной темой, тогда исследуется использование автоматических тахеометров. Следует отметить, что в этом исследовании будет уделяться больше внимания горизонтальной деформации.

Следовательно, при разработке метода геодезических наблюдений за деформациями необходимо решать различные задачи с целью оптимизации геодезической и деформационной сети. Здесь необходимо привлечение геомеханических методик изучения деформационного процесса. Кроме того, в силу стационарности АТС большое внимание следует уделить месту расположения станции на основе модельных расчетов. Важным моментом является прогнозирование деформационного процесса. Это связано с определением на каждом цикле наблюдений вида деформации. В результате такого подхода, пути которого представлены в следующих главах диссертации возможно получение надежных результатов, позволяющих правильно анализировать, интерпретировать и прогнозировать процесс деформации.

Таким образом тема диссертации представляется актуальной, но для достижения ее цели – повышение точности оценки процесса деформаций инженерных сооружений за счет разработки методики перманентных наблюдений электронным тахеометром, необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка методики проектирования геодезической сети для проведения перманентных наблюдений за деформациями сооружений на примере грунтовой выемки.
2. Разработка методики наблюдений за деформациями грунтовой выемки на основе предварительных расчетов деформационного процесса.
3. Разработка методики геодезического мониторинга и ее проверка в натуре при строительстве инженерных сооружений станций метро.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПЕРМАНЕНТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГРУНТОВОЙ ВЫЕМКИ

Проведению геодезических наблюдений за деформациями зданий и сооружений в силу ответственности мероприятия должна предшествовать тщательная проработка всех стадий наблюдений. При проведении геодезического мониторинга с применением автоматизированной тахеометрической станции (АТС) роль качественного предрасчета существенно возрастает.

Как было отмечено в первой главе, повышение качества геодезического мониторинга возможно за счет привлечения современных технологий, но и в тоже время более глубокого использования знаний геомеханики. Горные геодезисты – маркшейдеры уже давно идут по этому пути.

Целью геодезического наблюдения или мониторинга является выявление степени соответствия геометрических параметров рассматриваемого объекта проектным данным, а также прогнозирование его поведения. В этой связи планирование наблюдений и интерпретация результатов наблюдений будет более качественной с привлечением геомеханического аппарата.

Здания и сооружения, в особенности такие как котлованы, отвалы, траншеи, туннели, а также здания на просадочных грунтах – лучшие примеры для совместного решения проблем инженеров-геомехаников и геодезистов.

2.1 Расчет точности положения места расположения станций наблюдений

Стабильность станции наблюдения является важным параметром в любом проекте мониторинга, потому что любое смещение измерительного устройства приводит к смещению результатов и, соответственно, к неправильной оценке положения контролируемого объекта.

Использование роботизированного тахеометра (АТС) для выполнения мониторинга геометрических параметров котлована для вестибюля подземного метро должно предусматривать при выборе места положения АТС следующие

факторы:

1. Стабильность места установки.
2. Хорошая видимость между тахеометром, опорными точками и деформационными марками.
3. Легкий и безопасный доступ к тахеометру.

Следовательно, при размещении АТС должны быть проверены требования, связанные с геометрией сети, методом ориентации и математическими моделями, используемыми для расчета координат и оценки точности [32-35].

2.1.1 Способы ориентации для начальной настройки

Мониторинг деформации – это другими словами «наука о миллиметрах», каждый миллиметр ценен и может указывать на будущее обрушение, эрозию или движение массы. Устранение любой вероятной ошибки приведет к увеличению и повышению точности результата. Таким образом, исходная точность настройки АТС является основным фактором при определении деформации и отражении точной информации об устойчивости конструкции. Ориентацию тахеометра обычно можно выполнить с помощью функции тахеометра «Станция – задняя точка» (угловая ориентация) или обратной засечки (свободная станция). Разница между двумя методами будет подробно описана в следующих частях. Кроме того, посредством сравнительного анализа будет определен оптимальный метод, который будет применяться для контроля смещений и деформаций.

1. Метод «Станция – задняя точка»: этот метод заключается в закреплении тахеометра над известной опорной точкой и съемке с другой известной опорной точки (задняя точка, угловая ориентация, см. рисунок 2.1 [143]). Точность такого метода зависит от точности опорных точек, центрирования и настройки станции наблюдения и призмы.

2. Метод «обратной засечки»: этот метод заключается в закреплении тахеометра в любом месте, например, в пункте Р с неизвестными координатами и съемка минимум 3 известных опорных точек для вычисления координат точки Р

(см. рисунок 2.2). Точность такого метода основана на точности опорных точек и геометрическом распределении точек.



Рисунок 2.1 – Схема процедуры «Станция-задняя точка» [145]

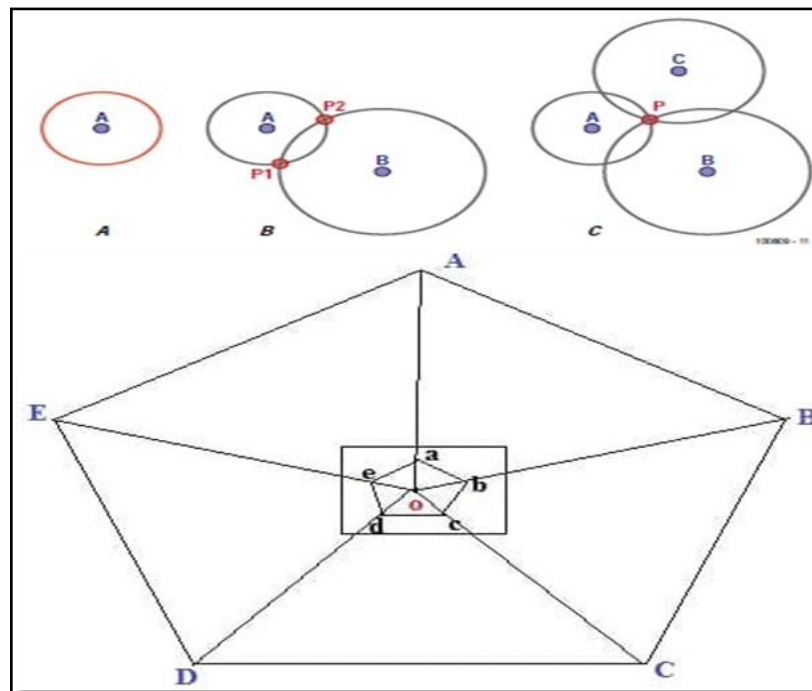


Рисунок 2.2 – Схема процедуры «Обратная засечка», где a , b , c , d и e – ошибки распространения вдоль каждой стороны обратной засечки

На станциях метро глубокого заложения и карьерах, где ведутся земляные работы, обязательно нужно иметь постоянные показания для предупреждения рабочих о необходимости покинуть участок или для прогнозирования, смягчения

и предотвращения любых серьезных последствий, поэтому станция наблюдения должна быть в зоне, позволяющей измерить все расчетные деформационные марки внутри котлована. Соответственно, *первый* метод нельзя использовать по следующим причинам:

а. Опорная (исходная) точка, на которой установлена АТС, будет подвержена деформации.

б. Задняя точка (вторая опорная точка) также будет находиться внутри строительной и эксплуатационной площадки и тоже может сместиться. Она также может быть не видна из-за постоянных перемещений крупногабаритных механизмов на строительной площадке.

в. Если одна из двух опорных точек будет случайно повреждена, необходимо будет создать новую точку, и вероятность новой ошибки увеличится, что приведет к различным результатам мониторинга.

Хотя АТС во втором методе также находится внутри области проекта, но она не зависит от каких-либо нарушений опорных точек. Уточним, по каким причинам:

а. Место установки АТС не имеет фиксированных координат, ее координаты вычисляются для каждого цикла мониторинга из одних и тех же распределенных опорных точек. Следует учесть, что опорные точки (а точнее квазиопорные) фиксируются и распределяются по зданиям или сооружениям вдали от строящейся территории, и их устойчивость проверяется отдельно.

б. Мониторинг можно выполнять непрерывно, даже если строительная площадка интенсивно загружена механизмами. Опорные точки закреплены на достаточной высоте (наверху зданий), чтобы их было видно в любое время.

в. В отличие от первого метода ориентация АТС может выполняться по многим направлениям.

г. Современные электронные тахеометры имеют возможность выполнять «ориентацию с обратной засечкой» на основе более чем 3 точек с использованием метода наименьших квадратов, который повышает точность,

снижает вероятность грубой ошибки и обнаруживает распределение ошибок по каждому измеренному вектору в соответствии с углом и измерением расстояний.

Анализ характеристик двух методов и учет требований к мониторингу деформации способствует выбору метода «обратной засечки» в качестве метода ориентации и выполнения измерений. Однако для повышения точности и предотвращения деформации сети рекомендуется закрепление наблюдательной станции на бетонной опоре. Применение этой рекомендации позволяет проверять сеть при каждом цикле мониторинга. Координаты станции наблюдения сверяются с начальными координатами, рассчитанными на эпоху «0». При устойчивости сети расстояния до опорных точек и углов и если координаты станции наблюдения одинаковые на каждом цикле, можно избежать дополнительной проверки на деформирование сети.

При создании стационарной АТС могут быть использованы различные конструкции столов под тахеометр. При этом важен учет типа основания (необходимы характеристики грунта). На рисунке 2.3 приведен пример конструкции АТС.



Рисунок 2.3 – Виды закрепления АТС

(слева на земной поверхности [130], справа – на стальной конструкции [99])

2.1.2 Анализ различной конфигурации геодезической сети

Геодезическая сеть в особенности для геодезического мониторинга

деформаций может быть создана разными методами. При построении деформационной сети необходимо учитывать весь комплекс работ по ее проектированию, разведке, привязке геодезических точек, проведению измерений и окончательной математической обработке результатов измерений. Повторим, что для стационарных АТС следует относиться еще более внимательно.

Прежде всего следует рассмотреть вопрос о влиянии линейно-угловых параметров системы «АТС – исходные пункты» на точность положения АТС. Этот вопрос требует проведения предрасчетов или моделирования с использованием компьютерных технологий [6].

Анализ оценки точности АТС проводился двумя разными методами: по традиционному методу (обратная угловая засечка) [11, 27, 48, 85] и по разработанному алгоритму, включающему математическое моделирование методом наименьших квадратов (обратная линейно-угловая засечка).

Традиционный метод основан на наблюдении углов между исходными точками. Для реализации этого метода требуется 3 исходных точки, данный метод основан на паспортной угловой точности тахеометра. Кроме того, расчет координат неизвестной (свободной) станции связан с геометрией и распределением известных точек вокруг АТС.

В предлагаемом альтернативном алгоритме точность координат искомой точки зависит как от угловой, так и от линейной точности тахеометра. Кроме того, ее координаты могут быть вычислены с использованием от 2 до n (n может быть более 10) опорных точек [17]. Соответственно, количество избыточных измерений увеличивается, как и конечная точность [33, 34, 110, 116]. При геодезическом мониторинге деформаций зданий и сооружений избыточные измерения весьма важны.

Упрощенный метод (Традиционный):

Этот метод разделен на 2 части (а и б), расчет выполняется на основе разных линейно-угловых параметров распределения квазиопорных точек.

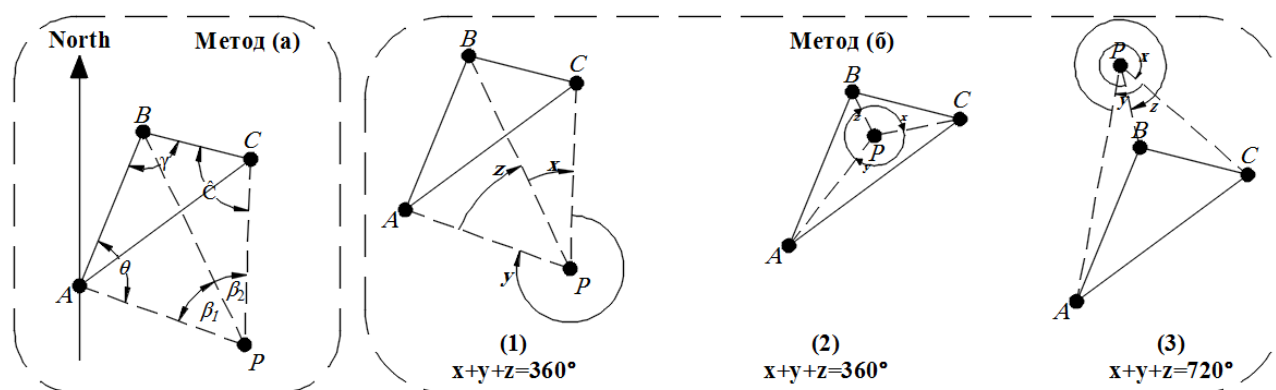


Рисунок 2.4 – Схемы реализации упрощенного метода на основе решения обратной угловой засечки

(а – измерены внутренние углы, б – измерены все углы на АТС)

Метод (а):

A , B и C – это 3 опорные (исходные) точки с известными координатами, по которым можно рассчитать расстояния AB и BC (см. рисунок 2.4). Угол γ также можно вычислить, дифференцируя азимуты AB и BC . Углы β_1 и β_2 точно измеряются путем точных наблюдений за тремя станциями A , B и C в поле и, следовательно, β_1 и β_2 будут известны, в то время как угол θ должен быть вычислен.

После вычисления θ можно определить координаты точки P .

$$\text{На рисунке 2.4а угол } \hat{C} = \begin{cases} 360 - (\beta_1 + \beta_2 + \theta + \gamma) = \\ (360 - \beta_1 - \beta_2 - \gamma) - \theta = \\ X - \theta \end{cases}$$

Из треугольника ABP с помощью теоремы синуса: $PB = AB \frac{\sin \theta}{\sin \beta_1}$.

Из треугольника BCP с помощью теоремы синуса: $PB = BC \frac{\sin(X - \theta)}{\sin \beta_2}$.

Следовательно, получаем:

$$PB = AB \frac{\sin \theta}{\sin \beta_1} = BC \frac{\sin(X - \theta)}{\sin \beta_2};$$

$$\therefore \frac{\sin(X - \theta)}{\sin \theta} = \frac{AB \sin \beta_2}{BC \sin \beta_1} = K$$

$$\text{при } K = \frac{AB \sin \beta_2}{BC \sin \beta_1} \quad (2.1)$$

где K – фиксированное значение, поскольку оно может быть рассчитано на основе двух известных фиксированных расстояний (AB , BC) и двух измеренных углов (β_1 , β_2) согласно формуле (2.1).

$$\therefore \frac{\sin(X - \theta)}{\sin \theta} = K \quad ; \quad \therefore \frac{\sin X \cos \theta - \cos X \sin \theta}{\sin \theta} = K$$

$$\therefore \sin X \cdot \text{ctg} \theta - \cos X = K ;$$

$$\Rightarrow \text{ctg} \theta = \frac{K + \cos X}{\sin X} \Rightarrow \theta = \text{ctg}^{-1} \left(\frac{K + \cos X}{\sin X} \right) \quad (2.2)$$

Уравнения (2.1) и (2.2) можно использовать для вычисления угла θ . Как только этот угол известен, геометрия треугольников может быть решена для определения расстояний AP , BP и CP . Например, применив теоремы синуса к треугольнику ABP :

$$\frac{AB}{\sin \beta_1} = \frac{AP}{\sin(\hat{A}BP)}$$

$$AP = AB \frac{\sin(\hat{A}BP)}{\sin \beta_1} = AB \frac{\sin(180 - \theta - \beta_1)}{\sin \beta_1}$$

А азимут линии AP рассчитывается следующим образом:

$$Az_{[AP]} = Az_{[AB]} + \theta.$$

Координаты точки P и ее точность вычисляются по уравнениям (2.3) и (2.4) [76, 85, 88]:

$$\begin{cases} X_P = X_A + AP \cdot \sin(Az_{[AP]}) \\ Y_P = Y_A + AP \cdot \cos(Az_{[AP]}) \end{cases} \quad (2.3)$$

$$m_{\theta_3} = \frac{m_\beta \cdot S_{PB}}{\rho \cdot \sin(\beta_1 + \beta_2 + \gamma)} \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{PA}}{b_{AB}}\right)^2 + \left(\frac{S_{PC}}{b_{BC}}\right)^2} \quad (2.4)$$

где m_{θ_3} – точность обратной засечки, точность положения точки P ; m_β – точность угловых измерений; S – горизонтальное расстояние; b_{AB} , b_{BC} – длины исходных сторон (AB и BC); γ – угол ABC ; $\rho = 206265''$.

Только одно расстояние AP , BP или CP и соответствующие им азимуты необходимы для вычисления координат P , но если используется один, то другие могут быть использованы для проверки правильности вычислений.

Метод (б):

В этом методе углы (β_1 и β_2) изменяются на x ($B\hat{P}C$), y ($C\hat{P}A$) и z ($A\hat{P}B$), которые измеряются в поле и по часовой стрелке, как показано на рисунке 2.4б. На этом рисунке показаны три отдельные диаграммы, чтобы учесть три возможных положения P по отношению к A , B и C .

Как только эти углы будут измерены в поле, координаты P могут быть рассчитаны с использованием уравнений, приведенных ниже:

$$\begin{aligned} a &= \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{X_C - X_A}{Y_C - Y_A} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{X_B - X_A}{Y_B - Y_A} \right) & K_1 &= \frac{1}{\operatorname{ctg} a - \operatorname{ctg} x} \\ b &= \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{X_A - X_B}{Y_A - Y_B} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{X_C - X_B}{Y_C - Y_B} \right) & ; \quad K_2 &= \frac{1}{\operatorname{ctg} b - \operatorname{ctg} y} \\ c &= \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{X_B - X_C}{Y_B - Y_C} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{X_A - X_C}{Y_A - Y_C} \right) & K_3 &= \frac{1}{\operatorname{ctg} c - \operatorname{ctg} z} \end{aligned}$$

Тогда координаты точки P будут следующими согласно уравнению (2.5):

$$X_P = \frac{K_1 X_A + K_2 X_B + K_3 X_C}{K_1 + K_2 + K_3} ; \quad Y_P = \frac{K_1 Y_A + K_2 Y_B + K_3 Y_C}{K_1 + K_2 + K_3} \quad (2.5)$$

и точность так же можно определить, как в уравнении (2.4), но углы β_1 и β_2 должны быть рассчитаны на основе измеренных углов x , y и z .

Следует отметить, что ни один из методов (а) или (б) не может быть использован, если три известные точки A , B и C лежат на прямой линии, и ни один метод не может быть использован, если все четыре точки лежат на окружности круга.

Точность измерения угла и расстояния играют важную роль в повышении или понижении точности положения точки P . Однако важность геометрии сети прямо не отображается в параметрах уравнения (2.4).

Геометрия сети, включая диапазон измерения углов, является важным фактором, влияющим на точность положения точки P . Ниже дан количественный

анализ уравнения (2.4). В этом анализе расстояния PA , PB и PC были фиксированы, чтобы определить влияние изменения угла и, следовательно, геометрию сети на расчетную точность положения. При этом рассматриваются только плановые координаты.

Результаты расчётов для различных вариантов (схем) обратной засечки приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Точность обратной засечки (упрощенный способ)

Наименование варианта	Горизонтальное расстояние (ГР)			Угол ($m_\beta = 0,5''$)			Точность обратной засечки
	От	До	ГР, м	$\beta_1, ^\circ$	$\beta_2, ^\circ$	$\gamma, ^\circ$	$m_{03}, \text{ мм}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Тест 1. $\beta_1 = \beta_2$							
A-1	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	15	15	84,6731	1,5
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	46,116				
	<i>B</i>	<i>C</i>	46,116				
A-2	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	30	30	104,9551	3,1
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	75,651				
	<i>B</i>	<i>C</i>	75,651				
A-3	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	45	45	104,9683	2,2
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	106,977				
	<i>B</i>	<i>C</i>	106,977				
A-4	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	60	60	98,2132	0,7
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	137,477				
	<i>B</i>	<i>C</i>	137,477				
A-5	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	90	90	77,3196	0,3
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	192,094				
	<i>B</i>	<i>C</i>	192,094				

Продолжение таблицы 2.1

A-6	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	120	120	52,6590	0,3
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	234,308				
	<i>B</i>	<i>C</i>	234,308				
Тест 2. $\beta_1 = \beta_2 > 120^\circ$							
A-7	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	130	130	44,0681	0,3
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	245,031				
	<i>B</i>	<i>C</i>	245,031				
A-8	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	140	140	35,3683	0,4
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	253,924				
	<i>B</i>	<i>C</i>	253,924				
Тест 3. $\beta_1 = \beta_2 / 2$							
C-2	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	30	60	101,5842	3,3
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	75,651				
	<i>B</i>	<i>C</i>	137,477				
Д-2	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	45	90	91,1439	0,6
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	106,977				
	<i>B</i>	<i>C</i>	192,094				
E-1	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	60	120	75,4361	0,4
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	137,477				
	<i>B</i>	<i>C</i>	234,308				
Тест 4. $\beta_1 = 15^\circ$, β_2 является переменной величиной							
B-1	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	15	30	94,8141	1,7
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	46,116				
	<i>B</i>	<i>C</i>	75,651				

Продолжение таблицы 2.1

В-2	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	15	45	94,8207	2,4
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	46,116				
	<i>B</i>	<i>C</i>	106,977				
В-3	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	15	60	91,4432	4,3
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	46,116				
	<i>B</i>	<i>C</i>	137,477				
В-4	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	15	90	80,9964	9,3
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	46,116				
	<i>B</i>	<i>C</i>	192,094				
Тест 5. $\beta 1 \neq \beta 2$							
С-1	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	30	45	104,9617	Нет решения (кругом опасности)
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	75,651				
	<i>B</i>	<i>C</i>	106,977				
С-3	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	30	90	91,1374	1,2
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	75,651				
	<i>B</i>	<i>C</i>	192,094				
С-4	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	30	120	78,8071	0,8
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	75,651				
	<i>B</i>	<i>C</i>	234,308				
Д-1	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	45	60	101,5907	1,2
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	106,977				
	<i>B</i>	<i>C</i>	137,477				
Д-3	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	45	120	78,8136	0,5
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	106,977				

Продолжение таблицы 2.1

	<i>B</i>	<i>C</i>	234,308				
<i>E-2</i>	<i>P</i>	<i>A</i>	120,000	60	90	87,7664	0,5
	<i>P</i>	<i>B</i>	150,000				
	<i>P</i>	<i>C</i>	120,000				
	<i>B</i>	<i>A</i>	137,477				
	<i>B</i>	<i>C</i>	192,094				

Результаты представленных расчетов согласуются с аналогичными исследованиями, приведенными в работах [15, 57, 58]. Так, в частности, в тесте 5 (С–1) показано, что, когда точки *A*, *B* и *C* лежат на одной окружности и точка *P* расположена очень близко (0,0664 м) к ней, то результаты сильно искажаются. Такая окружность называется «кругом опасности», и подобные параметры использовать не следует. Обобщенная кривая по результатам расчетов построена на рисунке 2.5. По данным расчетам можно сделать следующие выводы, описанные ниже, в качестве сравнения строгого и нестрогого методов.

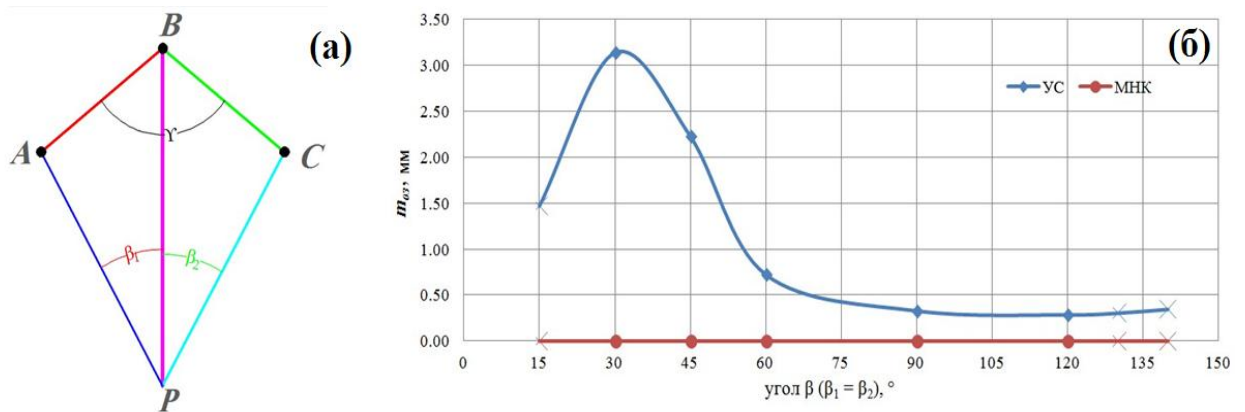


Рисунок 2.5 – (а) Схема расположения геодезических пунктов при решении обратной засечки, (б) СКП определения положения точки *P* (УС – упрощенный способ, МНК – строгий способ, $\beta (\beta_1 = \beta_2)$)

Исходные точки не должны располагаться на одной линии, так как при этом угол $\gamma = 180^\circ$. Не следует использовать углы: $\beta < 30^\circ$ и $\beta > 120^\circ$. Кроме того, исходные и определяемые пункты не должны располагаться на одной окружности. С увеличением углов β_1 и β_2 , и когда они примерно равны, точность положения точки *P* выше. (Эти выводы справедливы для конкретных параметров и при вариации β_1 и β_2). Вместе с тем расстояния *AB* и *BC* также оказывают

влияние. Наиболее эффективным по точности интервалом значений этих углов является 60–120°. Точность может быть повышена за счет уменьшения расстояний до исходных точек и их равенства [88].

Как видно из рисунка 2.5, точность определения положения точки нестрогим методом зависит от величин измеряемых углов. Практические условия и возможное многообразие вариаций схем геодезических измерений, безусловно, направляют исследователей на их оптимизацию. При таком подходе необходимо использовать строгий метод, в особенности, когда речь идет о высокоточных измерениях деформационных процессов. В качестве решения данного вопроса используется МНК.

Разработанный метод и алгоритм:

Этот метод основан на измерении как углов (направления), так и расстояний. Начальные приближенные координаты тахеометра вычисляются с использованием сторон и углов первого треугольника, установленного неизвестной точкой и двумя известными опорными точками. Затем наблюдения до дополнительных известных точек являются избыточными измерениями, а затем вычисления будут выполняться с использованием алгоритма, основанного на методе наименьших квадратов (МНК).

В треугольнике APB (Рисунок 2.4а):

$$Az_{[AB]} = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\Delta x_{AB}}{\Delta y_{AB}} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{x_B - x_A}{y_B - y_A} \right)$$

β_1 (Горизонтальный Угол) = Измерение

PA (Горизонтальное Расстояние ГР) = Измерение

PB (Горизонтальное Расстояние ГР) = Измерение

$$AB = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

$$\hat{\theta} = \sin^{-1} \left(\frac{PB \cdot \sin \beta_1}{AB} \right) \quad ; \quad Az_{[AP]} = Az_{[AB]} + \hat{\theta}$$

$$\text{Приближенные координаты точки } P: \begin{cases} x_P = x_A + (AP \cdot \sin Az_{[AP]}) \\ y_P = y_A + (AP \cdot \cos Az_{[AP]}) \end{cases}$$

Матрицы построены и решены методом наименьших квадратов (МНК) на основе следующих моделей (уравнения (2.6) и (2.7))[88]:

1. Для направлений (Dir):

$$v_i = -\partial Or_j + c_{jk} \partial x_j + d_{jk} \partial y_j - c_{jk} \partial x_k - d_{jk} \partial y_k - w_i$$

$$c_{jk} = -\frac{(y_j^0 - y_k^0)}{(GP_{jk}^0)^2} \cdot \rho \quad ; \quad d_{jk} = \frac{(x_j^0 - x_k^0)}{(GP_{jk}^0)^2} \cdot \rho; \quad \rho = 180 / \pi$$

$$w_i = X_i - G_{jk}^0 + Or_j^0 = X_i - Dir_i^0 \quad (2.6)$$

2. Для горизонтального расстояния (ГР):

$$v_i = e_{jk} \partial x_j + f_{jk} \partial y_j - e_{jk} \partial x_k - f_{jk} \partial y_k - w_i$$

$$e_{jk} = -\frac{(x_j^0 - x_k^0)}{GP_{jk}^0}; \quad f_{jk} = -\frac{(y_j^0 - y_k^0)}{GP_{jk}^0}; \quad w_i = X_i - GP_{jk}^0 \quad (2.7)$$

Матрицы будут построены следующим образом (согласно уравнениям (2.8) – (2.10)):

$$B = \begin{pmatrix} GP_i \\ GP_{i+1} \\ L \\ GP_n \\ Dir_i \\ Dir_{i+1} \\ L \\ Dir_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & e_i & f_i \\ 0 & e_{i+1} & f_{i+1} \\ L & L & L \\ 0 & e_n & f_n \\ -1 & c_i & d_i \\ -1 & c_{i+1} & d_{i+1} \\ L & L & L \\ -1 & c_n & d_n \end{pmatrix} \quad W = \begin{pmatrix} Изм_{GP_i} - Расс_{GP_i^0} \\ Изм_{GP_{i+1}} - Расс_{GP_{i+1}^0} \\ L \\ Изм_{GP_n} - Расс_{GP_n^0} \\ Изм_{Dir_i} - Расс_{Dir_i^0} \\ Изм_{Dir_{i+1}} - Расс_{Dir_{i+1}^0} \\ L \\ Изм_{Dir_n} - Расс_{Dir_n^0} \end{pmatrix}$$

$$P = \begin{pmatrix} \frac{\mu_0^2}{(\sigma_{s_i})^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\mu_0^2}{(\sigma_{s_{i+1}})^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\mu_0^2}{(\sigma_{s_n})^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\mu_0^2}{(\sigma_a)^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\mu_0^2}{(\sigma_a)^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\mu_0^2}{(\sigma_a)^2} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{S_i} = \sigma_S + L \cdot GP_i \cdot 10^{-6} \quad ; \quad \sigma_\alpha = \frac{\sigma_{\text{Горизонтальный Угол}^{\text{о}}}}{3600} \quad ; \quad \mu_0 = 1 \quad (2.8)$$

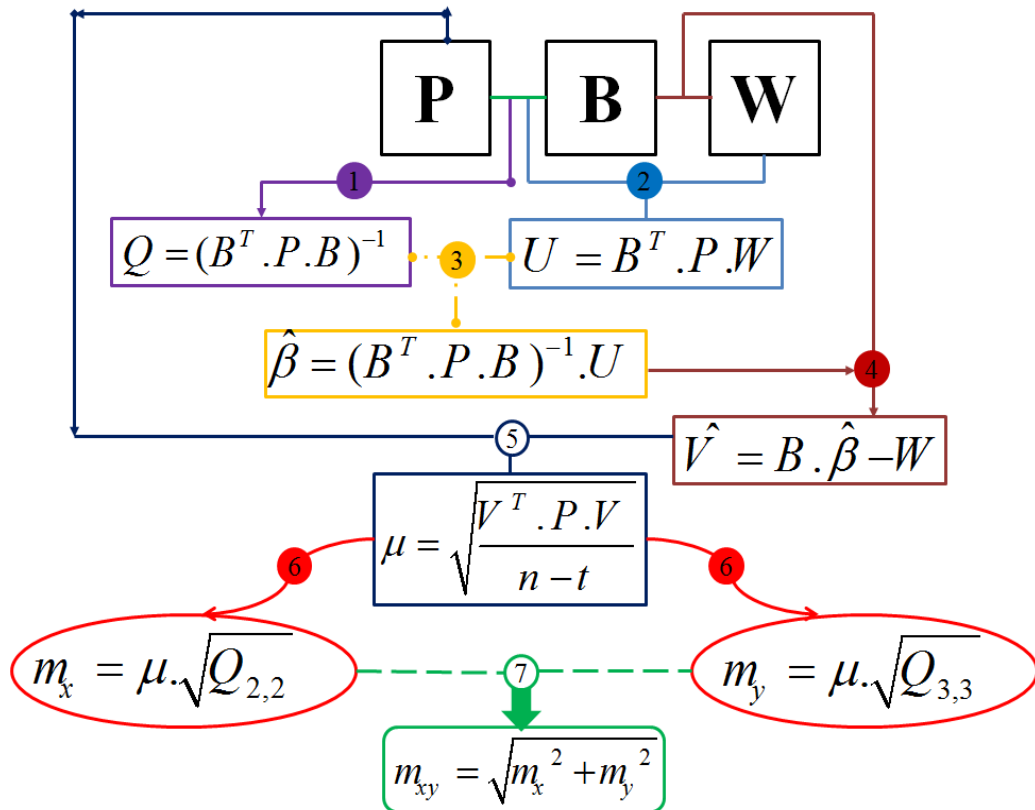


Рисунок 2.6 – Схема процесса определения координат и проведения оценки точности пунктов,

где N – Нормальная матрица; Q – Обратная матрица; U – Матрица нормированных коэффициентов параметрических уравнений; $\hat{\beta}$ – Матрица коррекции для приближенных координат; \hat{V} – Остаточная матрица

$$\text{Исправленные координаты} = \begin{pmatrix} Or_{apprx} \\ X_{apprx} \\ Y_{apprx} \end{pmatrix} + \hat{\beta} = \begin{pmatrix} Or \\ X \\ Y \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Априорные СКП
положения точки

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_0 = 1 \\ m_x = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\}$$

Апостериорные СКП
положения точки

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = L \\ m_x = \mu \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\}$$

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T \cdot P \cdot V}{r}}; r = n - t \quad (2.10)$$

Моделирование этого метода и процесса, который приводит к определению окончательных координат точки P , показано в виде диаграммы на рисунке 2.6. Эта модель была разработана не только для определения координат пункта наблюдения и оценки точности координат, но и для проверки устойчивости опорных точек и обнаружения любой смещенной. Хотя квазиопорные точки расположены в областях, считающимися стабильными, однако устойчивость этих точек всегда следует исследовать, поскольку любое смещение опорных точек приводит к ложному предупреждению о деформации контролируемого объекта.

В этом исследовании стабильность квазиопорных точек рассматривается как дополнительный параметр, который необходимо проверять в каждом цикле мониторинга, чтобы гарантировать надежность полученных результатов.

Упомянутое обнаружение может быть выполнено путем сравнения остаточной матрицы любой эпохи с исходной остаточной матрицей в эпоху «0» ($V_i - V_0$).

Этот метод считается новым, поскольку отпадает необходимость в построении геодезической сети и регулярной проверке этой сети с базовых (опорных) станций, расположенных далеко от территории проекта. Этот метод основан на строгой модели, которая связывает все измерения вместе и каждая матрица может способствовать анализу конкретного параметра, необходимого для мониторинга деформации, и помогает в создании системы раннего предупреждения для контроля процесса деформации и получения надежных результатов, а не «ложного» предупреждения.

Геометрическое моделирование углов и расстояний было проведено для «теоретической» оценки двух методов расчета и определения некоторых недостатков и ограничений этих методов. Теоретические выводы были применены к фактическим данным, и было доказано, что разработанный метод приводит к более точным результатам с возможностью сохранения той же точности в течение всего периода мониторинга. Точность вычисленных координат – один из

основных параметров, который необходимо изучать и поддерживать при мониторинге и контроле деформации. Эта разработанная модель демонстрирует эту способность и настоятельно рекомендуется для использования при мониторинге деформаций и смещения.

Приведенный подход к проведению наблюдений за деформациями показал свою целесообразность и обеспечил достижение требуемой точности измерений (доли миллиметров) на конкретном объекте. При этом выполнен анализ существующих разработок в области оценки точности обратной засечки. Показано, что формульный (нестрогий) метод определения погрешности положения искомой точки по схеме обратной засечки в диапазоне измеряемых углов близких к $20\text{--}30^\circ$ имеет наиболее худшие значения: погрешность в 3 и более раз выше, чем при углах $60\text{--}120^\circ$. Эти выводы коррелируются с результатами альтернативных исследований [15, 56-58, 116].

Использование по МНК является необходимым при оптимизации точности определения координат деформационной сети и, в частности, 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.

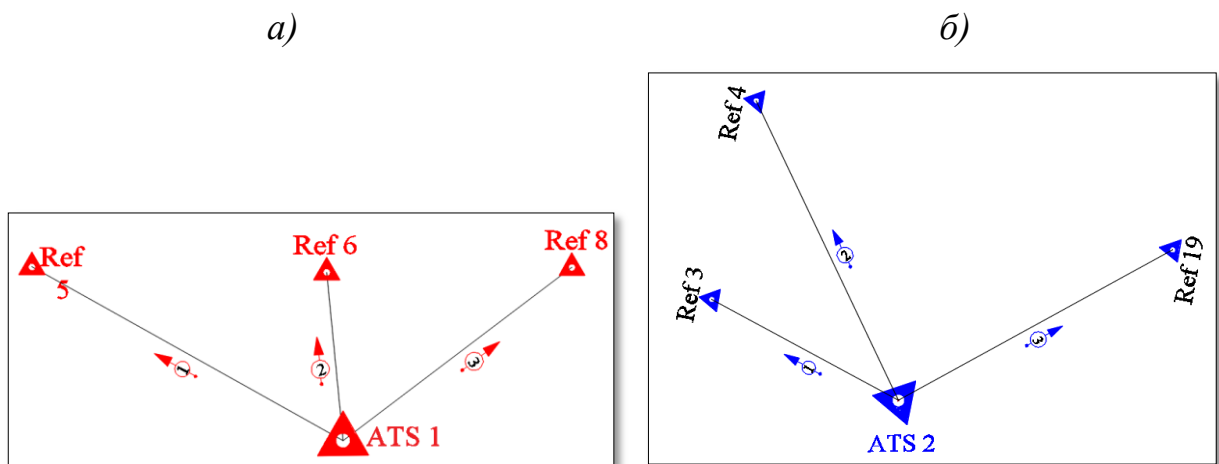


Рисунок 2.7 – Схема геометрии сети, спроектированная для реального проекта на основе решения обратной засечки (а – АТС 1, б – АТС 2)

В соответствии с геометрией сети, показанной на рисунке 2.7 и с использованием традиционного метода определения точности станций

наблюдения (уравнение 2.4) были использованы фактические измерения от АТС 1 и АТС 2 до опорных точек, результаты показаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Погрешность (m_{03}) по упрощенному способу

	<i>От</i>	<i>До</i>	<i>ГР (м)</i>	β_1 (Градус)	β_2 (Градус)	γ (Градус)	m_{03} (мм)
АТС 1	АТС1	Ref 5	89,8769	55,4651	58,5766	182,1871	0,193
	АТС1	Ref 6	42,5020				
	АТС1	Ref 8	72,3836				
	Ref 6	Ref 5	74,5254				
	Ref 6	Ref 8	61,9471				
АТС 2	АТС2	Ref 3	60,6905	36,1889	85,5182	82,2395	0,716
	АТС2	Ref 4	96,1668				
	АТС2	Ref 19	89,6224				
	Ref 4	Ref 3	59,2500				
	Ref 4	Ref 19	126,2417				

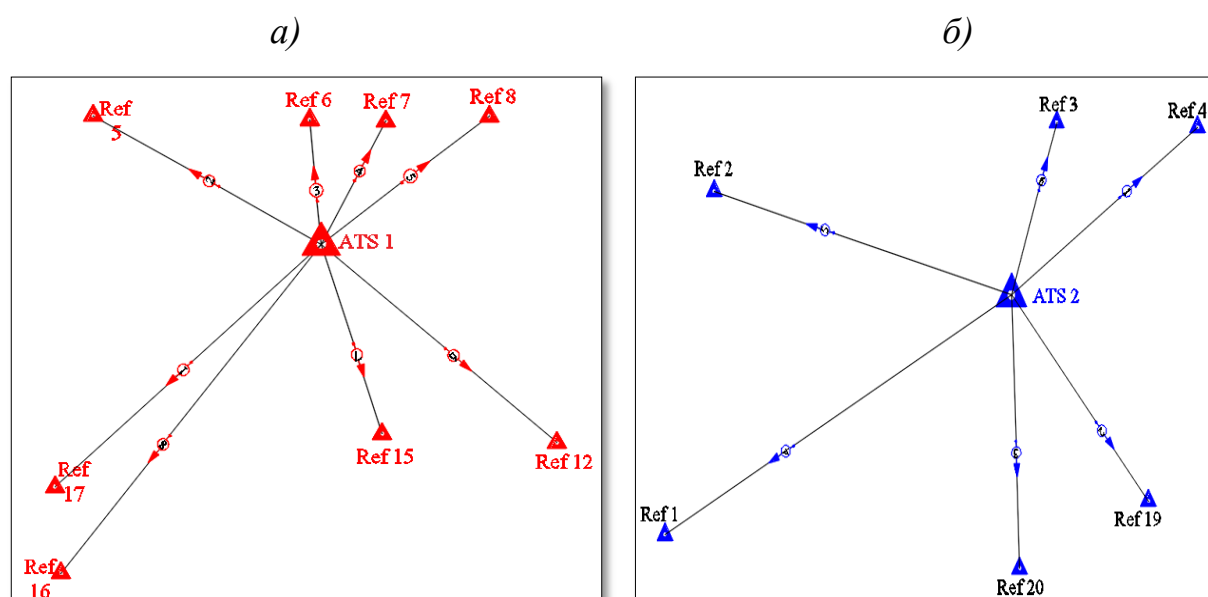


Рисунок 2.8 – Схемы геометрии сети, спроектированные для реального проекта по разработанному алгоритму (а – АТС 1, б – АТС 2)

С другой стороны, разработанный алгоритм также был применен для реальных объектов с использованием уравнений (2.6) – (2.10), и результаты получились следующими:

Таблица 2.3 – Измеренные величины и координаты исходных пунктов и наблюдательной станции

Необработанные измерения			
От	До	Направление (Градус)	ГР (м)
ATC1	REF 17	0,000000	123,3912
ATC1	REF 5	70,898203	89,8761
ATC1	REF 6	126,363261	42,4502
ATC1	REF 7	159,925581	47,3889
ATC1	REF 8	184,939878	72,3832
ATC1	REF 12	261,529536	105,5849
ATC1	REF 15	293,766581	67,7021
ATC1	REF 16	350,636150	143,2590
ATC2	REF 4	0,000000	96,1668
ATC2	REF 19	85,518158	89,5217
ATC2	REF 20	123,350150	91,0678
ATC2	REF 1	186,819302	165,8451
ATC2	REF 2	231,101870	129,5641
ATC2	REF 3	323,811059	60,6909

№ точки	X (м)	Y (м)
REF 17	167 805,0602	2 437 675,0191
REF 5	167 924,5025	2 437 717,1919
REF 6	167 955,3246	2 437 649,3391
REF 7	167 966,2719	2 437 625,3531
REF 8	167 983,0784	2 437 593,9568
REF 12	167 893,0537	2 437 525,1222
REF 15	167 869,8829	2 437 580,8191
REF 16	167 779,5090	2 437 660,4269
≈ ATC 1	167 918,9300	2 437 627,4890
REF 4	167 921,3426	2 437 720,3600
REF 19	167 800,1112	2 437 685,4362
REF 20	167 756,5614	2 437 724,5892
REF 1	167 702,6400	2 437 863,8658
REF 2	167 814,8224	2 437 894,5332
REF 3	167 897,4033	2 437 774,5584
≈ ATC 2	167 837,1960	2 437 766,9150

После построения матриц и применения процедуры, показанной на рисунке 2.6, потребовалось две итерации, и результаты были следующими:

$$ATC 1. \text{ Уравненные координаты} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 167918,9298 \text{ м} \\ 2437627,4880 \text{ м} \end{pmatrix}$$

$$\text{Априорные СКП} = \begin{cases} \mu_0^2 = 1 \\ m_x = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{cases} = \begin{cases} m_x = 0,11 \text{ мм} \\ m_y = 0,07 \text{ мм} \\ m_{xy} = 0,13 \text{ мм} \end{cases}$$

$$\text{Апостериорные СКП} = \begin{cases} \mu = 0,873 \\ m_x = \mu \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{cases} = \begin{cases} m_x = 0,09 \text{ мм} \\ m_y = 0,06 \text{ мм} \\ m_{xy} = 0,11 \text{ мм} \end{cases}$$

$$ATC 2. \text{ Уравненные координаты} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 167837,1959 \text{ м} \\ 2437766,9154 \text{ м} \end{pmatrix}$$

$$\text{Априорные СКП} = \left\{ \begin{array}{l} \mu_0^2 = 1 \\ m_x = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0,15\text{мм} \\ m_y = 0,11\text{мм} \\ m_{xy} = 0,19\text{мм} \end{array} \right\}$$

$$\text{Апостериорные СКП} = \left\{ \begin{array}{l} \mu = 0,357 \\ m_x = \mu \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0,05\text{мм} \\ m_y = 0,04\text{мм} \\ m_{xy} = 0,07\text{мм} \end{array} \right\}$$

Обработка фактических измерений (таблица 2.3) подтвердила теоретические выкладки, которые были представлены в графической форме (см. рисунок 2.5), и сделанные выводы в отношении предпочтительных углов и использования равных углов. Результаты показывают, что точность АТС 1 была несколько увеличена за счет использования разработанного алгоритма. Суть в том, что углы β_1 и β_2 приблизительно равны (около 60°) и сеть имеет хорошую геометрию (см. рисунок 2.7а). Однако точность АТС 2 была значительно увеличена; что было очевидно, потому что геометрия сети в этом случае не была однородной, углы β_1 и β_2 не были равны и даже не близки к диапазону 60-120 градусов (см. рисунок 2.7б).

Интерпретация полученных результатов позволяет сделать некоторые выводы и дать следующие рекомендации:

1) Используя традиционный (упрощенный) метод, можно достичь хорошей точности, но с некоторыми ограничениями и строгими измерениями и условиями сети (например, при хорошей геометрии сети).

2) Разработанный алгоритм доказывает свою способность повышать точность в различных условиях и геометрии сети.

Поддержание точности в течение всего периода мониторинга – одна из основных задач, которую необходимо выполнить, чтобы получить надежные

результаты, а затем и хорошую интерпретацию, и, следовательно, точное прогнозирование будущей деформации или состояния устойчивости.

В реальных проектах очень сложно найти оптимальную геометрию, необходимую для измерений традиционным методом. Следовательно, следует использовать другой метод, не зависящий от геометрических условий деформационной сети. И поскольку представленный разработанный алгоритм был протестирован в различных условиях, то его рекомендуется использовать для мониторинга деформаций и смещений. Также необходимо отметить, что представленный алгоритм был разработан как для определения деформации деформационных марок, а также для проверки устойчивости опорных точек и самой станции наблюдения; проверки устойчивости можно сделать простым сравнением остаточной матрицы в каждом цикле наблюдения (подробнее ниже).

2.1.3 Разработка алгоритма обнаружения смещений деформационных марок и возможных смещений исходных пунктов

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. Такая же процедура может быть применена и для обнаружения деформации геодезической сети. Следовательно, использование МНК необходимо для мониторинга деформации, поскольку смещение может быть быстро обнаружено путем анализа и сравнения остаточной матрицы между двумя разными циклами наблюдений. На примере покажем, как определить сместился ли исходный пункт или произошла деформация пород у марок или смещение тахеометрической станции.

Эллипс ошибок определяется с определенной доверительной вероятностью его большой полуосью (a) и малой осью (b), а также углом поворота (ϕ) [57, 71, 54, 85]. Эллипс представляет собой ожидаемую величину ошибки (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 имеет место деформация измеряемого объекта.

Формулы для элементов пересчитанного эллипса ожидаемого смещения и соответствующего круга смещения приведены ниже (уравнения (2.11)):

$$\lambda_1 = \frac{q_{\hat{x}\hat{x}_i} + q_{\hat{y}\hat{y}_i} + k}{2} ; \lambda_2 = \frac{q_{\hat{x}\hat{x}_i} + q_{\hat{y}\hat{y}_i} - k}{2} ; k = \sqrt{(q_{\hat{x}\hat{x}_i} - q_{\hat{y}\hat{y}_i})^2 + 4q_{\hat{x}\hat{y}_i}^2} ;$$

$$a = \mu_0 \cdot \sqrt{\lambda_1 * \chi_{2,1-\alpha}^2} ; b = \mu_0 \cdot \sqrt{\lambda_2 * \chi_{2,1-\alpha}^2} ; R = \sqrt{a * b} ; Tg(2\phi) = \frac{2q_{\hat{x}\hat{y}_i}}{q_{\hat{x}\hat{x}_i} - q_{\hat{y}\hat{y}_i}} \quad (2.11)$$

где $\chi_{2,1-\alpha}^2$ – распределение хи – квадрат для 2 степеней свободы; α – вероятность события; $\alpha = 0,05$ для **95 %** степени достоверности; ϕ – угол поворота эллипса; λ_1 и λ_2 – значения матрицы кофактора (Q); $q_{i,i}$ – элементы матрицы кофактора (Q).

В таблице 2.4, согласно уравнению (2.11), приведены соответствующие параметры эллипса и круга для 95 % степени достоверности для иллюстрации обнаружения смещений.

Таблица 2.4– Эллипс и круг для 95% степени достоверности

95% степени достоверности эллипса и круга							
Априорные					Апостериорные		
Точка	a (мм)	b (мм)	r (мм)	ϕ (Градус)	a (мм)	b (мм)	ϕ (Градус)
АТС 1	0,66	0,41	0,52	19,4805398	0,57	0,36	19,4805398
АТС 2	0,92	0,63	0,76	13,2129432	0,33	0,22	13,2129432

Данные, приведенные в таблице 2.4, представляют собой пороговые значения, с которыми необходимо сравнивать все будущие расчетные значения.

Когда значение, полученное в результате расчета, меньше, чем радиус круга доверительной вероятности 95%, то деформации не существует. Однако при превышении деформация существует и ее необходимо учитывать.

По начальным измерения остаточная матрица ($\hat{V} = B \cdot \hat{\beta} - W$) вычислена. Для удобства рассмотрения деформаций назовем ее остаточной матрицей, которая сохраняется для сравнения с остаточными матрицами для различных случаев моделирования: вариант 1 – точка 12 была смещена (изменение только горизонтального расстояния); вариант 2 – точка 12 была смещена (изменение

горизонтального направления и расстояния); вариант 3 – все расстояния и направления были изменены. Все три варианта показаны на рисунке 2.9.

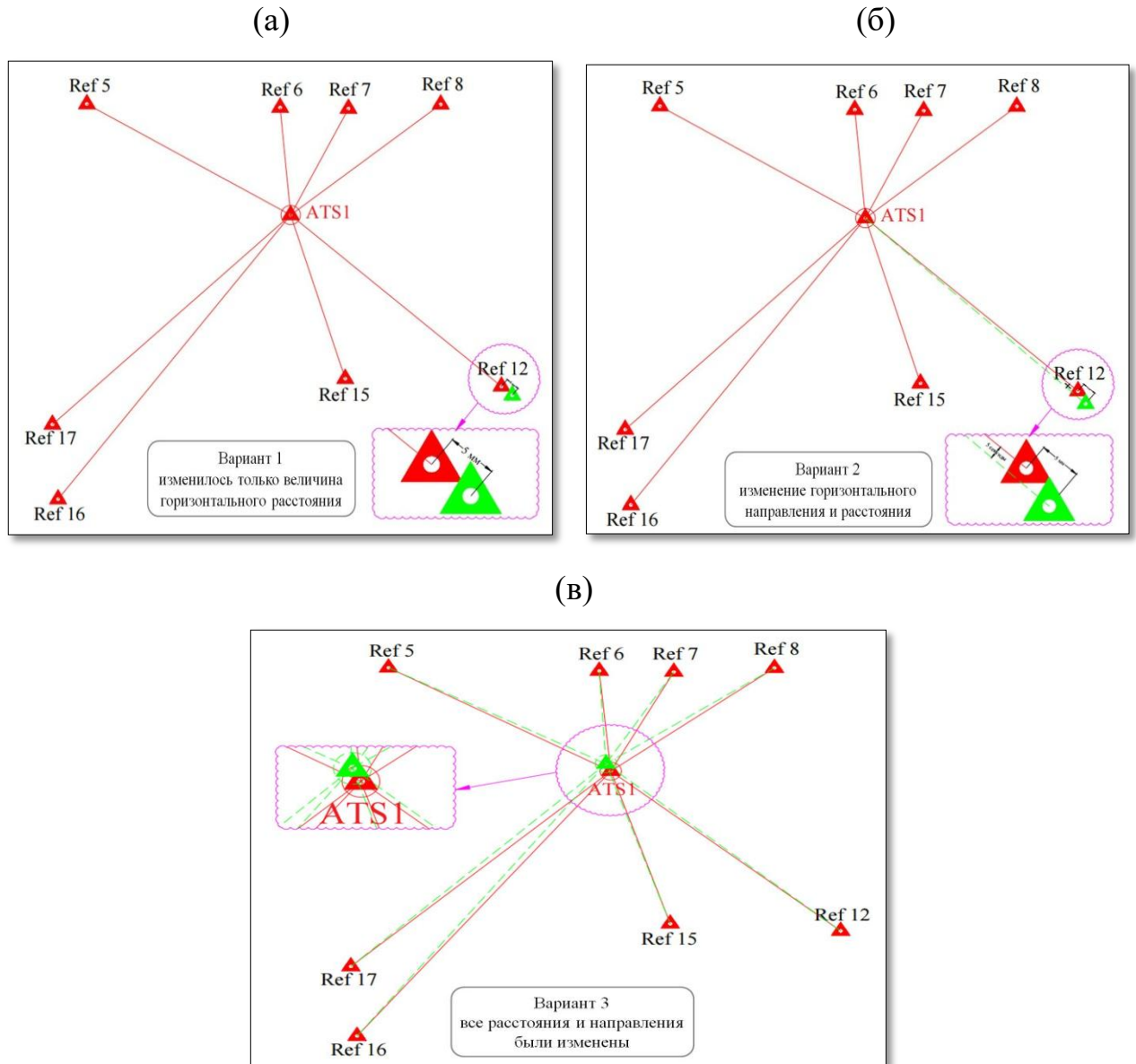


Рисунок 2. 9 – Схема деформационных марок и параметры измерения

В таблице 2.5 приведены вычисленные данные для определения вида ошибки (деформации). Сравнивались остаточные матрицы в разных циклах наблюдений. Остаточная матрица начального наблюдения ($V_{нач}$) рассматривается как базовая.

В рассматриваемых случаях, когда изменяли горизонтальное расстояние между контрольной точкой Ref 12 и ATC1 на 5 мм (V_I), в результате сравнения матриц ($V_I - V_{нач}$) определено значение 4,935 мм. Затем мы также изменили горизонтальное направление для Ref12, и, используя остаточную матрицу и

сравнив ее с исходной матрицей ($V_2 - V_{нач}$), мы смогли найти деформацию, а также определить дополнительные смещения.

Обнаружение любого изменения в горизонтальном направлении может быть выполнено сравнением матриц ($V_2 - V_1$), где смещение определяется по максимальным значениям. При сравнении $V_3 - V_{нач}$ (третий случай) предполагается возможность смещения самой тахеометрической станции.

Поскольку стабильность квазиопорных точек или возможных деформации проверяется на основе сравнения остаточных матриц, то даже числа обрабатываются непосредственно по абсолютной величине, либо по формуле « $v^2 = \min$ ».

Абсолютный метод основан на проверке чисел, вычисляемых независимо от знака (+ или -). Однако, когда числа возводятся в квадрат, все они становятся положительными, таким образом, деформированная точка обнаруживается путем проверки наивысшего значения в матрице сравнения (например, $V_1 - V_{нач}$), и все значения, которые проверяют формулу « $v^2 = \min$ », отражают стабильные точки.

Таблица 2.5 – Данные для обнаружения деформаций с использованием остаточной матрицы

		Выявленные деформации (смещения)											
		по абсолютной величине					по формуле « $v^2 = \min$ »						
Наименовани е исходной точки	$V_{нач}$	V_1	V_2	V_3	Единицы	$V_1 - V_{нач}$	$V_2 - V_{нач}$	$V_2 - V_1$	$V_3 - V_{нач}$	$V_1 - V_{нач}$	$V_2 - V_{нач}$	$V_2 - V_1$	
													Горизонтальные расстояние
REF 5	0,706	0,644	0,660	3,188	мм	-0,062	-0,046	0,016	2,483	0,004	0,002	0,000	
REF 6	0,361	0,287	-0,016	4,445	мм	-0,073	-0,377	-0,303	4,085	0,005	0,142	0,092	
REF 7	1,301	1,254	0,875	6,189	мм	-0,047	-0,426	-0,379	4,887	0,002	0,182	0,144	
REF 8	0,391	0,374	0,022	5,948	мм	-0,017	-0,370	-0,353	5,557	0,000	0,137	0,125	
REF 12	0,777	-4,154	-4,100	-2,441	мм	-4,930	-4,876	0,054	-3,217	24,309	23,779	0,003	
REF 15	0,101	0,178	0,425	-3,779	мм	0,077	0,323	0,246	-3,880	0,006	0,104	0,061	
REF 16	-0,030	0,005	0,381	-5,155	мм	0,035	0,412	0,376	-5,125	0,001	0,169	0,142	
Направления	REF 17	-0,335	-0,498	-0,015	0,548	секунды	-0,163	0,320	0,483	0,883	0,027	0,102	0,233
	REF 5	0,213	0,067	-0,138	-6,002	секунды	-0,146	-0,351	-0,206	-6,215	0,021	0,123	0,042
	REF 6	-0,072	0,010	-0,435	0,996	секунды	0,082	-0,363	-0,445	1,068	0,007	0,132	0,198
	REF 7	-0,366	-0,139	0,427	1,287	секунды	0,227	0,794	0,566	1,653	0,052	0,630	0,320
	REF 8	0,568	0,744	1,806	-0,980	секунды	0,176	1,239	1,063	-1,548	0,031	1,534	1,129
	REF 12	-0,002	0,025	-3,577	3,052	секунды	0,027	-3,574	-3,602	3,054	0,001	12,777	12,971
	REF 15	0,118	0,053	1,598	0,054	секунды	-0,065	1,480	1,545	-0,063	0,004	2,191	2,386
	REF 16	-0,124	-0,263	0,333	1,045	секунды	-0,139	0,456	0,595	1,169	0,019	0,208	0,354

2.2 Расчет точности положения деформационных марок

Оптимальное расположение наблюдательной станции и точность соответствующего местоположения были изучены и подробно описаны в предыдущих разделах. Хотя результаты получились удовлетворительными, необходимо исследовать точность положения деформационных марок. В проектах мониторинга основным параметром, изучаемым с геодезической стороны, является достижение требуемой точности измерений.

Предварительный анализ (проектирование и предрасчет точности положения деформационных марок) должен включать в себя:

1. Обоснование метода съемки.
2. Выбор приборов (стоимость, простота и точность единичного измерения) [23].
3. Методику измерений и обработку результатов для достижения требуемой точности [61, 82].

Ответы на упомянутые вопросы являются основой любого исследования по мере того, как проекты входят в этапы планирования. Поэтому в следующих частях будет представлено подробное исследование, основанное на моделировании данных и анализе результатов.

Данные тахеометрических измерений могут быть представлены как наклонное расстояние (S), горизонтальный угол (α) и вертикальный угол (γ). При мониторинге деформации конструкций требуются значения деформации и их направления, что означает, что система мониторинга должна быть ориентирована и согласована с контролируемым объектом. Другими словами, может быть создана локальная система координат, одна ось которой перпендикулярна поверхности объекта, а другая – параллельна той же поверхности. Однако мониторинг может выполняться в общей системе координат, а затем это преобразование может быть выполнено после обработки результатов измерений.

В соответствии с нашими задачами была создана локальная система, как показано на рисунке 2.10. Ось X выбрана параллельной контролируемой

поверхности, а ось Y перпендикулярна контролируемой поверхности. Тем не менее, ось Z была выбрана как обычно, как вертикальная ось в направлении вверх прибора (а именно тахеометра) установлена на исходной точке.

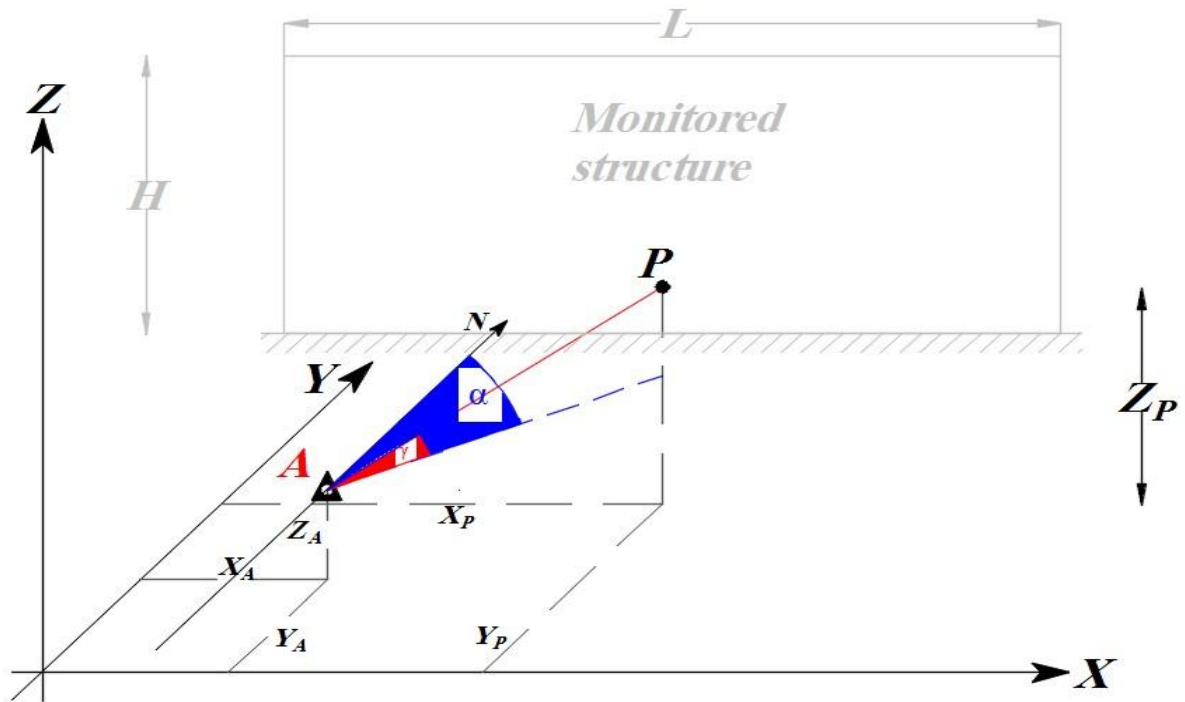


Рисунок 2.10 – Схема линейно-угловых измерений деформационных марок

Точка A – исходная точка с известными координатами (X_A, Y_A, Z_A) ; наблюдательная станция (тахеометр) установлена на этой точке, чтобы видеть, измерять и контролировать координаты неизвестной точки $P (X_P, Y_P, Z_P)$. Угол α – азимут линии AP ; это угол между северным направлением (в данном случае осью Y) и соответствующей линией обзора. Угол γ – это угол между горизонтальной плоскостью, образованной осями X и Y , и соответствующей линией обзора. После выполнения всех измерений координаты точки P можно вычислить следующим образом согласно (2.12):

$$\begin{cases} X_P = X_A + S \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha \\ Y_P = Y_A + S \cdot \cos \gamma \cdot \cos \alpha \\ Z_P = Z_A + S \cdot \sin \gamma \end{cases} \quad (2.12)$$

Поскольку количество неизвестных равно количеству наблюдений, избыточность отсутствует. Следовательно, для вычисления соответствующей точности точки P применяется закон ковариации (метод Якоби) в следующей форме (2.13):

$$C_{X_{(u,u)}} = J_{(u,u)} \cdot C_{l_{(n,n)}} \cdot J_{(n,u)}^T \quad (2.13)$$

где C_X – ковариационная матрица неизвестных параметров; J – Матрица коэффициентов (коэффициент Якоби); C_l – ковариационная матрица неизвестных параметров.

В данном случае уравнение (2.13) будет записано следующим образом:

$$C_{X_{(3,3)}} = J_{(3,3)} \cdot C_{l_{(3,3)}} \cdot J_{(3,3)}^T$$

$$\begin{pmatrix} m_x^2 & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & m_y^2 & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & m_z^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta X}{\delta S} & \frac{\delta X}{\delta \alpha} & \frac{\delta X}{\delta \gamma} \\ \frac{\delta Y}{\delta S} & \frac{\delta Y}{\delta \alpha} & \frac{\delta Y}{\delta \gamma} \\ \frac{\delta Z}{\delta S} & \frac{\delta Z}{\delta \alpha} & \frac{\delta Z}{\delta \gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_\alpha^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_\gamma^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\delta X}{\delta S} & \frac{\delta Y}{\delta S} & \frac{\delta Z}{\delta S} \\ \frac{\delta X}{\delta \alpha} & \frac{\delta Y}{\delta \alpha} & \frac{\delta Z}{\delta \alpha} \\ \frac{\delta X}{\delta \gamma} & \frac{\delta Y}{\delta \gamma} & \frac{\delta Z}{\delta \gamma} \end{pmatrix}$$

Далее получаем (2.14):

$$\begin{cases} m_x^2 = \left(\frac{\delta X}{\delta S}\right)^2 \cdot m_s^2 + \left(\frac{\delta X}{\delta \alpha}\right)^2 \cdot m_\alpha^2 + \left(\frac{\delta X}{\delta \gamma}\right)^2 \cdot m_\gamma^2 \\ m_y^2 = \left(\frac{\delta Y}{\delta S}\right)^2 \cdot m_s^2 + \left(\frac{\delta Y}{\delta \alpha}\right)^2 \cdot m_\alpha^2 + \left(\frac{\delta Y}{\delta \gamma}\right)^2 \cdot m_\gamma^2 \\ m_z^2 = \left(\frac{\delta Z}{\delta S}\right)^2 \cdot m_s^2 + \left(\frac{\delta Z}{\delta \alpha}\right)^2 \cdot m_\alpha^2 + \left(\frac{\delta Z}{\delta \gamma}\right)^2 \cdot m_\gamma^2 \end{cases} \quad (2.14)$$

Затем, дифференцируя уравнение (2.12) и подставляя данные в уравнение (2.14), можно вывести следующие формулы (2.15):

$$\begin{cases} m_x^2 = (\sin \alpha \cdot \cos \gamma)^2 \cdot m_s^2 + (S \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma)^2 \cdot m_\alpha^2 + (-S \cdot \sin \alpha \cdot \sin \gamma)^2 \cdot m_\gamma^2 \\ m_y^2 = (\cos \alpha \cdot \cos \gamma)^2 \cdot m_s^2 + (-S \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma)^2 \cdot m_\alpha^2 + (-S \cdot \cos \alpha \cdot \sin \gamma)^2 \cdot m_\gamma^2 \\ m_z^2 = (\sin \gamma)^2 \cdot m_s^2 + (S \cdot \cos \gamma)^2 \cdot m_\gamma^2 \end{cases} \quad (2.15)$$

где m_s, m_α, m_γ – паспортная точность измерения расстояния, вертикального и горизонтального углов используемого тахеометра соответственно.

Однако, если предположить, что точка А имеет координаты (0,0,0), то можно вывести следующие формулы (2.16):

$$\begin{cases} m_x^2 = \left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right)^2 \cdot m_s^2 + (Y)^2 \cdot m_\alpha^2 + \left(\frac{ZX}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)^2 \cdot m_\gamma^2 \\ m_y^2 = \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right)^2 \cdot m_s^2 + (X)^2 \cdot m_\alpha^2 + \left(\frac{ZY}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)^2 \cdot m_\gamma^2 \\ m_z^2 = \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right)^2 \cdot m_s^2 + (\sqrt{X^2 + Y^2})^2 \cdot m_\gamma^2 \end{cases} \quad (2.16)$$

Расстояние S между станцией мониторинга и опорной точкой или объектом обычно является основным фактором, влияющим на точность измерений. Однако значение S нельзя указать и зафиксировать во всех заданиях мониторинга; он отличается необходимой точностью и полевыми условиями. Кроме того, в нормативных документах и стандартах отсутствует четкая методика проведения мониторинга с определенной точностью, поэтому предпочтительное расстояние и геометрия геодезической сети для проведения мониторинга должны определяться экспериментальными испытаниями. Тем не менее, S должно быть выбрано таким образом, чтобы минимизировать значения (m_x, m_y, m_z) и должно удовлетворять один из следующих критериев:

(1) $m_x =$ минимум (2) $m_y =$ минимум (3) $m_z =$ минимум

(4) $R = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} =$ минимум

Первые 3 критерия могут использоваться в случае независимости координат и когда нет интереса к соотношению между 3 координатами. Но, поскольку цель мониторинга – найти и вычислить текущие трехмерные координаты деформационной марки, то следует принять четвертый критерий (2.17).

$$\begin{cases} R = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \\ R^2 = m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 \\ R^2 = \begin{cases} (\cos^2 \gamma \cdot (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) + \sin^2 \gamma) \cdot m_s^2 + (S^2 \cdot \cos^2 \gamma \cdot (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)) \cdot m_\alpha^2 \\ + (S^2 \cdot \sin^2 \gamma \cdot (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) + S^2 \cdot \cos^2 \gamma) \cdot m_\gamma^2 \end{cases} \end{cases} \quad (2.17)$$

Поскольку $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$, и $\sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma = 1$, тогда

$$R^2 = m_s^2 + S^2 \cdot \cos^2 \gamma \cdot m_\alpha^2 + S^2 \cdot m_\gamma^2.$$

$$\text{Для } R = \text{минимум, } \begin{cases} \frac{\delta R}{\delta S} = 0 & \frac{\delta R}{\delta \alpha} = 0 & \frac{\delta R}{\delta \gamma} = 0 \end{cases}$$

Для производной наилучшие параметры следующие: горизонтальный угол $\alpha = 0$ и вертикальный угол $\gamma = 0$.

Как упоминалось выше, оптимальное значение расстояния S не может быть определено, но следует отметить, что соотношение между расстоянием и точностью обратно пропорционально. Что касается горизонтальных и вертикальных углов, лучший способ их контроля – это расположить тахеометр перед этой рассматриваемой точкой перпендикулярно и на одном уровне. В этом случае горизонтальный и вертикальный углы равны нулю.

На практике наклонное расстояние, горизонтальные и вертикальные углы принимаются на основании полевых измерений. Однако на этапе предварительного анализа эти данные отсутствуют, поэтому предполагается, что координаты точки P известны (X_P, Y_P, Z_P), а затем можно вычислить S , α и γ , относительно известной станции управления A (X_A, Y_A, Z_A) по следующим формулам (2.18):

$$\begin{cases} S = \sqrt{(X_P - X_A)^2 + (Y_P - Y_A)^2 + (Z_P - Z_A)^2} \\ \operatorname{tg} \alpha = \frac{Y_P - Y_A}{X_P - X_A} \\ \operatorname{tg} \gamma = \frac{Z_P - Z_A}{\sqrt{(X_P - X_A)^2 + (Y_P - Y_A)^2}} \end{cases} \quad (2.18)$$

Если принять координаты станции (0,0,0), то уравнение (2.18) примет следующий вид (2.19):

$$\begin{cases} S = \sqrt{(X_i)^2 + (Y_i)^2 + (Z_i)^2} \\ \operatorname{tg} \alpha = \frac{Y_i}{X_i} \\ \operatorname{tg} \gamma = \frac{Z_i}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_i)^2}} \end{cases} \quad (2.19)$$

Позиционное размещение наблюдательной станции. Теоретическое обоснование

Три параметра, измеряемые в полевых условиях и используемые для определения координат неизвестной точки, – это расстояние, горизонтальный и вертикальный углы. Соответственно, чтобы исследовать влияние этих параметров на точность позиционирования измеряемой точки, теоретическое исследование состоит из трех случаев, выполняемых с двумя тахеометрами, имеющими следующие характеристики:

- а) $m_\alpha = 1''$, $m_\gamma = 1''$ и $m_S = \pm 3 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6}$.
 б) $m_\alpha = 0,5''$, $m_\gamma = 1''$ и $m_S = \pm 0,6 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6}$.

Следует отметить, что в таблицах будут показаны данные, рассчитанные для одного тахеометра (второго), а на графиках будут показаны оба.

Первый случай:

$$\alpha = 0, \gamma = 0 \text{ и } S = \text{Переменная}$$

Тогда $\cos \alpha = 1$, $\sin \alpha = 0$, $\cos \gamma = 1$ и $\sin \gamma = 0$, и уравнение (2.17) можно записать как:

$$\begin{cases} m_x^2 = S^2 \cdot m_\alpha^2 \\ m_y^2 = m_S^2 \\ m_z^2 = S^2 \cdot m_\gamma^2 \end{cases}$$

Таблица 2.6 – Значения точности (в мм) положения точки Р, когда переменная S и углы равны нулю

<i>S</i>	<i>S переменная α = 0 γ = 0</i>								
	<i>20 м</i>	<i>40 м</i>	<i>60 м</i>	<i>80 м</i>	<i>100 м</i>	<i>120 м</i>	<i>140 м</i>	<i>160 м</i>	<i>180 м</i>
<i>m_x</i>	0,0485	0,0970	0,1454	0,1939	0,2424	0,2909	0,3394	0,3879	0,4363
<i>m_y</i>	0,6200	0,6400	0,6600	0,6800	0,7000	0,7200	0,7400	0,7600	0,7800
<i>m_z</i>	0,0970	0,1939	0,2909	0,3879	0,4848	0,5818	0,6787	0,7757	0,8727
<i>R</i>	0,6294	0,6757	0,7358	0,8065	0,8853	0,9703	1,0599	1,1531	1,2491

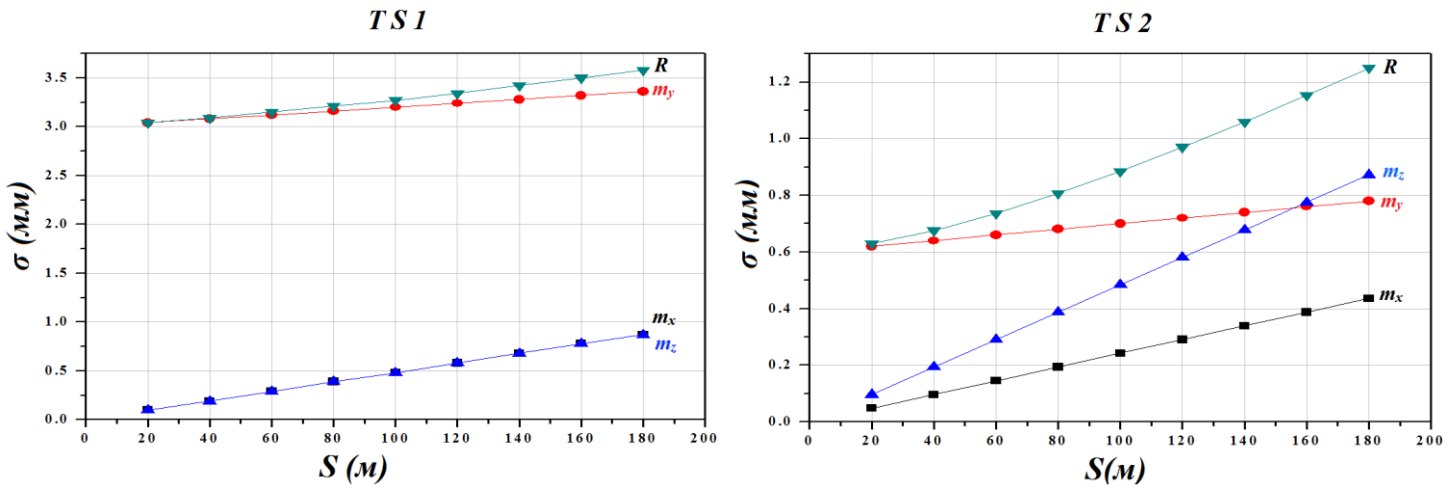


Рисунок 2.11 – Зависимости точности положения точки P в зависимости от расстояния

По результатам, приведенным в таблице 2.6 и на рисунке 2.11, можно сделать некоторые выводы:

1. Стандартные отклонения в трех направлениях увеличиваются с увеличением расстояния и, как следствие, уменьшается точность.
2. Когда $\alpha = 0$, $\gamma = 0$, взаимосвязь между m_x , m_y , m_z и расстоянием линейна.
3. Когда горизонтальный угол и вертикальный угол были постоянны и менялись только расстояния, ожидалось, что отклонение будет только в m_y , поскольку измеренная линия параллельна оси Y (см. рисунок 2.10), однако стандартная отклонения X и Z также варьируются в зависимости от фактора, который обеспечивает взаимосвязь между всеми тремя параметрами и показывает, что на точность компонента Z сильно влияет увеличение расстояния.

Второй случай:

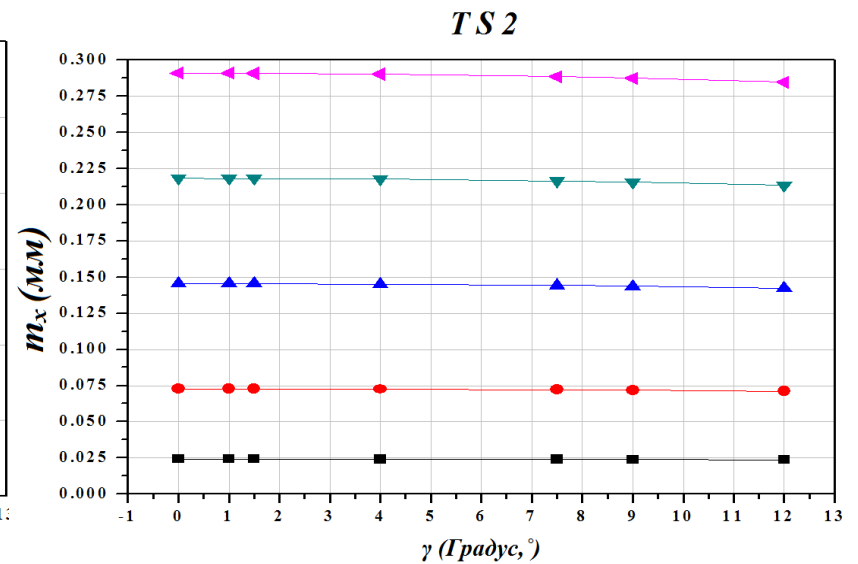
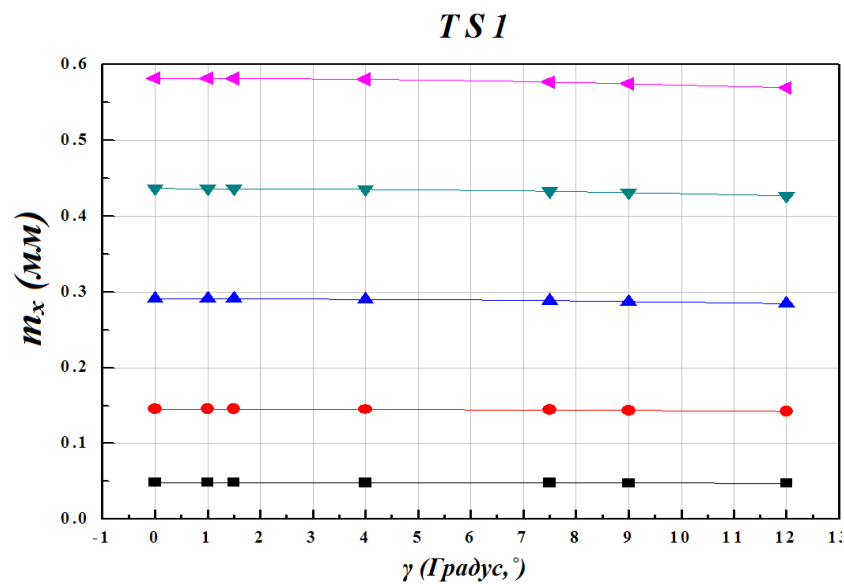
$$\alpha = 0, \gamma = \text{Переменная and } S = \text{Переменная}$$

Тогда $\cos \alpha = 1$ и $\sin \alpha = 0$, и уравнение (2.17) можно записать как:

$$\begin{cases} m_x^2 = (S \cdot \cos \gamma)^2 \cdot m_\alpha^2 \\ m_y^2 = (\cos \gamma)^2 \cdot m_s^2 + (-S \cdot \sin \gamma)^2 \cdot m_\gamma^2 \\ m_z^2 = (\sin \gamma)^2 \cdot m_s^2 + (S \cdot \cos \gamma)^2 \cdot m_\gamma^2 \end{cases}$$

Таблица 2.7 – Значения точности в мм положения точки P при вариации S и γ и при α равным нулю

<i>S</i> переменная $\alpha = 0$ γ переменная															
	<i>S</i> = 10 м			<i>S</i> = 30 м			<i>S</i> = 60 м			<i>S</i> = 90 м			<i>S</i> = 120 м		
γ °	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
0	0,0242	0,6100	0,0485	0,0727	0,6300	0,1454	0,1454	0,6600	0,2909	0,2182	0,6900	0,4363	0,2909	0,7200	0,5818
1	0,0242	0,6099	0,0496	0,0727	0,6299	0,1458	0,1454	0,6599	0,2911	0,2181	0,6899	0,4364	0,2908	0,7200	0,5818
1.5	0,0242	0,6098	0,0510	0,0727	0,6298	0,1463	0,1454	0,6598	0,2913	0,2181	0,6899	0,4366	0,2908	0,7199	0,5819
4	0,0242	0,6085	0,0644	0,0725	0,6285	0,1516	0,1451	0,6587	0,2938	0,2176	0,6890	0,4379	0,2902	0,7194	0,5825
7.5	0,0240	0,6048	0,0930	0,0721	0,6249	0,1660	0,1442	0,6555	0,3010	0,2163	0,6865	0,4419	0,2884	0,7179	0,5844
9	0,0239	0,6025	0,1068	0,0718	0,6227	0,1742	0,1437	0,6535	0,3053	0,2155	0,6849	0,4443	0,2873	0,7169	0,5855
12	0,0237	0,5968	0,1354	0,0711	0,6170	0,1934	0,1423	0,6484	0,3159	0,2134	0,6810	0,4503	0,2845	0,7146	0,5884



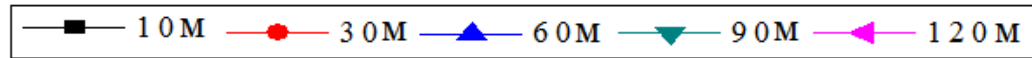
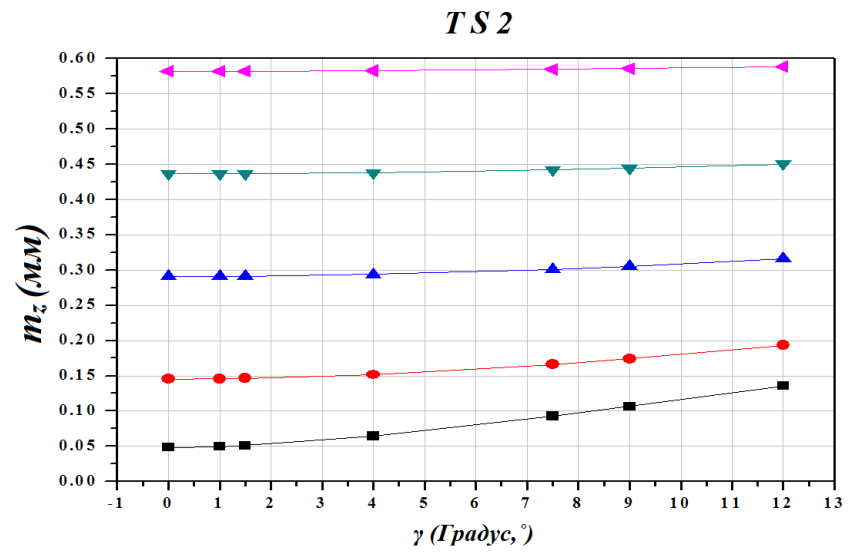
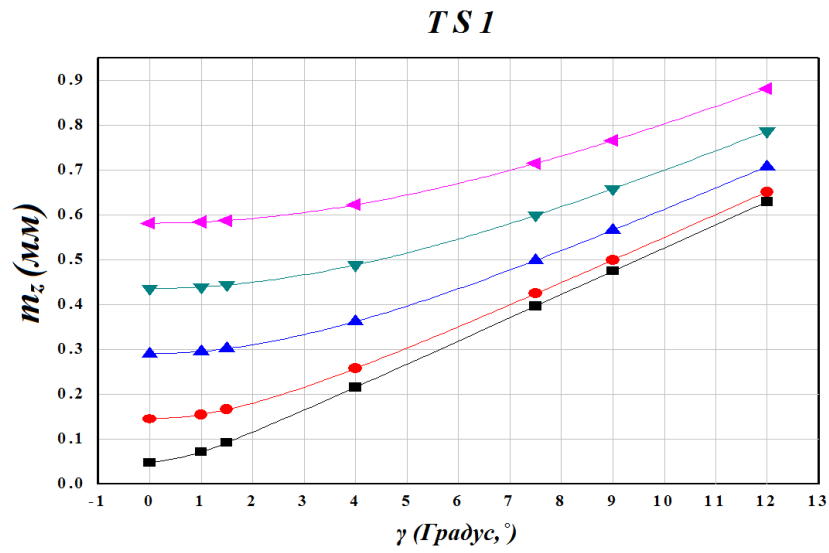
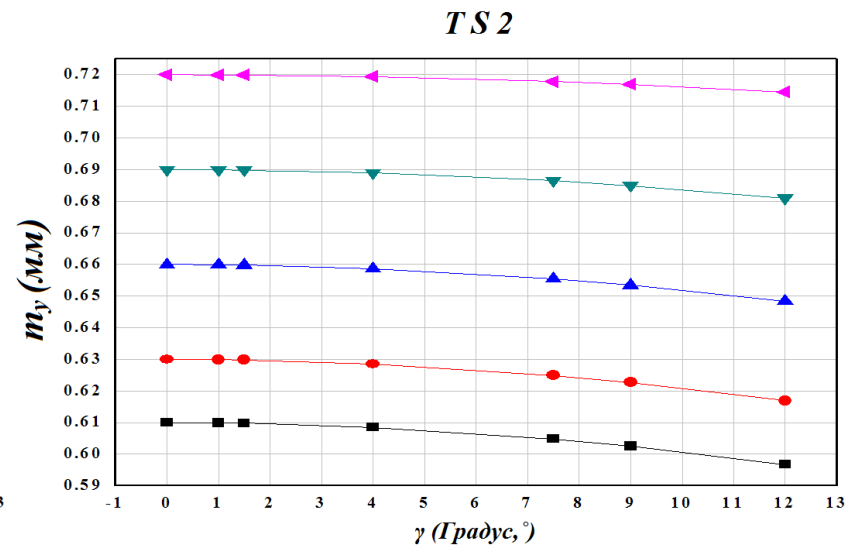
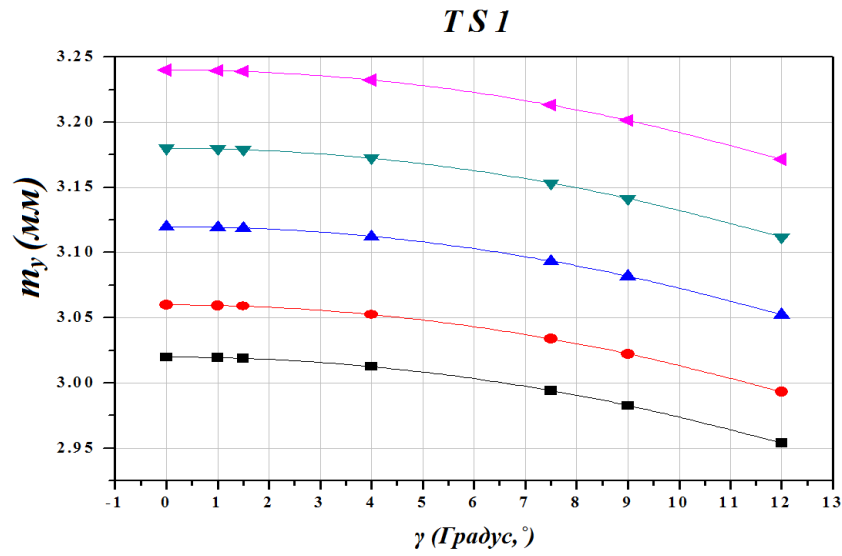


Рисунок 2.12 – Зависимости точности положения точки Р от расстояния и вертикального угла

Результаты, приведенные в таблице 2.7 и на рисунке 2.12, позволяют сделать следующие выводы:

1. Когда расстояние постоянно, на m_x не влияет изменение вертикального угла.
2. При постоянном расстоянии m_y уменьшается с увеличением вертикального угла.
3. Когда расстояние постоянное, m_z относительно пропорционально вертикальному углу, следовательно, точность уменьшается с увеличением вертикального угла.

Третий случай:

$$\alpha = \text{Переменная}, \gamma = 0 \text{ and } S = \text{Переменная}$$

Если $\cos \gamma = 1$ и $\sin \gamma = 0$, то уравнение (2.17) можно переписать как:

$$\begin{cases} m_x^2 = (\sin \alpha)^2 \cdot m_s^2 + (S \cdot \cos \alpha)^2 \cdot m_\alpha^2 \\ m_y^2 = (\cos \alpha)^2 \cdot m_s^2 + (-S \cdot \sin \alpha)^2 \cdot m_\alpha^2 \\ m_z^2 = S^2 \cdot m_\gamma^2 \end{cases}$$

На основе проведенного анализа точности положения точки P с вариацией горизонтального угла и отдельным представлением результатов (таблица 2.8 и рисунок 2.13) на 4 квадранта – первый от 0° до 90° , второй от 90° до 180° , третий от 180° до 270° и четвертый от 270° до 360° . Тогда можно вывести следующее:

1. Стандартное отклонение X увеличивается, в то время как угол « α » увеличивается в первом и третьем квадрантах. Однако во втором и четвертом квадрантах стандартное отклонение уменьшается, а « α » увеличивается.

2. Стандартное отклонение Y в точности обратное соответствующему значению X ; для разных расстояний и углов $\sqrt{m_x^2 + m_y^2} = \text{constant}$.

3. Максимальные стандартные отклонения возникают при углах 90° , 180° и 270° , что означает, что точность при этих углах очень низкая. Следовательно,

упомянутые углы использовать не следует, и предпочтительными углами кажутся 60° , 120° , 240° и 300° , где m_x и m_y равны.

4. Стандартное отклонение Z стабильно и не меняется при изменении горизонтального угла и зависит только от расстояний. Для получения высокой точности в направлении Z расстояние между тахеометром и контрольной точкой должно быть как можно меньше.

2.3 Определение места размещения деформационных марок на основе предрасчета деформированного состояния грунтовой выемки

Приведенный выше анализ позволяет ориентироваться при выполнении непосредственных измерений. Не менее важным моментом в мониторинге деформаций является определение мест размещения деформационных марок, а также поиск места расположения АТС вне зоны влияния строящегося объекта.

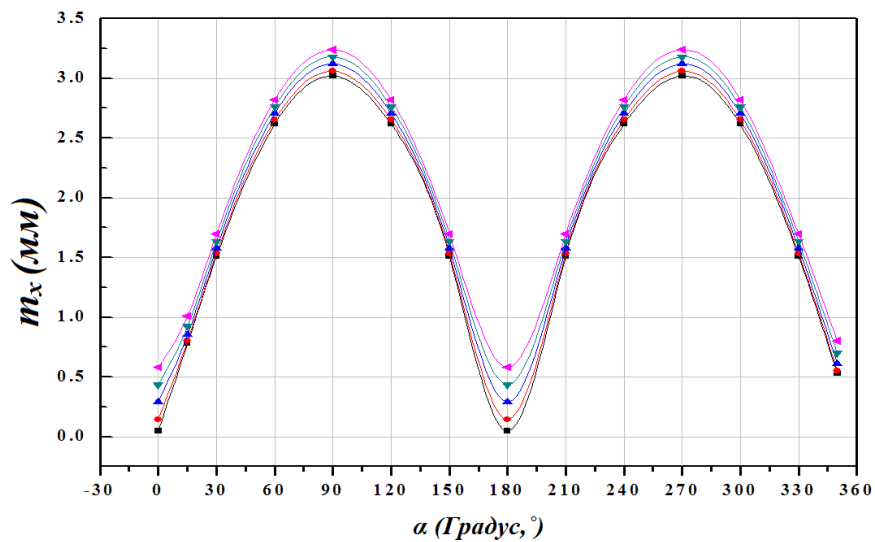
Разработанный автоматизированный алгоритм оптимизации расположения тахеометрической станции непосредственно на объекте съемки следует применять с учетом деформаций строящегося сооружения. В нормативных документах рекомендуется располагать исходные пункты и тахеометрические станции вне зоны влияния строящегося объекта [19, 20, 22, 79, 80]. 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 [25, 55]. Не менее значимой задачей является определение наиболее чувствительных или репрезентативных областей испытуемого объекта, где следует размещать деформационные марки. В противном случае получается либо их избыточность, либо недостаточность.

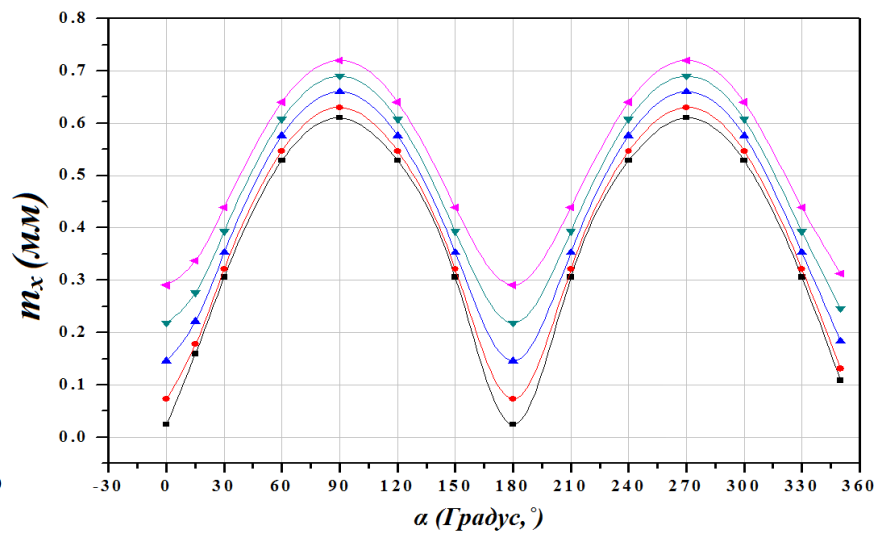
Таблица 2.8 – Значения точности положения точки P при вариации S и α и γ равно нулю в мм

<i>S переменная α переменная $\gamma = 0$</i>															
	<i>S = 10 м</i>			<i>S = 30 м</i>			<i>S = 60 м</i>			<i>S = 90 м</i>			<i>S = 120 м</i>		
α°	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
0	0,0242	0,6100	0,0485	0,2182	0,6900	0,4363	0,2909	0,7200	0,5818	0,2182	0,6900	0,4363	0,2909	0,7200	0,5818
15	0,1596	0,5892	0,0485	0,2762	0,6689	0,4363	0,3372	0,6995	0,5818	0,2762	0,6689	0,4363	0,3372	0,6995	0,5818
30	0,3057	0,5284	0,0485	0,3933	0,6074	0,4363	0,4394	0,6403	0,5818	0,3933	0,6074	0,4363	0,4394	0,6403	0,5818
60	0,5284	0,3057	0,0485	0,6074	0,3933	0,4363	0,6403	0,4394	0,5818	0,6074	0,3933	0,4363	0,6403	0,4394	0,5818
90	0,6100	0,0242	0,0485	0,6900	0,2182	0,4363	0,7200	0,2909	0,5818	0,6900	0,2182	0,4363	0,7200	0,2909	0,5818
120	0,5284	0,3057	0,0485	0,6074	0,3933	0,4363	0,6403	0,4394	0,5818	0,6074	0,3933	0,4363	0,6403	0,4394	0,5818
150	0,3057	0,5284	0,0485	0,3933	0,6074	0,4363	0,4394	0,6403	0,5818	0,3933	0,6074	0,4363	0,4394	0,6403	0,5818
180	0,0242	0,6100	0,0485	0,2182	0,6900	0,4363	0,2909	0,7200	0,5818	0,2182	0,6900	0,4363	0,2909	0,7200	0,5818
210	0,3057	0,5284	0,0485	0,3933	0,6074	0,4363	0,4394	0,6403	0,5818	0,3933	0,6074	0,4363	0,4394	0,6403	0,5818
240	0,5284	0,3057	0,0485	0,6074	0,3933	0,4363	0,6403	0,4394	0,5818	0,6074	0,3933	0,4363	0,6403	0,4394	0,5818
270	0,6100	0,0242	0,0485	0,6900	0,2182	0,4363	0,7200	0,2909	0,5818	0,6900	0,2182	0,4363	0,7200	0,2909	0,5818
300	0,5284	0,3057	0,0485	0,6074	0,3933	0,4363	0,6403	0,4394	0,5818	0,6074	0,3933	0,4363	0,6403	0,4394	0,5818
330	0,3057	0,5284	0,0485	0,3933	0,6074	0,4363	0,4394	0,6403	0,5818	0,3933	0,6074	0,4363	0,4394	0,6403	0,5818
350	0,1086	0,6007	0,0485	0,2460	0,6806	0,4363	0,3126	0,7109	0,5818	0,2460	0,6806	0,4363	0,3126	0,7109	0,5818

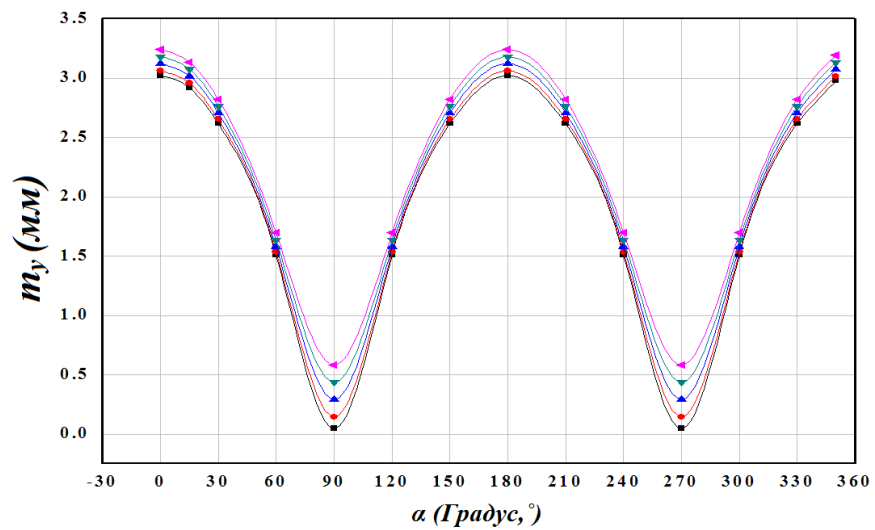
TS 1



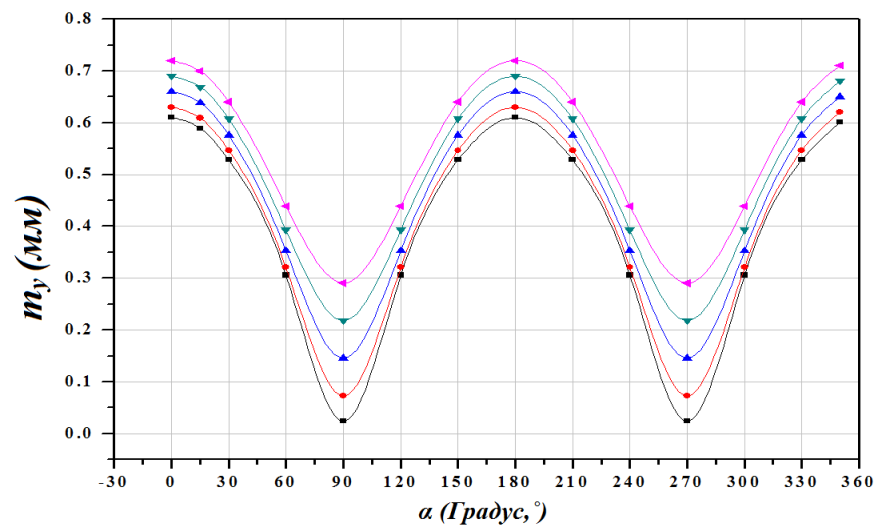
TS 2



TS 1



TS 2



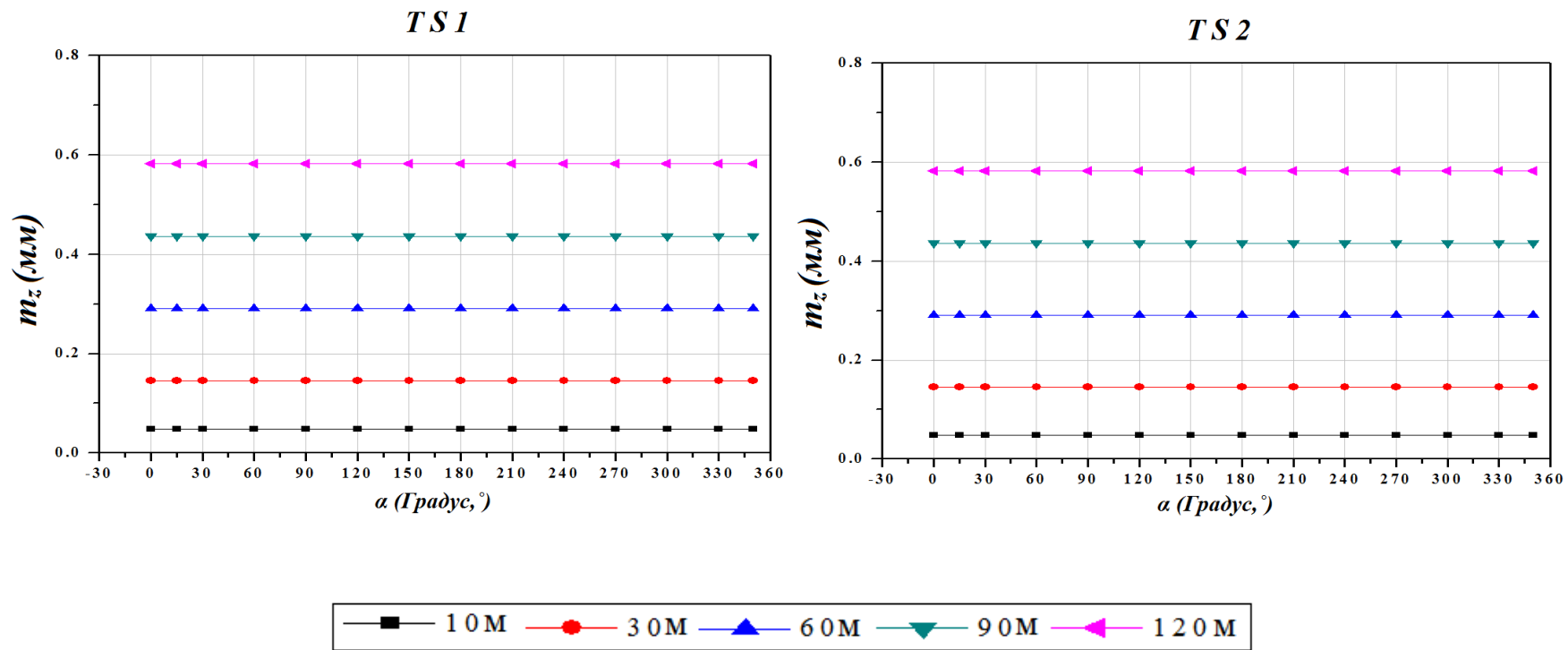


Рисунок 2.13 – Зависимости точности положения точки P от расстояния и горизонтального угла

2.3.1 Геомеханический анализ, цель и требования проектирования

При наблюдениях за деформациями обычно руководствуются нормативными документами (подробнее см. главу 1), по которым выделяют относительно стабильную область земной поверхности, где впоследствии размещаются исходные пункты. Далее в ходе измерений применяют методы оценки стабильности исходных реперов, выявляют наиболее стабильный, от которого ведется передача отметок. При использовании стационарных АТС задача становится сложнее, ответственнее и для нахождения неподвижных участков приходится использовать геомеханический анализ. Кроме того, эффективное размещение деформационных марок также следует выполнять на основе геомеханической оценки.

В последние годы, благодаря бурному развитию компьютерных технологий, появился целый ряд программных продуктов для инженеров по геомеханическому анализу (например, <https://www.plaxis.ru/>, ПК «НЕДРА» [62-66, 91, 140]). Кроме того, возникли большие возможности к самостоятельной разработке программных комплексов на основе рекомендаций, изложенных в технической литературе.

2.3.2 Определение зоны влияния строящегося объекта и мест размещения деформационных марок

Метод конечных элементов (МКЭ) – один из самых популярных методов, используемых для моделирования напряженно-деформированного состояния физических объектов, в том числе массива горных пород (грунтов), вмещающего разные выработки [29, 31, 74, 140, 161]. МКЭ используют для решения разнообразных задач, в том числе для определения зон влияния выработок на земную поверхность [29, 64-66].

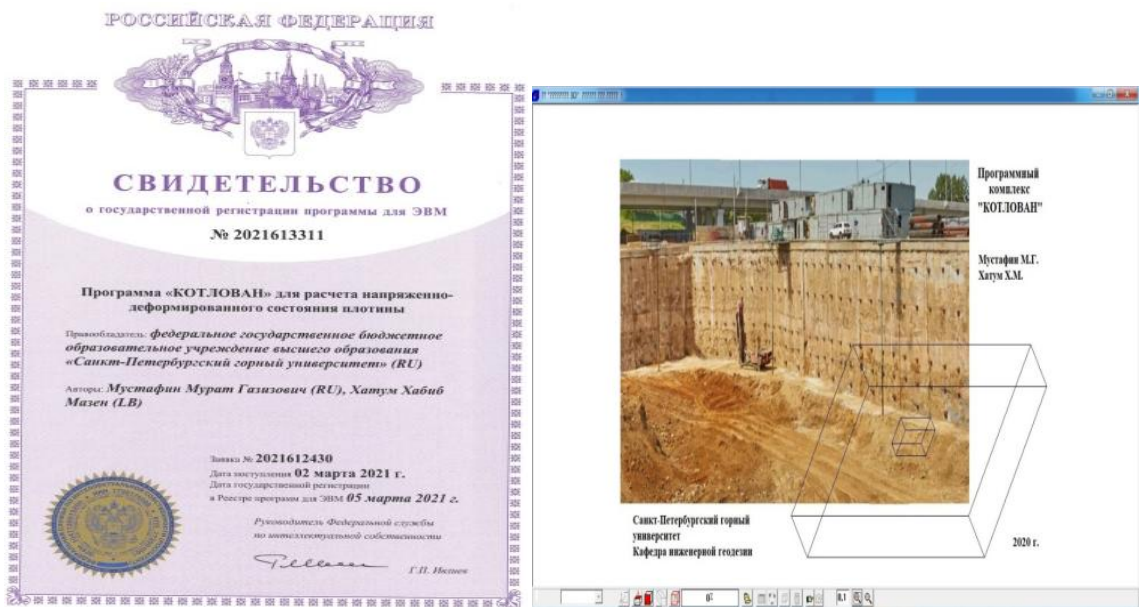
Автором разработан программный комплекс «Котлован» (см. рисунок 2.14 а и б) [83], реализующий МКЭ применительно к оценке смещений грунтового массива. В ПК «Котлован» вводятся размеры модели, размеры грунтовой выемки, физико-механические характеристики массива грунта. Программа по этим

данном разбивает область на конечные элементы и рассчитывает смещения грунтового массива.

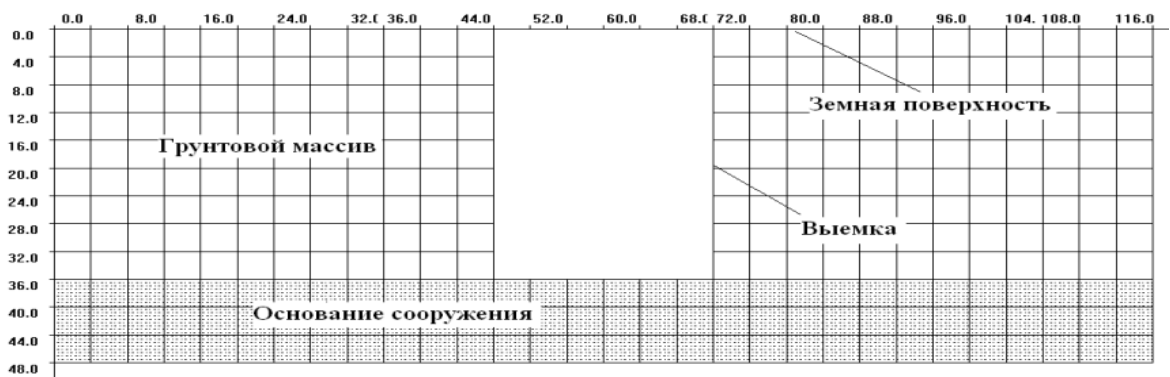
В итоге на основе приведенных выкладок деформационные марки были размещены в средней части выемки, где по геометрическим условиям ожидаются наибольшие деформации. По вертикали заложены четыре ряда марок через шесть метров с отступом от земной поверхности на 4 м. Таким образом, деформационные марки охватывали всю зону максимальных смещений пород в боковых обнажениях выемки (см. рисунок 2.1 г).

(а)

(б)



в)



г)

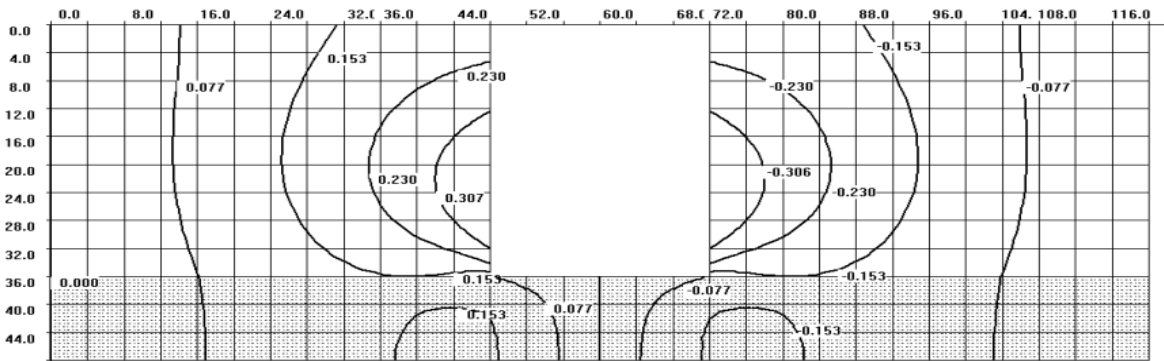


Рисунок 2.14 – Программа «Котлован» (а – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, б– Интерфейс) и результаты моделирования смещений боковых обнажений выемки в данной программе (в – модель выемки, г– распределение горизонтальных смещений в приконтурном к выемке массиве)

Также следует отметить, что зона влияния также определяется на основе геомеханического моделирования. На рисунке 2.14 г прогнозируемая горизонтальная деформация значительно уменьшается на расстоянии по горизонтали 30 м от периметра выемки. Исходные точки должны быть распределены и размещены вне установленной зоны влияния для обеспечения их устойчивости.

2.4 Прогноз деформирования грунтовой выемки по данным геодезических измерений

Определение деформации в определенный период – важная задача, иллюстрирующая состояние контролируемого объекта. Однако также важно прогнозирование развития деформаций.

Геодезические наблюдения – это прямой способ измерения смещения и деформации. Сравнение собранных данных с исходными в эпоху «0» приводит к определению величины и направления деформации. Кроме того, моделирование полученных результатов и моделирование данных предыдущего опыта позволяет прогнозировать будущее состояние контролируемого объекта.

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 она достоверна.



Рисунок 2.15 – Схема по определению деформаций по результатам измерений

На рисунке 2.15 схематично показано, как выделяется разница между эллипсом и кругом доверия. При этом рассматриваются все измерения: те стандартные отклонения, которые вписываются в «зеленую зону» (положительная зона), принимаются как систематическая ошибка, а те, которые превышают значение радиуса и вписываются в «серую зону» эллипса (отрицательная зона), считаются деформацией.

Результаты деформации можно экспортировать в числовом и графическом виде. А поскольку вопрос прогнозирования будущей деформации исследуется, то для построения траектории деформации следует использовать графическое представление обработанных данных о деформации. Эти прогнозы можно проверить в следующую эпоху (циклы) наблюдений. В случае их подтверждения эти параметры сохраняются для использования в будущем. В противном случае предыдущий анализ пересматривается в соответствии с вновь полученными результатами, а затем параметры обновляются и применяются к новому прогнозу.

В таблицах 2.9 и 2.10 полученные значения деформации сравниваются с кругом достоверности, вычисленным из ковариационной матрицы исходного наблюдения по формулам (2.11):

Таблица 2.9 – Эллипс и круг для 95% степени достоверности

Деф. Марк №	95% степени достоверности эллипса и круга							
	Априорные				Апостериорные			
	<i>a</i> (мм)	<i>b</i> (мм)	<i>r</i> (мм)	Φ (Градус)	<i>a</i> (мм)	<i>b</i> (мм)	<i>r</i> (мм)	Φ (Градус)
A	2,54	0,82	1,44	64,72835	1,03	0,33	0,58	64,72835
B	2,50	0,86	1,46	59,47089	1,01	0,34	0,59	59,47089
C	2,45	0,82	1,42	53,29944	0,99	0,33	0,57	53,29944
D	2,69	0,79	1,46	63,99574	1,09	0,32	0,59	63,99574
E	2,65	0,84	1,50	60,35650	1,07	0,34	0,60	60,35650
F	2,60	0,82	1,46	55,77647	1,05	0,33	0,59	55,77647

После расчета пороговых значений для каждой деформационной марки собранные геодезические наблюдения сравниваются с этими пороговыми значениями, и получаются следующие результаты (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Результаты сравнения измеренных данных с радиусом круга для 95% степени достоверности

Эпоха 1				Априорные			Апостериорные		
Деф. Марк №	ΔX (мм)	ΔY (мм)	ΔXY (мм)	<i>r</i> (мм)	Деф. (мм)	Статус Марка	<i>r</i> (мм)	Деф. (мм)	Статус Марка
A	-0,10	0,00	0,10	1,44	-1,34	Стабильный	0,58	-0,48	Стабильный
B	0,00	-0,10	0,10	1,46	-1,36	Стабильный	0,59	-0,49	Стабильный
C	0,30	0,30	0,42	1,42	-0,99	Стабильный	0,57	-0,15	Стабильный
D	-0,10	-0,10	0,14	1,46	-1,32	Стабильный	0,59	-0,45	Стабильный
E	5,75	2,75	6,37	1,50	4,88	Деф	0,60	5,77	Деф
F	-0,50	-0,30	0,58	1,46	-0,88	Стабильный	0,59	-0,01	Стабильный
Эпоха 2				Априорные			Апостериорные		
Деф. Марк №	ΔX (мм)	ΔY (мм)	ΔXY (мм)	<i>r</i> (мм)	Деф. (мм)	Статус Марка	<i>r</i> (мм)	Деф. (мм)	Статус Марка
A	-0,38	-0,70	0,79	1,44	-0,65	Стабильный	0,58	0,21	Деф
B	-0,40	-0,60	0,72	1,46	-0,74	Стабильный	0,59	0,13	Деф
C	0,00	-0,35	0,35	1,42	-1,07	Стабильный	0,57	-0,22	Стабильный
D	1,20	0,48	1,29	1,46	-0,17	Стабильный	0,59	0,70	Деф
E	6,20	2,95	6,87	1,50	5,37	Деф	0,60	6,26	Деф
F	0,55	0,30	0,63	1,46	-0,84	Стабильный	0,59	0,04	Деф

Сравнение, приведенное в таблице 2.9, показывает, что только расчет Δ_X и Δ_Y не отражает реальной деформации или смещения, т.к. имеются систематическая ошибка и ошибка измерения. Поэтому, чтобы устранить эти ошибки и отличить их от реальной деформации, рекомендуется сравнить векторную Δ_{XY} с рассчитанным радиусом с доверительной вероятностью 95% (r ; порог).

Поскольку результаты могут быть представлены в табличной и графической форме, а анализ может быть легко выполнен графически, то данные таблицы 2.10 также представлены на рисунке 2.16.

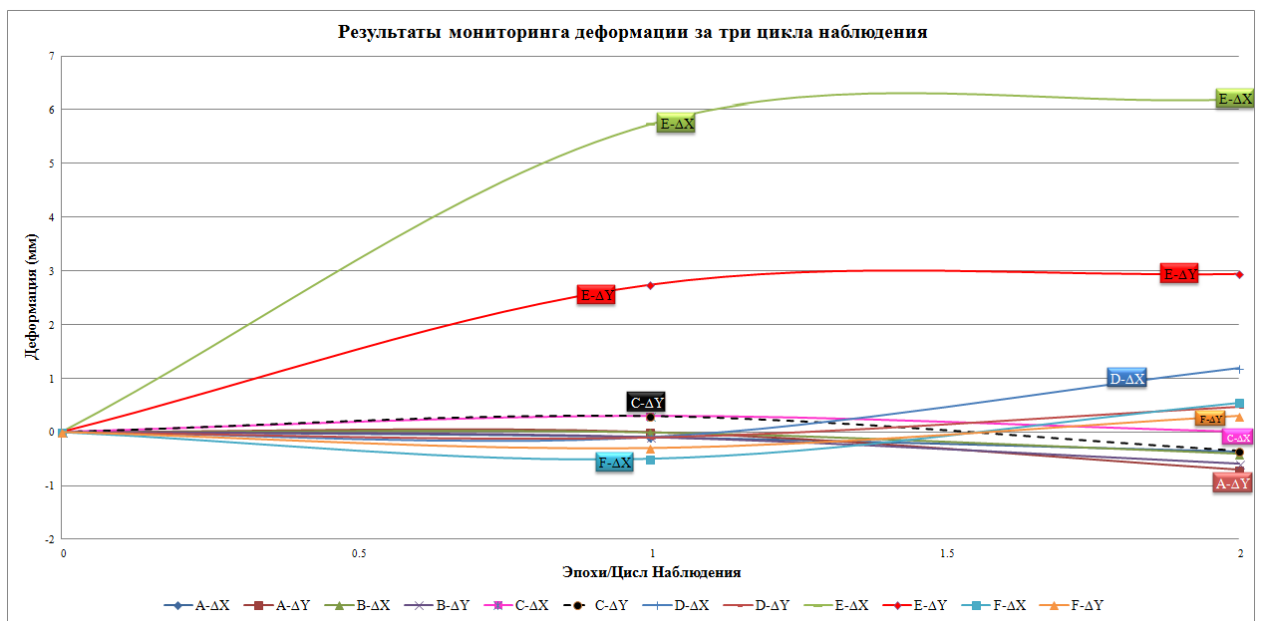


Рисунок 2.16 – Результаты мониторинга деформации за три цикла наблюдения

Кривые, показанные на рисунке 2.16, иллюстрируют данные, представленные в табличной форме (таблица 2.10), однако анализ графика отличается и ясно показывает, что марка E , взятой в качестве наглядного примера, имеет тенденцию к состоянию стабильности.

При сравнении значений с их начальными в эпоху (цикл) «0» было показано, что марка E претерпела абсолютную деформацию во 2 цикле. С другой стороны, график показывает, что между циклом 1 и 2 эта марка была стабильной, но испытывала относительные деформации.

Сравнение между двумя эпохами (1 и 2) приводится в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Результаты сравнения между эпохой 1 и эпохой 2

<i>Эпоха 2 – Эпоха 1</i>				Априорные			Апостериорные		
<i>Деф. Марк №</i>	ΔX (мм)	ΔY (мм)	ΔXY (мм)	<i>r</i> (мм)	<i>Деф.</i> (мм)	<i>Статус</i> <i>Марка</i>	<i>r</i> (мм)	<i>Деф.</i> (мм)	<i>Статус</i> <i>Марка</i>
<i>A</i>	-0,28	-0,70	0,75	1,44	-0,69	Стабильный	0,58	0,17	Деф
<i>B</i>	-0,40	-0,50	0,64	1,46	-0,82	Стабильный	0,59	0,05	Деф
<i>C</i>	-0,30	-0,65	0,72	1,42	-0,70	Стабильный	0,57	0,14	Деф
<i>D</i>	1,30	0,58	1,42	1,46	-0,04	Стабильный	0,59	0,83	Деф
<i>E</i>	0,45	0,20	0,49	1,50	-1,00	Стабильный	0,60	-0,11	Стабильный
<i>F</i>	1,05	0,60	1,21	1,46	-0,25	Стабильный	0,59	0,62	Деф

Анализ графика 2.16 был подтвержден сравнением эпох 1 и 2 в таблице 2.11. Кроме того, это сравнение показывает, что даже марка *C* ошибочно считалась стабильной. *C* меняет направление деформации, и тогда абсолютная деформация (Δ_{XY}) неверно отразила стабильность этой марки.

На основании проведенного эксперимента и его анализа можно сделать некоторые выводы:

1. Сравнение с начальными наблюдениями эпохи «0» обязательно для определения деформации, но недостаточно для определения ее вида.
2. Сопоставление полученных результатов с радиусом круга доверия также необходимо для определения того, отражают ли полученные значения систематические ошибки или реальную деформацию.
3. Сравнение результатов между эпохами – лучший способ отслеживать траекторию и направление деформации и затем прогнозировать будущую деформацию.
4. Графическое представление позволяет лучше прогнозировать будущую деформацию.

2.5 Выводы по второй главе

Решены поставленные задачи, необходимые для геодезического контроля деформаций, проектирования геодезической и деформационной сети, определения местоположения наблюдательных станций и деформационных марок

и прогноза деформации на основе геодезических измерений. Основные выводы, которые следуют из этой главы:

1. Методика оптимизации местоположения станции наблюдения, ведущая к повышению точности положения, была разработана и проверена на тестовых примерах. Разработанная методика основана на традиционной обратной засечке для определения наилучшей геометрии геодезической сети. Моделирование схемы сети позволяет рассмотреть множество вариантов и выбрать предпочтительные углы и расстояния между станцией наблюдения и исходными пунктами. Новая разработанная методика включает разработку математических моделей на основе метода наименьших квадратов; Анализ каждой матрицы в этом математическом подходе позволяет обнаруживать и определять параметры деформации, такие как точность, эллипс ошибки, а также координаты станции наблюдения. Новый разработанный метод позволяет также обнаружить смещения в исходных пунктах геодезической сети путем сравнения остаточных матриц в разных циклах наблюдений.

2. Анализ точности положения наблюдательной станции показывает, что использование упрощенного метода (традиционного метода) очень ограничено и зависит от множества условий, которые очень трудно реализовать на практике. Кроме того, использование метода наименьших квадратов показывает его эффективность при определении координаты пункта наблюдения и оценке точности его местоположения, а также гарантирует одинаковую точность в течение всего периода мониторинга.

3. Исследовано распределение деформационных марок на контролируемом объекте (выемка грунта). Для этих целей разработан программный комплекс по расчету деформаций «Котлован» с использованием метода конечных элементов. Проведено моделирование в ПК «Котлован». Получено распределение горизонтальных смещений в массиве горных пород, прилегающих к выемке. Этот расчет позволяет определить области в обнажении выемки, в которые следует размещать деформационные марки. Кроме того,

определяется зона влияния; исходные точки должны быть размещены за пределами этой зоны для обеспечения их устойчивости.

4. Проведен анализ результатов с помощью предложенной методологии, который оказался очень эффективным при определении деформации, различении систематических ошибок или ошибок измерения от реальной деформации путем сравнения с расчетными пороговыми значениями, такими как радиус круга с доверительной вероятностью 95%. Кроме того, сравнение данных с исходными в эпоху «0» оказывается недостаточным, а сравнение последовательных эпох дает дополнительные указания и помогает сделать правильные выводы. Кроме того, сочетание чисел и графиков позволяет лучше понять процесс деформации и позволяет прогнозировать будущую деформацию.

5. По результатам исследований, представленных в данной главе, были сформулированы два научных положения:

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.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ ГРУНТОВОЙ ВЫЕМКИ ПОД ВЕСТИБЮЛЬ МЕТРО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТАХЕОМЕТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

В отличие от формулировки механики, в геодезии деформация – это изменение положения грунтов или конструкций, определяемое по вертикальным и горизонтальным перемещениям в сравнении с первоначальным положением (ГОСТ 24846-2012 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений) [19, 20]. Исторически это связано с разностью подходов к исследованию деформационного процесса. Механиков интересует весь процесс деформирования материальных тел. Геодезисты фиксируют лишь определенные фрагменты, конечные результаты деформационного процесса, т.е. сами деформации – ведь наблюдаемые смещения, отнесенные к определенному объему и есть деформация. В то же время по зафиксированным смещениям возможно перейти к причинам их вызвавшим. Таким образом более качественная оценка деформационного процесса видится во все большем сочетании механики и геодезии. Прогнозирование по геодезическим данным различных видов деформаций тел, таких как прогибы, наклоны, кручение и скручивание, дает возможность своевременного предупреждения повреждений или разрушений конструкций и является вопросом, который необходимо исследовать [15, 64, 92, 139]. Кроме того, фактическая, на основе геодезических измерений, оценка деформаций является надежным критерием правильности теоретических прогнозов [31, 49, 28, 92].

С учетом изложенного проектирование наблюдений за деформациями целесообразно начинать с предварительного анализа деформированного состояния грунтового массива [29]. Этот предварительный анализ позволяет уточнить зону влияния строящегося объекта и разместить исходные репера вне этой зоны [19-22, 141, 130, 136]. Другим важным моментом является расположение деформационных марок. Их распределение должно покрывать

области деформации, где ожидается их концентрация. Далее задача – оптимизация конфигурации опорной или квазиопорной сети. Здесь под опорной сетью понимается пункты долговременные, закладываемые на глубину ниже отметки промерзания грунта или до коренных пород. В последнее время для выполнения мониторинговых наблюдений на относительно небольшое время используют квазиопорную сеть, представляющую собой временные пункты (отражательные пленки и др.) Также следует тщательно подобрать место расположения самой тахеометрической станции, для чего следует выполнить оптимизационные расчеты [8, 33].

Разработка схема организации мониторинговых наблюдений за деформациями сооружений с использованием роботизированных тахеометров представляется актуальной научно-практической задачей.

3.1 Принципиальная схема геодезических наблюдений

Тенденция развития норм безопасной жизнедеятельности определяется в повышении контроля состояния среды. В этом смысле геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений становится все более востребованным [15, 92].

На рисунке 3.1 показана разработанная схема геодезического мониторинга, в которой присутствуют все этапы, описанные выше, позволяющие качественную его реализацию.

При строительстве возможны различные проблемные вопросы, которые существенно уменьшаются в ходе изысканий и проектирования [51, 92]. Поэтому первоначальные исследования, расчеты и прогнозы являются наиболее важной частью любого мониторинга деформаций и смещений [28, 29]. Как показано на рисунке 3.1, диаграмма разделена на 3 основных этапа, начиная с проектирования деформационной сети, проведения геодезических измерений и заканчивая обработкой данных в качестве заключительного этапа в процессе мониторинга.

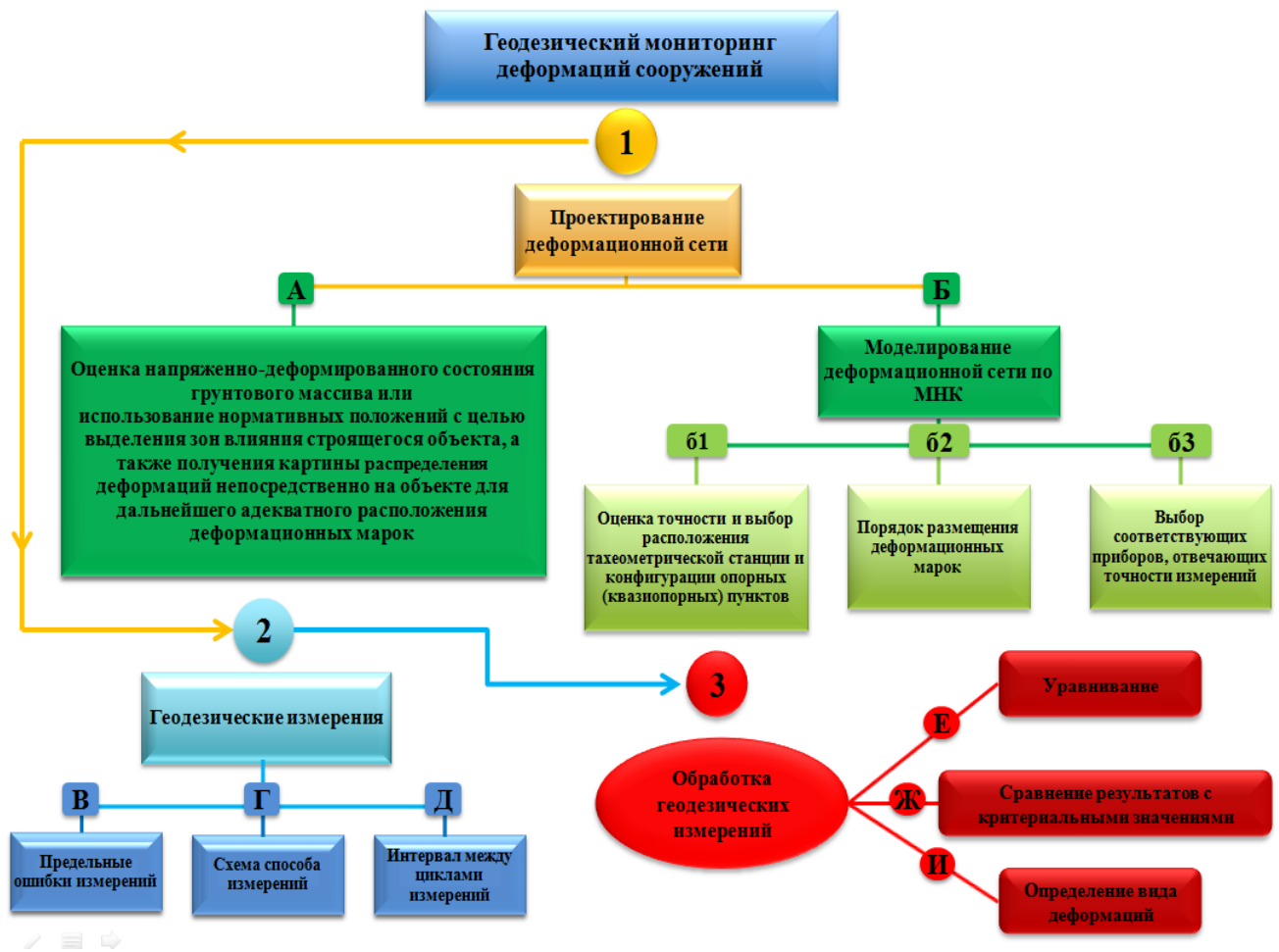


Рисунок 3.1 – Общая схема геодезического мониторинга деформаций сооружений

3.2 Описание основных пунктов схемы

3.2.1 Проектирование деформационной сети

(Первый этап; желтый цвет «1»)

Проблема значительных деформаций остро стоит при строительстве глубоких открытых выработок (котлованов), особенно в условиях городской застройки и создает серьезные угрозы безопасности жизнедеятельности. В этой связи необходимо углубленное изучение геомеханической ситуации, что является ключом к обеспечению безопасности как при строительстве конструкций, так и контроле [65]. Интерпретация деформационного процесса может отличаться в зависимости от местоположения деформационных марок. Поэтому, оптимизация размещения деформационных марок имеет важное значение на этапе проектирования деформационной сети [28, 29]. Строительство вестибюля

метрополитена с наличием грунтовой выработки (котлована) - хороший пример для совместного решения проблем инженерами геомеханиками и геодезистами [42, 139, 164]. При мониторинге большое внимание уделено первому этапу (см. рисунок 3.1, желтый цвет «1») и его подэтапам. Два подэтапа («А» и «Б») иллюстрируют необходимое сочетание геодезических измерений и геомеханических данных. Затем на основании нормативных документов (стандартов) или расчета и моделирования данных о грунте можно определить зону максимально вероятной деформации, а также зону влияния (подэтап «А»). Соответственно получают начальную картинку для размещения как деформационных марок, так и тахеометрических станций посредством моделирования процесса напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Также определена зона влияния, а опорные пункты расположены за пределами этой зоны. Применительно к проведению перманентных наблюдений этот раздел чрезвычайно важен в связи со стационарностью тахеометрической станции и невозможностью в прямом виде использовать существующие методики оценки устойчивости (стабильности) пунктов. Во второй главе приведена методика выявления зоны влияния.

Моделирование сети (*этап «Б»*) состоит из трех основных задач:

61) Оценка точности и выбор расположения тахеометрической станции и конфигурации опорных (квазиопорных) пунктов. Это также называется «оптимизация геодезической (опорной) сети». Эта оптимизация включает как распределение контрольных (квазиопорных) пунктов, так и расположение станций наблюдения (тахеометрические станции). Кроме того, квазиопорные точки распределены вне зоны влияния, определенной по геомеханическому анализу на этапе «А». Во второй главе показан разработанный автором алгоритм оценки точности положения АТС.

62) Порядок (места) размещения деформационных марок. Эта задача сильно зависит от геомеханических расчетов. Автором разработан ПК «Котлован», на основе которого возможно определение распределений

априорных деформаций обнажений грунтовой выемки, по которым можно определить наиболее характерные точки для размещений деформационных марок.

б3) Выбор соответствующих приборов, отвечающих точности измерений. Наиболее важной задачей на этом этапе является метод расчета, необходимый для определения координат и станций наблюдения (тахеометрические станции) и деформационных марок и проведения оценки их точности.

Перечисленные задачи тесно связаны между собой, а также с геомеханическим анализом, поэтому комбинация и моделирование данных необходимы.

На *подэтапе «б1»* выполняется оптимизация геодезической сети. Оптимизация геодезической сети включает минимизацию всех возможных ошибок, которые могут повлиять на измерение и контроль деформации.

Также на этом подэтапе определяется допустимая деформация и требуемая точность измерения; это определение позволяет лучше спроектировать схему сети в соответствии с требованиями и приводит к правильному выбору станции наблюдения. В нашем случае моделирование геометрии сети использовалось для проверки и обоснования допустимого диапазона углов при выполнении обратной засечки (угловой или линейно-угловой засечки) для получения зависимостей точности положения и выбора оптимальной конфигурации. Эксперимент проводился (во второй главе, раздел 2.1) для определения предпочтительных углов, которые будут использоваться при выполнении обратной засечки, и для рассматриваемого случая было обнаружено, что угол должен варьироваться от 60° до 120° для достижения максимальной точности положения точки. Это также называется допустимым диапазоном углов.

На этом этапе следует выбрать метод расчета координат и проведения оценки точности. Во второй главе, раздел 2.1, было проведено сравнение традиционного упрощенного метода и разработанного метода наименьших квадратов. Разработанный метод был рекомендован при мониторинге и анализе деформаций.

На *подэтапе «б2»* моделирование собранных данных о грунте и

предлагаемый дизайн конструкции и выемки приводит к правильному проектированию для выделения деформационных марок в опасной зоне, где деформация имеет очень высокую вероятность. Ясно показано взаимодействие геодезического и деформационного проектирования сети с надлежащим пониманием, расчетом и анализом, выполненным на этапе «А». Таким образом, глубокое исследование и различные симуляции геотехнических данных и схемы сети позволяют оптимизировать геодезическую сеть и сеть деформации, которые отвечают за обнаружение и определение деформации контролируемого объекта (в нашем случае котлована).

Подэтап «б3»: после определения необходимой точности положения станции наблюдения и деформационных марок в соответствии со стандартами и требованиями проекта определяются характеристики тахеометра (станции наблюдения). Хотя требуемая точность может быть достигнута за счет использования высокоточного тахеометра и проведения прямых измерений, во многих случаях используются геодезические приемы, которые позволяют использовать тахеометр с меньшей точностью, выполняя наблюдения из разных точек источника, а затем применяя метод наименьших квадратов для расчета координат и проведения оценки точности.

Эксперимент, проведенный в разделе 2.2 второй главы, показывает анализ наблюдений, проведенных с двумя разными тахеометрами, имеющими разную точность измерений. Результаты показывают изменение точности положения с изменением углов и расстояний. Было показано, что высокая точность может быть достигнута прямыми измерениями (только из одной исходной точки) с использованием высокоточного тахеометра, такого как Leica TM50 ($m_\alpha = 0.5''$, $m_\gamma = 1''$ и $m_S = \pm 0.6 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6}$), однако задача оптимизации геодезической сети и создания высокочувствительного мониторинга система открывает вопрос: «Можно ли повысить полученную точность?»

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо изучить различные факторы и устранить многие вероятные помехи для наблюдений. Две основные и

популярные причины ошибки наблюдения и ненадежности результатов происходят из-за аддитивной константы и смещения масштабного коэффициента.

Исследование аддитивной константы и смещения масштабного коэффициента

Аддитивная константа роботизированного тахеометра (или любого электрооптического дальномера) – это постоянное смещение измеряемых расстояний, вызванное отклонением (смещением) электрического источника, или "нуля", от вертикальной оси прибора. Существует также устойчивое смещение в призме, возникающее в результате преломления при прохождении сигнала через призмное стекло. Эти смещения объединяются для данной пары «устройство/отражатель». Все расстояния, измеренные затем через эту пару, должны быть скорректированы на основе этих смещений.

Масштабная погрешность роботизированного тахеометра может быть вызвана рядом факторов, но в первую очередь обусловлена генератором и излучающими и приемными диодами. Эта погрешность может быть определена либо путем прямой лабораторной калибровки (путем измерения частоты излучения, испускаемого прибором), либо путем сравнения измеренных расстояний со значениями, определенными более точным методом.

Поправка, применяемая к измеренным расстояниям для масштабной и аддитивной констант, находится с помощью уравнения (3.1):

$$d' = SF \cdot d_{obs} + a_{EDM} + a_{prism} \quad (3.1)$$

где d_{obs} – измеренное расстояние, м; SF – масштабный коэффициент, применяемый к измеренному расстоянию; a_{EDM} – аддитивная постоянная лазерного дальномера; a_{prism} – аддитивная постоянная призмы; d' – скорректированное расстояние, м.

Поправки на масштабную и аддитивную константу оказываются исключительно императивны и фундаментальны, если заменить инструмент или призму. Их значение заключается в поддержании согласованности в пределах набора данных путем компенсации отличий между различными инструментами и призмами.

3.2.2 Геодезические измерения

(Второй этап; синий цвет «2»)

После определения характеристик измерительного устройства и выбора соответствующего тахеометра измерения должны проводиться с высокой точностью, чтобы гарантировать надежные результаты с высокой степенью уверенности. Поэтому второй этап генеральной схемы разбивается на 3 подэтапа:

В) Предельные ошибки измерений. Здесь выводы, сделанные из экспериментов, проведенных на первом этапе «б1», и рекомендации должны быть применены и реализованы для уменьшения и минимизации всех возможных ошибок и достижения требуемой точности положения. При этом предельная ошибка измерений либо устанавливается из нормативных источников, либо вычисляется исходя из СКП измерений, либо выводится из комбинации, приведенных критериев.

Г) Схема способа измерений. Направления и расстояния измерения должны быть разработаны и представлены в виде четкой методологии, совместимой с разработанными математическими моделями и алгоритмами (см. рисунки 3.2 и 3.3).

Д) Интервал между циклами измерений. Определение этого параметра – одна из важнейших задач при проведении геодезических измерений и анализа полученных результатов.

На *подэтапе* «В» основной задачей является минимизация ошибок измерения до определенного предела. Для достижения этой задачи необходимо определить все источники ошибок, а также применить геодезические приемы, чтобы ошибки не превышали заданный порог.

Ошибку центрирования прибора и ошибку центрирования призмы вычисляют по (3.2):

$$m_{ц} = \frac{h \cdot 0,2 \cdot \tau}{\rho}, \quad (3.2)$$

где $m_{ц}$ – ошибка центрирования прибора (тахеометра и призмы); h – высота установки инструмента, в мм; τ – цена деления круглого уровня, $\tau = 8' = 480''$;

$\rho = 206265''$.

Для $h = 1500$ мм, $m_{\mu} = 0,7$ мм, таким образом, ошибка центрирования тахеометра и призмы $m_{\mu_0} = 2 \cdot m_{\mu}$. Поскольку в предлагаемой методике мониторинга тахеометр и призма устанавливаются и фиксируются в одних и тех же местах в течение всего периода мониторинга, то эти ошибки устраняются и исключаются из всех расчетов.

Допустимый диапазон углов и рекомендация по минимизации расстояния между станцией наблюдения и исходными точками и деформационными марками должны быть реализованы на этом этапе, таким образом повышается точность положения станции наблюдения и деформационных марок, а затем полученные результаты более конфиденциальны.

Подэтан «Г» отвечает за представление генерального плана контролируемой территории, на котором четко показаны вся геодезическая сеть, деформационные марки и зона влияния. Кроме того, в этом плане должна быть представлена методика измерения:

- 1) Определение координат съемочных пунктов P_1 и P_2 (см. рисунок 3.2).
- 2) Мониторинг и определение координат деформационных марок (см. рисунок 3.3).

На рисунках 3.2 и 3.3 показан пример необходимого мастер-плана, который был создан на основе всех экспериментов, расчетов, выводов и рекомендаций.

Такой чертеж является результатом предварительного анализа и этапа проектирования, а также считается основой для проведения геодезических измерений.

Подэтан «Д»: Первоначальное наблюдение и сбор данных в эпоху «0» сохраняются и называются «установлением исходного уровня». Эти наблюдения являются основным параметром, который будет сравниваться со всеми будущими измерениями.

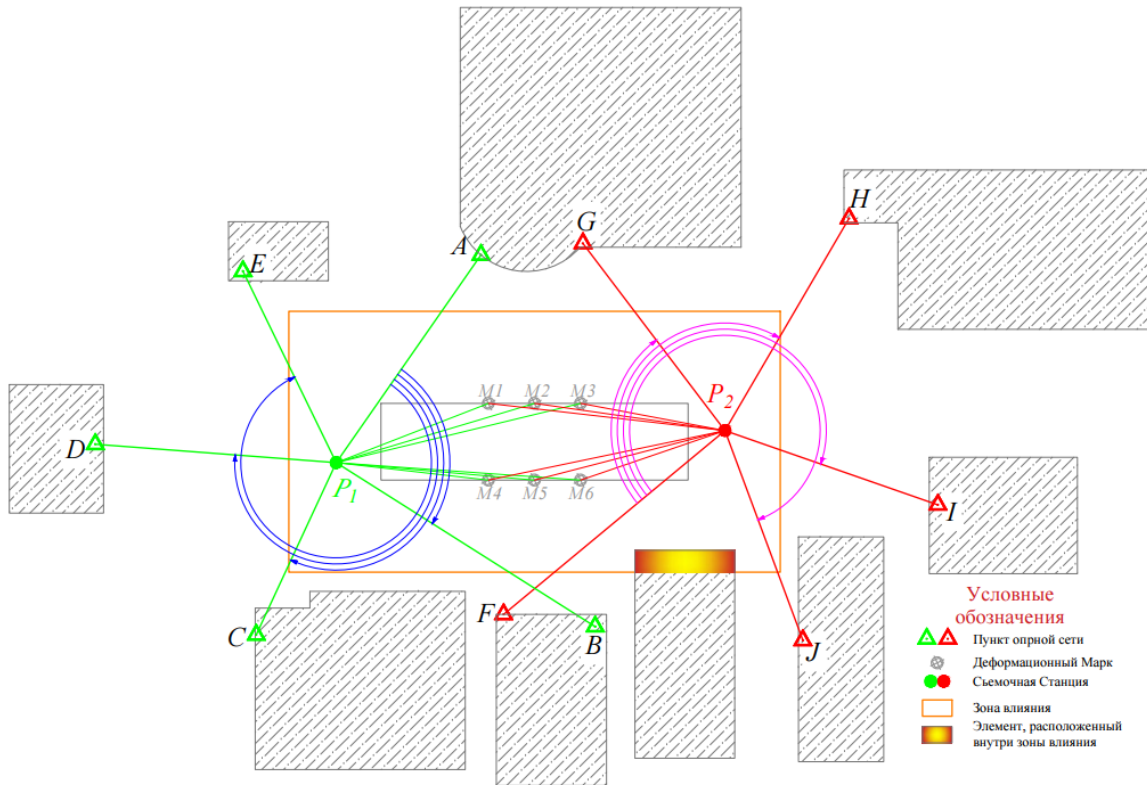


Рисунок 3.2 – Схема геодезических измерений для определения координат съёмочных станций P_1 и P_2

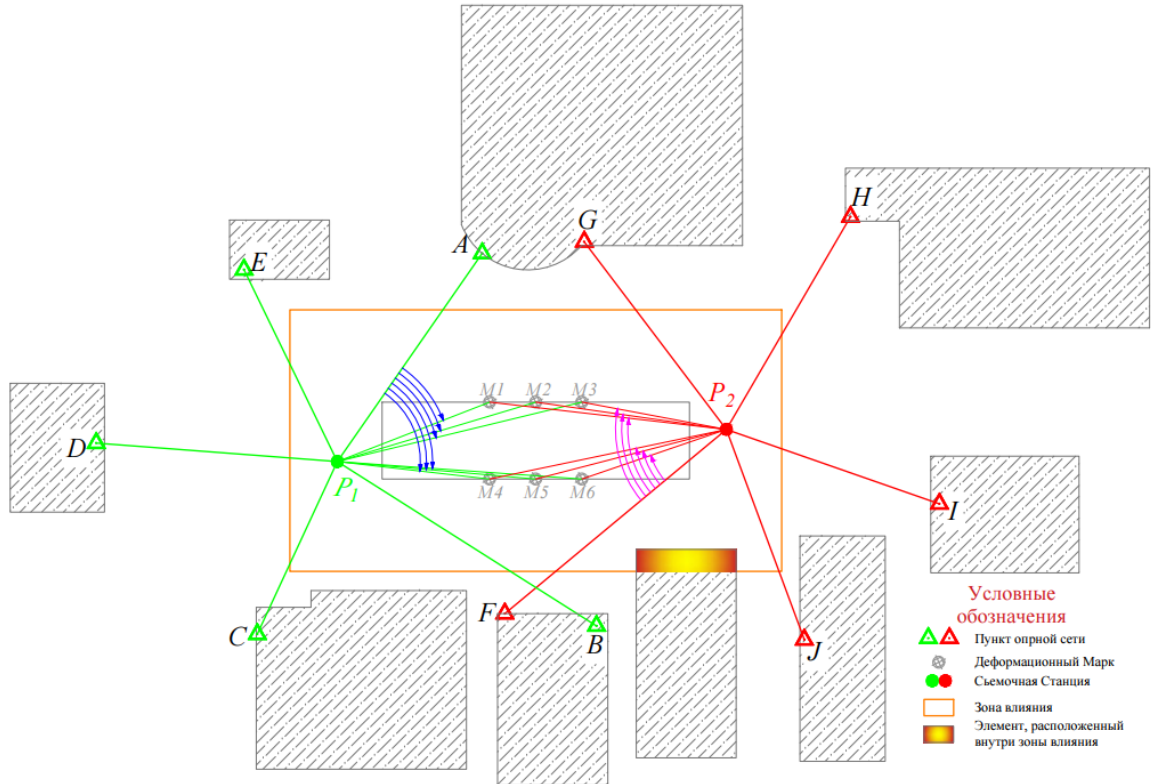


Рисунок 3.3 – Схема наблюдений за деформациями грунтовой выемки со съёмочных станций P_1 и P_2

Поскольку деформация может произойти в любой момент в условиях городской жизни, то выполнение перманентных наблюдений позволяет раннее их обнаружение, а также определение возможных сценариев развития деформационного процесса, что позволяет раннее предупреждение развития критического сценария. Подобные наблюдения на опасных объектах или в условиях городской застройки все более актуальны [19, 20, 60, 149]. Определение интервала между циклами наблюдения традиционно основывается на рекомендации нормативных документов и стандартов или расчетным путем. Однако в нормативных документах нет четких или строгих заявлений и методологии относительно циклов наблюдения. Обычно рекомендуется проводить наблюдения непосредственно перед началом выемки котлована. Тогда следующие циклы наблюдений зависят от рабочего процесса и процента выполненных земляных работ, но должны быть не менее четырех циклов (при 25, 50, 75 и 100% глубины котлована) [37].

Чтобы построить оптимальную систему мониторинга для раннего предупреждения и контроля деформации, разработан метод расчета и представлены подробные сведения обо всех взаимодействующих параметрах при определении интервала между циклами наблюдения. Заметим, что интервал разрабатывался на основе перманентных наблюдений для повышения экономической эффективности наблюдений.

Интервал между циклами геодезических наблюдений – это переменный параметр, который зависит от наблюдаемых деформаций, их скорости изменения в сравнении с допуском. Допустимая деформация делится на пороговые значения. В нашем случае были выбраны 3 значения:

- Уровень 1: $|\Delta| \leq 3\text{мм}$ → Желтая зона
- Уровень 2: $3\text{мм} < |\Delta| \leq 6\text{мм}$ → Оранжевая зона
- Уровень 3: $|\Delta| > 6\text{мм}$ → Красная зона

Эти пороговые значения позволяют осуществлять более раннее оповещение, прогнозировать будущую деформацию и применять планы действий в

чрезвычайных ситуациях.

Время T , необходимое для достижения максимальной деформации (красная зона), рассчитано с учетом допустимой деформации, точности измерений и скорости изменения деформации. Время T можно определить следующим образом (3.3):

$$T_{i+1} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta_{Max} - |\Delta_{i+1}|}{SF * \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_i} r_{\Delta_{i+1}} \right)} ; \text{ Когда } r_{\Delta_{i+1}} > 0 \\ \frac{\Delta_{Max} - |\Delta_{i+1}|}{SF * \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_i} r_{\Delta_i} \right)} ; \text{ Когда } r_{\Delta_{i+1}} = 0 \\ \infty = \text{Стадия стабильности;} \text{ Когда } r_{\Delta_{i+1}} = r_{\Delta_{i+2}} = L = r_{\Delta_{i+n}} = 0 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

где Δ_{Max} – допустимая деформация; Δ_{i+1} – деформация во второй эпохе наблюдений; SF – коэффициент безопасности; σ_i, σ_j – начальная и текущая точность измерений соответственно; $r_{\Delta_{i+1}}$ – скорость изменения или скорость деформации в определенную эпоху.

Время T должно быть рассчитано и пересмотрено, чтобы дать возможность заблаговременно подготовить и предложить решение или предоставить какой-либо план смягчения или чрезвычайный план. Однако интервал между наблюдениями связан со многими факторами и четко не указан в нормативных документах, поэтому определение значения интервала может быть основано на предыдущем опыте в аналогичных проектах или на основе алгоритма и должно быть умножено на коэффициент безопасности; последнее может привести к перегрузке системы и получению большего количества данных, чем требуется, но оно может быть скорректировано в течение периода мониторинга, чтобы сбалансировать количество и качество измерений. Значение T представляет собой время, оставшееся до достижения красной зоны деформации конструкции, поэтому его следует сравнить со временем, необходимым для выполнения проекта строительства.

Следующее условие вводится в качестве предварительного для определения интервала между циклами наблюдений (3.4):

$$N_i = \left\{ \begin{array}{l} 1^2 \quad ; \quad \text{Когда} \quad 0 < \left(\left| \frac{\Delta_i}{\Delta_{Max}} \right| * 100 \right) < 25 \\ 2^2 \quad ; \quad \text{Когда} \quad 25 \leq \left(\left| \frac{\Delta_i}{\Delta_{Max}} \right| * 100 \right) < 50 \\ 3^2 \quad ; \quad \text{Когда} \quad 50 \leq \left(\left| \frac{\Delta_i}{\Delta_{Max}} \right| * 100 \right) < 75 \\ 4^2 \quad ; \quad \text{Когда} \quad 75 \leq \left(\left| \frac{\Delta_i}{\Delta_{Max}} \right| * 100 \right) \leq 100 \end{array} \right. \quad (3.4)$$

где N – количество наблюдений в неделю при раскопках; Δ_i – деформация в эпоху i .

Упомянутые значения завышены для обеспечения безопасности проекта, однако потребность в автоматизации выявляется минимальной, а количество наблюдений уменьшается, когда раскопки достигают конечной фазы, а строительство в это время будет играть роль поддержки массива горных пород. Таким образом, в этот момент наблюдения могут проводиться согласно условиям ниже:

$$\text{Интервал} = \left[\begin{array}{l} \text{Один раз / неделю; За первый месяц} \\ \text{Один раз / месяц; (За второй месяц) если } 0 \text{ мм} \leq \Delta_j - \Delta_i < 1 \text{ мм} \\ \text{Один раз / 3 месяца; если } 0 \text{ мм} \leq \Delta_k - \Delta_i < 1 \text{ мм} \\ \text{Один раз / 6 месяцев; если } 0 \text{ мм} \leq \Delta_l - \Delta_i < 1 \text{ мм} \\ \text{Один раз / год; если } 0 \text{ мм} \leq \Delta_n - \Delta_i < 1 \text{ мм} \end{array} \right]$$

3.2.3 Обработка геодезических измерений

(Третий этап; красный цвет «3»)

Обработка геодезических измерений выбрана красным цветом, потому что на этом этапе выполняется весь анализ с интерпретацией результатов измерений, построением графиков, чтобы определить фактическую деформацию в виде значения и направлений действия. Весьма ответственный раздел, так как

ошибочная интерпретация результатов может привести к неправильному пониманию процесса деформации и может вызвать ложную тревогу опасности или наоборот ложное состояние устойчивости контролируемого объекта.

После проведения геодезических наблюдений данные должны пройти три этапа до тех пор, пока окончательный вид деформации не будет определен и представлен в отчете.

На этапе уравнивания (**подэтап «Е»**) надежность результатов исследуется посредством проверки геодезических данных (чисел, графиков и т.д.) и путем пересмотра действий, выполненных в этот конкретный период времени (в соответствующую эпоху). Комбинация всех собранных данных, даже из разных типов (количественных и качественных), необходима для уравнивания результатов мониторинга, а затем и в анализе деформации.

Кроме того, на этом этапе (подэтап «Е») также выявляется наличие грубых ошибок измерений. Они могут быть разными причинами, от физического воздействия на деформационную марку, до или какой-либо помехи измерений. Уравнивание измерений является отправной точкой процесса анализа деформации, где происходит первоначальная очистка данных, необходимая для следующего этапа «Ж».

Подэтап «Ж»: После того, как результаты наблюдений откорректированы от любых грубых ошибок и уравнены, они готовы к анализу.

В разделе 2.4 второй главы был представлен рекомендуемый метод сравнения результатов, полученных в любую эпоху, с критическими порогами. Также было оправдано сравнение данных последовательных эпох. Следовательно, на этом этапе вычисляются Δ_x , Δ_y и Δ_{xy} , а затем сравниваются с радиусом круга для 95% степени достоверности, вычисленным на основе измерений эпохи «0». Это сравнение позволяет отличить величину деформации от ошибки наблюдения.

После проведения сравнения и необходимых расчетов результат представляется в двух формах – табличной и графической. Затем выполняется анализ и интерпретация на основе сравнения с допустимым и критическим порогами деформации.

Результатами этого этапа являются ответы на следующие вопросы:

- 1) Деформация есть или нет?
- 2) Превышает ли деформация критические пороги?
- 3) Скорость изменения или скорость деформации в данную эпоху увеличивается или уменьшается?

Ответы на все поставленные вопросы, помимо расчетного значения и направления деформации, отвечают за обновление интервала между циклами измерения и прогнозирование будущей деформации.

Наконец, результаты мониторинга и приведенные выше интерпретации и уравнивание данных должны определить вид деформации. Таким образом, завершающим подэтапом общей схемы является этап «И», на котором происходит окончательный вывод обработки данных деформации.

Подэтап «И» – это окончательный результат, на основе которого будут происходить все будущие действия.

На этом этапе сообщается об устойчивости контролируемого объекта. В соответствии с пороговыми значениями и пределами деформации, планы действий в чрезвычайных ситуациях, уже подготовленные на этапе проектирования, должны быть реализованы в случае значительной деформации. Однако в случае стабильности собранные данные должны быть сохранены и выделены для проверки и сравнения с будущими данными мониторинга, которые будут собраны в следующем цикле наблюдений.

Количественные параметры являются основными показателями в любом исследовании и процесс деформации определяется в виде комбинации измеренных величин и физических закономерностей, показывающих вид деформации: сжатие, растяжение, перемещение, вращение и т.д., а также превышение критических значений и разрушение конструкции.

Таким образом, приведенная система мониторинга обеспечивает получение необходимой информации для оценки состояния грунтовой выемки и принятия решений по устранению возможных негативных сценариев развития деформационного процесса.

3.3 Выводы по третьей главе

В настоящей главе представлена общая схема геодезического мониторинга деформаций сооружений и подробно описаны все этапы представленной схемы. Основные выводы следующие:

1. Разработана методика проведения геодезического мониторинга деформированного состояния грунтовой выемки, которая может быть использована для иных инженерных сооружений. В методике продемонстрировано совместное использование геодезических принципов с геомеханическими. Использование компьютерного моделирования деформаций и проектирование геодезической деформационной сети позволяют оптимизировать сеть мониторинга и определять координаты съемочной точки (тахеометра) и координаты деформационных марок наиболее эффективно.

2. На основе анализа перманентных наблюдений выявлен возможный интервал между циклами наблюдения, который может обновляться в зависимости от процесса деформации.

3. Разработанная методика геодезического мониторинга на основе перманентных наблюдений помимо оценки деформаций позволяет прогнозировать будущее состояние контролируемого объекта в следующем цикле наблюдений. Этот прогноз следует сравнить с фактическими данными соответствующей эпохи, чтобы проверить правильность используемых (предполагаемых) параметров. Если прогнозируемая модель и фактические данные схожи или соответствуют друг другу до определенного уровня достоверности, то параметры проверяются и могут использоваться для прогнозирования в будущем. Однако, если валидационный тест не проходит, параметры следует исправить и снова протестировать до тех пор, пока они не будут соответствовать фактическим данным, тогда следует найти причину неточного допущения параметров. Этот процесс подобен самообучению в нейронных сетях.

ГЛАВА 4 ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА КОНКРЕТНОМ ОБЪЕКТЕ ИНЖЕНЕРНОГО СООРУЖЕНИЯ

Проведенные экспериментальные исследования в предыдущих главах интегрированы в практическую реализацию на конкретном объекте для контроля его деформации. Объект исследования – глубокая выемка котлована; смещение и деформация краев выемки (вертикальных стен) отслеживаются для обнаружения смещения котлована и, соответственно, смещения окружающей земной поверхности или здания и сооружений.

4.1 Описание объекта практической реализации разработанной методики

Управление развития Эр-Рияда предложило построить линии метро, которые охватят почти весь город Эр-Рияд, столицу Саудовской Аравии.

Карта метро Эр-Рияда, показанная на рисунке 4.1, охватывает жизненно важные районы города, которые считаются густонаселенными зонами, параллельно с правительственными органами, коммерческими предприятиями, образовательными центрами, здравоохранением, международным аэропортом Короля Халеда, KAFD, университетами, центром города и центром общественного транспорта.

Метро Эр-Рияда имеет 6 основных линий протяженностью 176 км и 85 станций, а именно:

- (Синяя линия) Olaya - Batha'a, расстояние 38 км.
- (Красная линия) Дорога короля Абдаллы (King Abdullah Road), расстояние 25,3 км.
- (Оранжевая линия) Дорога Аль Мадина Аль Монавара - Принц Саад бин Абдул Рахман Аль Авал, расстояние 40,7 км.
- (Желтая линия) Дорога международного аэропорта короля Халеда (King Khaled International Airport Road), расстояние 29,6 км.

- (Зеленая линия) Дорога короля Абдул Азиза (King Abdul Aziz Road), расстояние 12,9 км.
- (Пурпурная линия) дорога Абдул Рахман бин Ауф - дорога Шиех Хасан бин Хуссейн бин Али, расстояние 30 км.



Рисунок 4.1 – Карта территории Эр-Рияда с линиями метро и станциями [154]

Станция (1B1, см. рисунок 4.2) проектировалась как подземная станция метро глубиной 32 метра. Поскольку строительство этой станции будет проводиться открытым способом и из-за близости к существующим зданиям,

торговым центрам и главной дороге Олайя, то геодезический мониторинг смещений и деформаций котлована необходим и был в обязательном порядке включен в проект.



Рисунок 4.2 – Схема места создания котлована – Станция метро (1B1) [154]

Разработанная общая схема геодезического мониторинга деформации сооружений, а также математические модели и алгоритмы, представленные и обсужденные в предыдущих главах, были одобрены инженерным консультантом проекта и геодезическим советом Саудовской Аравии.

Требования и условия были следующие:

1. Определение наиболее чувствительных или репрезентативных областей испытываемого объекта (котлован) и подготовка всех планов действий в чрезвычайных ситуациях.
2. Создание новых исходных точек (квазиопорных точек) на основе существующей общей геодезической сети, но только для целей мониторинга и контроля деформации.
3. Обеспечение устойчивости геодезической сети (квазиопорных точек) и контроль смещений с целью предотвращения возможных деформаций на всех сооружениях, попадающих в зону влияния.

4. Преобразование координат из общей в локальную систему. В новой локальной системе координат одна ось должна быть параллельна выемке на станции, а другая – перпендикулярна выемке на станции.

Согласно спецификациям, предоставленным геодезическим советом Саудовской Аравии, требуемая точность определения координат деформационных марок $\leq \pm 0,001$ м.

Выполнен комплекс исследований, представленный в предыдущих главах. Реализованы новые технологии и приборы, в особенности автоматизированные тахеометры с обеспечением требуемой точности.

При мониторинговых наблюдениях использована разработанная схема геодезического мониторинга деформаций сооружений (подробнее глава 3, разделы 3.1 и 3.2).

4.2 Проектирование деформационной сети

Проектирование деформационной сети выполнено с использованием моделирования геомеханического состояния. Геометрические условия и ограничения обсуждаются в главе 2, раздел 2.1. Котлован размерами 25 м (ширина) на 32 м (глубина). Вмещающие породы довольно крепкие, типа крепкого песчаника с пределом на сжатие 100 МПа, модуль упругости составляет 50 ГПа. Результаты расчета горизонтальных смещений в мм представлены на рисунке 4.3.

В ПК «Котлован» смоделированы размеры грунтовой выемки с учетом физико-механических характеристик массива грунта. Программа по этим данным разбивает область на конечные элементы и рассчитывает смещения грунтового массива. Эти данные позволили правильно разместить деформационные марки и определить зону влияния.

Квазиопорные точки были размещены вне зоны влияния, а деформационные марки в чувствительных или репрезентативных областях испытываемого котлована (области наиболее вероятной деформации).

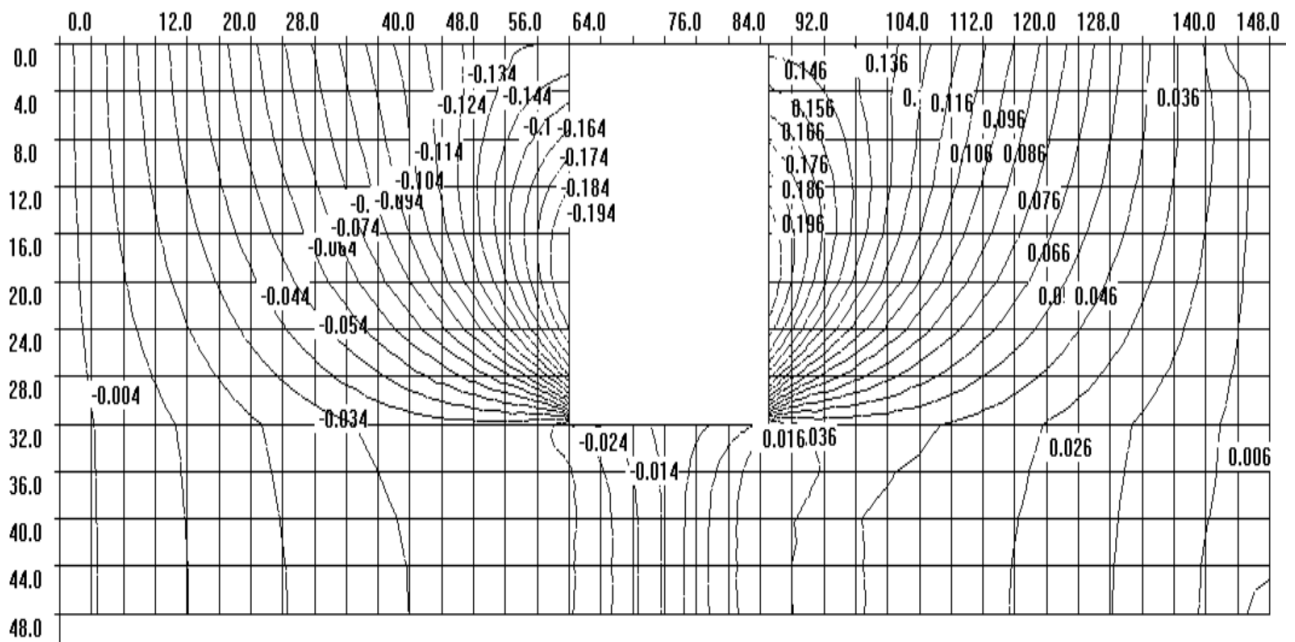


Рисунок 4.3— Распределение горизонтальных смещений в мм в грунтовом массиве в окрестности выемки

Как видно на рисунке 4.3, 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 4.4), где по расчету наблюдаются наибольшие деформации. Заложены четыре ряда марок через шесть метров с отступом от земной поверхности на 4 м. На рисунке 4.3 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 заложены в торцевых зонах котлована.

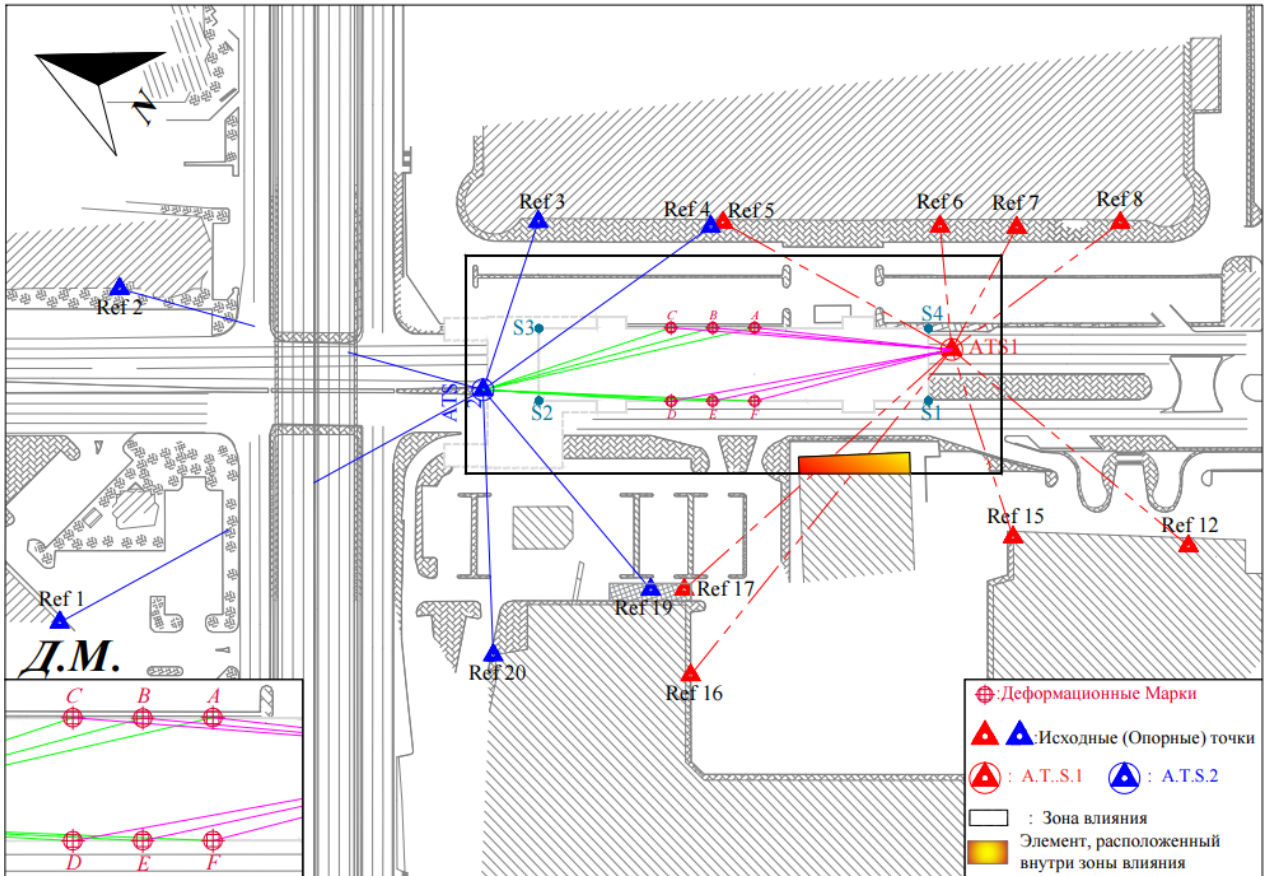


Рисунок 4.4– План участка выемки под вестибюль метро с указанием расположения исходных пунктов (Ref), станций наблюдений (АТС) и деформационных марок (А–F)

Поскольку зона для размещения станций наблюдения определена, осталась работа по поиску именно оптимального расположения этих станций. Расположение АТС1 и АТС2 было выбрано с учетом многих факторов:

1. Четкая видимость направления между тахеометрами и деформационными марками.
2. Четкая видимость направления между тахеометром и вероятными (разрабатываемыми) местоположениями опорных точек.
3. Стабильность участка установки АТС и легкий доступ.

После разработок с учетом трех условий, упомянутых выше, были определены местоположения АТС1 и АТС2, и построены бетонные столы для АТС.

При этом были рассмотрены несколько проектов бетонных оснований, на которых будет установлен роботизированный тахеометр (см. рисунок 4.5).

Тип 191 был лучшим вариантом и был одобрен консультантом проекта.

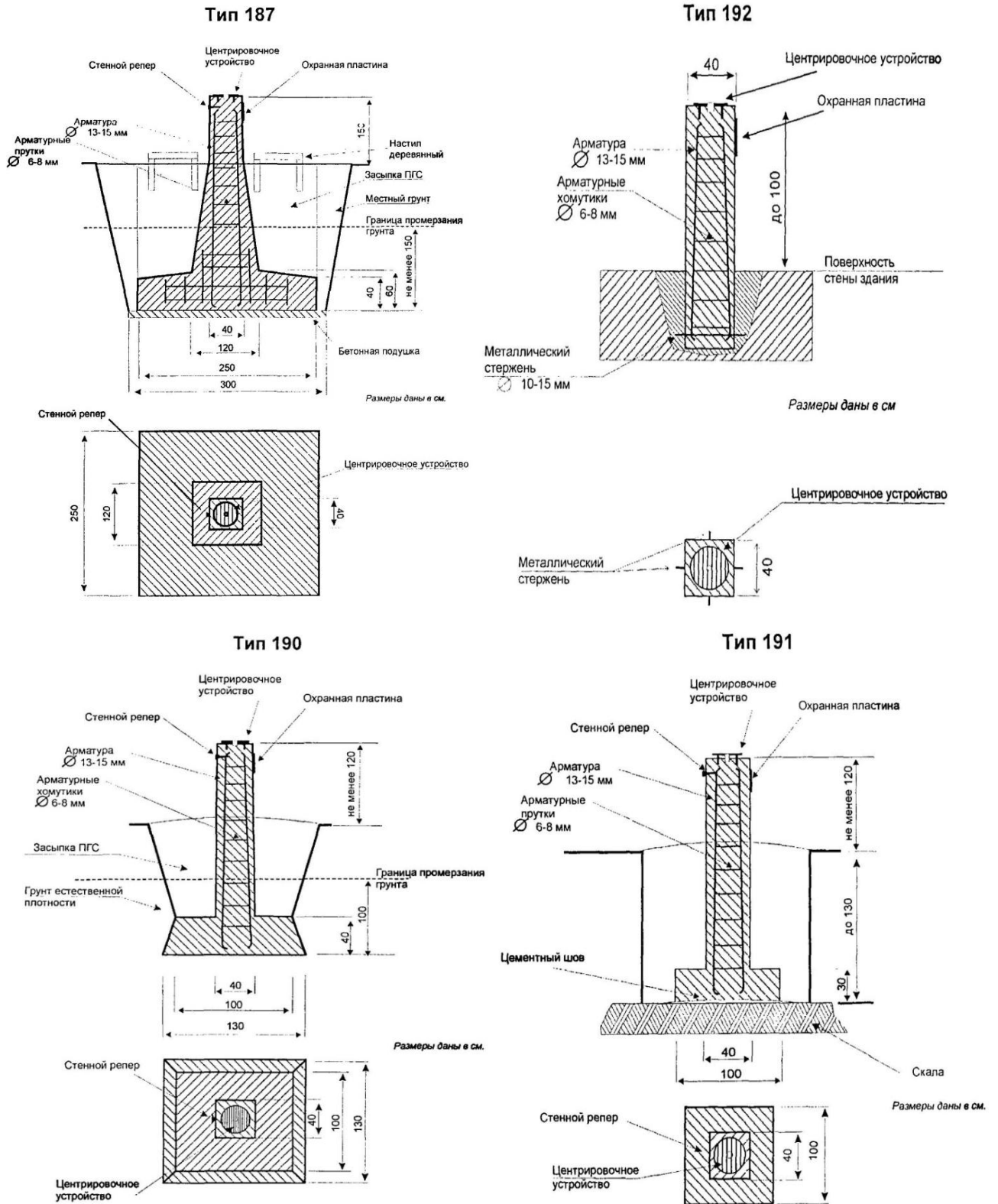


Рисунок 4.5 – Примеры закладки пунктов: ТИП 187 – основной центр пункт ФАГС; ТИП 192 – рабочий центр пункта ФАГС; ТИП 191 – центр пункта спутниковой / тахеометрической геодезической сети; ТИП 190 – рабочий центр пункта ВГС

Состав пункта: оцинкованный анкерный болт длиной 40 см, 35 см этого якоря в бетоне, а оставшиеся 5 см оставлены для крепления тахеометра. На поверхности стола закреплена металлическая пластина, на которую установлен тахеометр для длительной работы (в течение всего периода мониторинга). Проведено координирование анкерных болтов центра пункта.

Согласно геомеханическому расчету, граница зоны влияния составляет 30 м от выемки, поэтому опорные (квазиопорные) пункты были выделены за пределами этой зоны, как показано на рисунке 4.4.

На основании выводов и рекомендаций по оптимизации расположения станции наблюдения (подробнее глава 2, раздел 2.1) квазиопорные точки были распределены за пределами зоны влияния с учетом предпочтительных углов и с минимальным расстоянием между опорной точкой и тахеометром. Результат моделирования показан на рисунке 4.4 как окончательная конфигурация геодезической и деформационной сети.

4.2.1 Поправка в масштабную и аддитивную константу

Исследование было проведено тахеометром Leica TM50 перед использованием его в мониторинге деформации на станции метро в Эр-Рияде, призмы были протестированы для определения их аддитивной константы (смещения центра призмы).

Измерения и обработка данных.

Измерения проводились в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4.6.

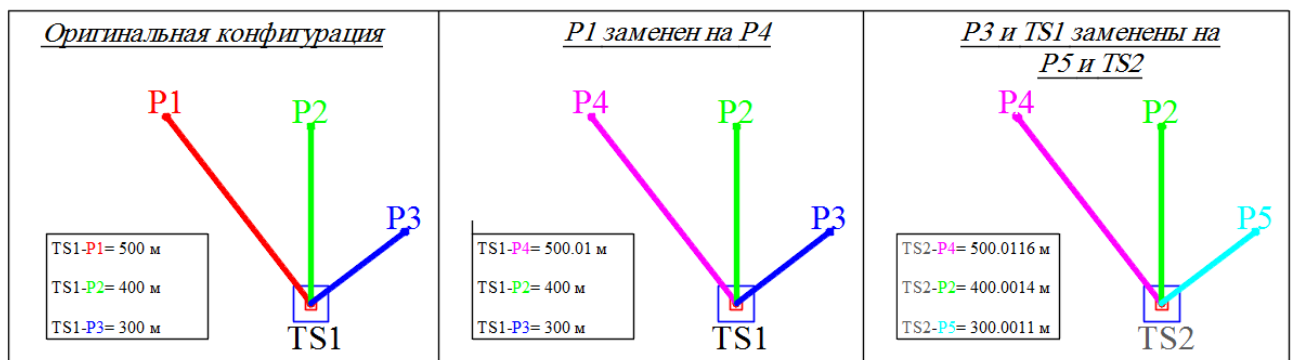


Рисунок 4.6 – Схема определения масштабной и аддитивной констант

В первоначальной конфигурации прибора и цели измеренные расстояния от тахеометра (TS1) составляли 500,000 м до вершины 1, 400,000 м до вершины P2 и 300,000 м до вершины P3. Замена призмы P1 на призму P4 изменила конфигурацию системы, и новое измеренное расстояние составило 500,010 м. Единственным параметром, который был изменен в связи с заменой призмы, было расстояние TS1-P4. Разница составила 0,010 м, поэтому призме P4 следует присвоить аддитивную константу -0,010 м, чтобы сохранить согласованность с более ранними измерениями до этой точки.

При втором изменении конфигурации системы призма P3 была заменена призмой P5, а прибор TS1 был заменен на TS2. Призмы P2 и P4 не заменяли. Аддитивная постоянная призмы a_{prism} уже определена для P4, поэтому, основываясь на разнице расстояний, масштабный коэффициент и точность нового тахеометра могут быть определены на основе уравнения (3.1)

$$d' = SF \cdot d_{obs} + \left(-x - \frac{b}{10^6} \cdot d' \right) + a_{prism}, \text{ где } b \text{ принимается равным } 1, \text{ и тогда получаем} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} 500 = 500,0116 \cdot SF + \left(-x - \frac{1}{10^6} \cdot 500 \right) + (-0,01) \\ 400 = 400,0014 \cdot SF + \left(-x - \frac{1}{10^6} \cdot 400 \right) + (0,000) \end{cases} \quad (4.1)$$

После решения системы уравнений получаем (4.2) и (4.3):

$$\begin{cases} 500 = 500,0116 \cdot SF + \left(-x - \frac{1}{10^6} \cdot 500 \right) + (-0,01) \\ 400 = 400,0014 \cdot SF + \left(-x - \frac{1}{10^6} \cdot 400 \right) + (0,000) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$A = \begin{pmatrix} 500,0116 & -1 \\ 400,0014 & -1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 500,0105 \\ 400,0004 \end{pmatrix} \text{ и } X = \begin{pmatrix} 0,9999990001 \\ 6,0003939587 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Итак, масштабный коэффициент $SF = 0,999999$ и $x = 0,0006$.

Таким образом $\sigma_{TS2} = 0,6 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6}$.

Призма P3 была заменена на P5 и после расчета вышеуказанных параметров

показано, что призме P5 должна быть присвоена аддитивная константа $-0,010$ м. Когда эти новые значения применяются к измеренным расстояниям, снова получаются правильные значения 500,000 м, 400,000 м и 300,000 м.

Точность тахеометра, заявленного компанией, была проверена в метрологической лаборатории. Калибровка прибора позволяет производить перерасчеты измерений, что в ряде случаев упрощает процесс измерений. Однако было решено использовать мини-призмы с "нулевым смещением" и провести тестирование для разных целей, чтобы избежать ошибок в период мониторинга.

4.3 Геодезические измерения

Определение достаточного количества и мест расположения опорных (квазиопорных) пунктов является одной из основных задач нашего исследования.

4.3.1 Приведение в единую систему координат двух наблюдательных станций

Сначала приведем описание методики измерений координат квазиопорных точек:

1. Начальные опорные точки, предоставленные Саудовским геодезическим советом, используются для измерения координат центра бетонного стола АТС с использованием точного тахеометра и призмы, закрепленной на анкере с помощью трегера (см. рисунок 4.7).
2. Для корректировки координат используется метод Set-Collection.
3. Проверяются окончательные координаты АТС1 и АТС2; измеренное расстояние между АТС1 и АТС2 сравнивается с рассчитанным по координатам опорных точек.
4. Регулировку можно повторить, чтобы устранить разницу между измеренным и рассчитанным расстоянием.



Рисунок 4.7 – Геодезический трегер Leica [155]

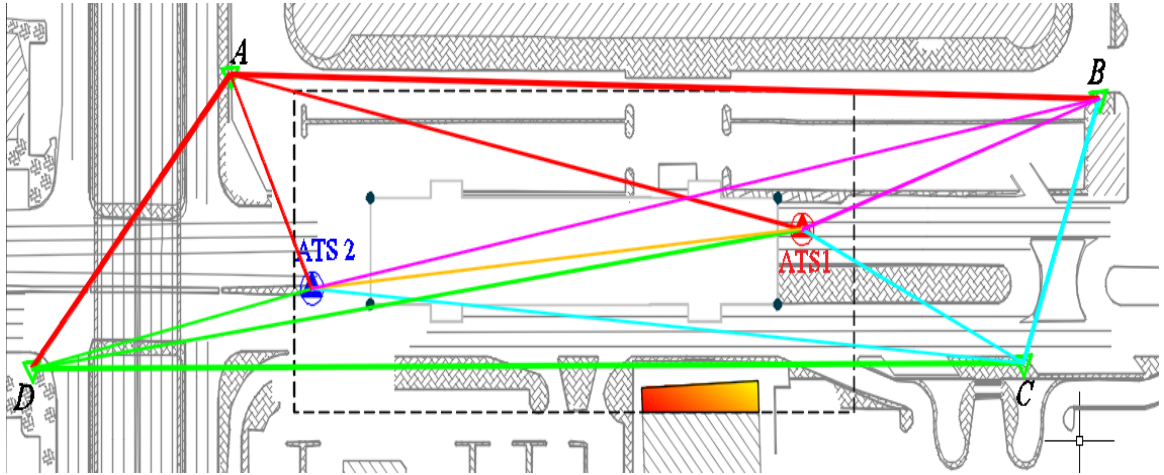
В соответствии с нормами деформационная сеть может быть локальной. Однако для лучшего понимания деформационного процесса относительно окружающей среды и для обеспечения быстрого реагирования на деформацию с применением альтернативных технологий, было предложено создать сеть на основе общей (государственной) системы координат.

Set collection – это опция в новых тахеометрах и их программном обеспечении, которая позволяет настраивать геодезическую сеть с возможностью фиксировать координаты опорных точек или вносить все корректировки, необходимые для соединения сети с высокой точностью. Порядок проведения полевых измерений для Set collection показан на рисунке 4.8а.

Метод Наименьших Квадратов (МНК) был применен для расчета окончательных координат АТС1 и АТС2 (см. рисунок 4.8). Координаты точек А, В, С и D были немного изменены в пределах 1 мм. Однако, поскольку АТС1 и АТС2 будут использоваться только для целей мониторинга, эти изменения не повлияют на результаты будущего мониторинга.

Расчетное расстояние между АТС1 и АТС2 сравнивалось с измеренным, и разницы не было обнаружено. Определенные координаты (АТС) в дальнейшем будут служить в качестве исходных (базис АТС1 и АТС2) при включении в сеть новых квазиопорных точек.

(a)



(б)

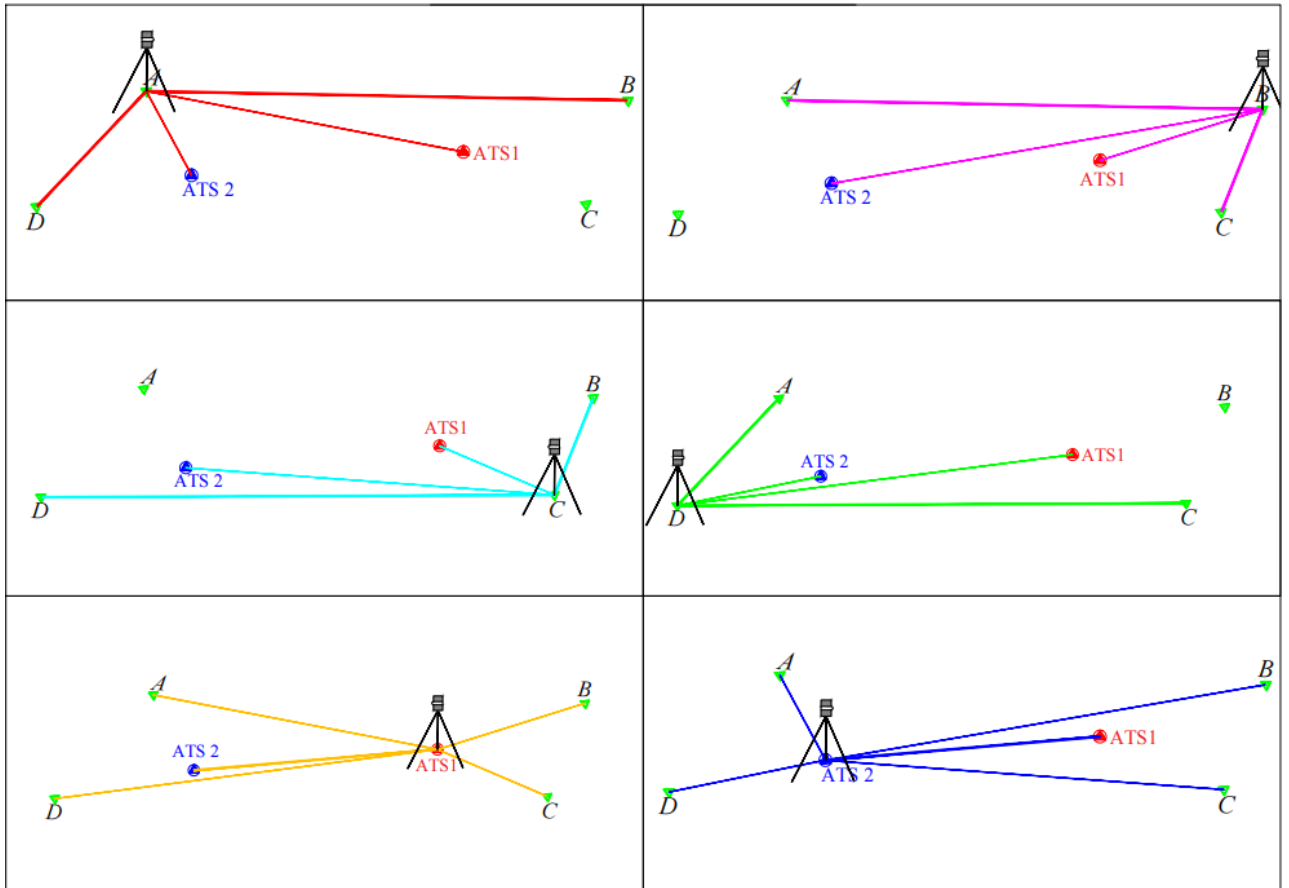


Рисунок 4.8 – Используемые схемы при мониторинге: а – общая схема Set collection, б – схема, поясняющая порядок проведения полевых измерений в режиме Set collection

4.3.2 Определение координат квазиопорных точек

Используя вычисленные координаты АТС1 и АТС2, тахеометр фиксируется

на АТС1 и ориентируется на АТС2, затем все новые опорные точки (Ref 1, 2, 3, 4, 19 и 20) были измерены с помощью Leica TM 50 и использована опция автоматического наведения, чтобы точно найти центр призмы. Призмы, использованные для новых квазиопорных точек представляли собой мини-призмы (см. рисунок 4.9), закрепленные анкером на верхних этажах зданий, расположенных вне зоны влияния выемки. Та же процедура была проделана для измерения координат точек Ref 5, 6, 7, 8, 12, 15, 16 и 17, но с АТС2.

После определения координат всех квазиопорных точек была проведена проверка координат на основе решения обратной засечки, как показано на рисунке 4.4 и полученные координаты были точно такими же для АТС2, но для АТС1 разница составила 0,1 мм. Эта разница незначительна, однако необходимо было определить, откуда произошла ошибка. Главное, чтобы это не касалось базиса АТС1 – АТС2. Ошибка составила микронные значения.

На основе этих результатов все координаты квазиопорных точек были сохранены и зафиксированы, два тахеометра также были постоянно закреплены на поверхности бетонных оснований, затем были определены координаты деформационных марок.



Рисунок 4.9 – Вид на мини-призмы, установленные на верхних этажах зданий

4.3.3 Определение координаты деформационных марок

Координаты АТС1 и АТС2 и точность их положения с использованием

упрощенного метода и метода наименьших квадратов вычислены и представлены в таблице 4.1.

Квазиопорные точки (Ref 5, 6 и 8) использовались для выполнения обратной засечки, вычисления координат и оценки точности местоположения АТС1. Для АТС2 использовались квазиопорные точки (Ref 3, 4 и 19). При этом все квазиопорные точки используются для расчета координат и проведения оценка точности по разработанному алгоритму.

В таблице 4.1 показано, что координаты и точность, рассчитанные этими двумя разными методами, следующие: для АТС1 ($\Delta_{XY} \approx 0,1$ мм; $m_{oz} \approx m_{xy}$), подробные объяснения были приведены в главе 2, раздел 2.1). Для АТС2 ($\Delta_{XY} \geq 1$ мм) и m_{oz} немного больше, чем точность координат (m_{xy}) из-за не идеальной конфигурации опорных точек при выполнении угловой обратной засечки по трем точкам.

Таблица 4.1 – Результаты расчета координат и точности двумя разными методами (УМ и МНК)

	<i>Упрощенный метод</i>		
	<i>X (м)</i>	<i>Y (м)</i>	<i>m_{оз}(мм)</i>
<i>АТС1</i>	167918,9297	2437627,4881	0,193
<i>АТС2</i>	167837,1971	2437766,9157	0,716
	<i>МНК</i>		
	<i>X (м)</i>	<i>Y (м)</i>	<i>m_{xy}(мм)</i>
<i>АТС1</i>	167918,9298	2437627,4880	0,113
<i>АТС2</i>	167837,1959	2437766,9154	0,067

<i>МНК-УМ</i>	
ΔX	ΔY
0,0001	-0,0001
-0,0012	-0,0003

Соответственно, использование упрощенного метода влияет на точность определения местоположения АТС1 и АТС2, а затем и на координаты деформационных марок. Следует отметить, что первоначальное определение координат деформационных марок является очень важным этапом в будущем обнаружении и контроле деформации. Поэтому, чтобы наглядно показать эффективность и необходимость разработанного автоматизированного алгоритма, однократное измерение от АТС1 и от АТС2 (упрощенный метод) сравнивалось с

результатами разработанного алгоритма и моделей, основанных на сочетании всех собранных данных для достижения максимально возможной точности.

В соответствии с геометрией сети, показанной на рисунке 4.10, ниже показаны результаты определения точности положения станций наблюдения на основе *фактических измерений* и с использованием упрощенного метода (уравнение (4.1)) и по методу наименьших квадратов.

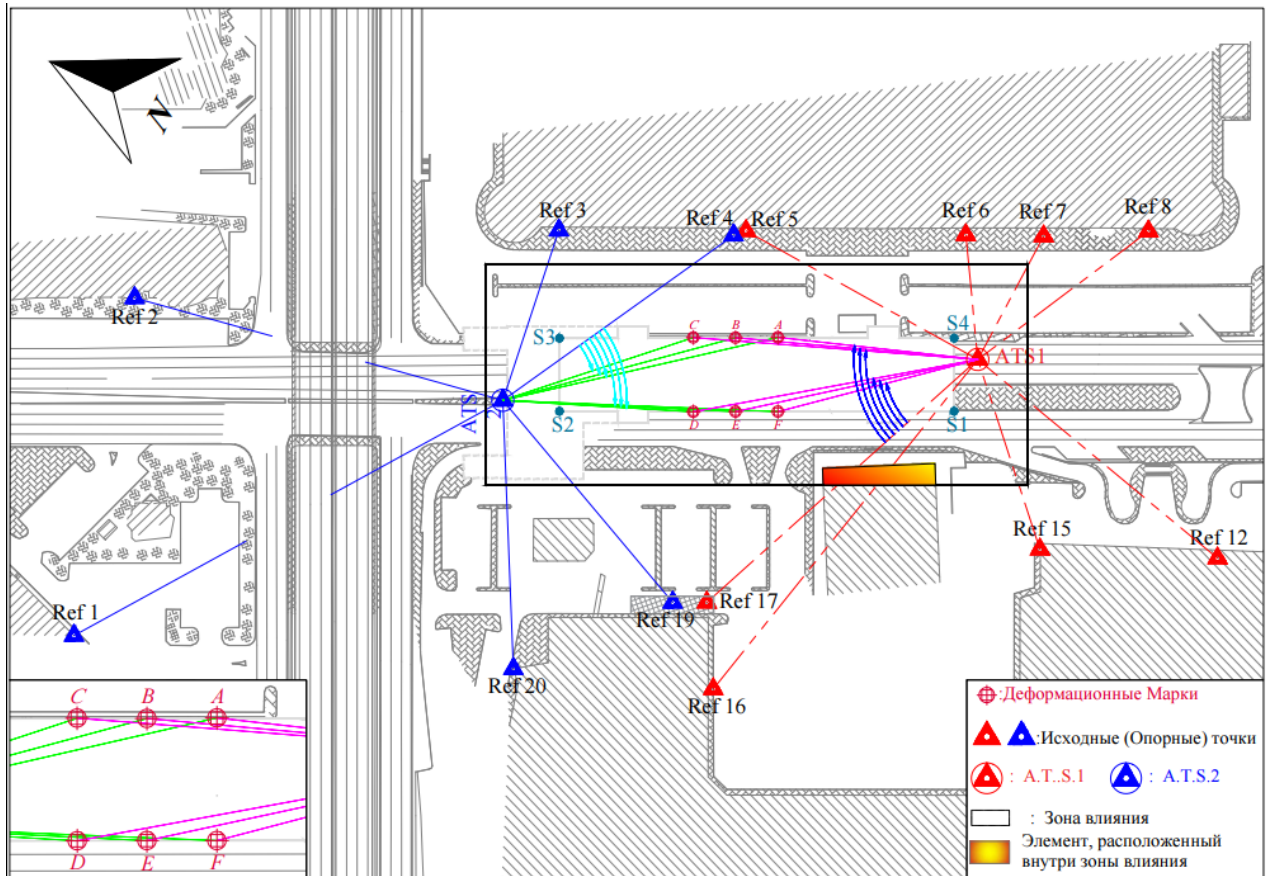


Рисунок 4.10 – Схема с указанием направлений измерений деформационных марок

Расстояния до деформационных марок и направления измерялись с помощью тахеометра Leica TM50 с точностью $\pm 0,6$ мм при измерении расстояний и 0,5 секунды для горизонтальных углов. Координаты тахеометрической станции (TS) определялись на основе традиционной обратной угловой засечки с использованием уравнения (2.4). При этом точность позиционирования рассчитывается по формулам (4.4) и показана в таблице 4.2.

$$m_{xy}^2 = m_{oz}^2 + m_{изм i}^2 ; \quad m_{xy} = \sqrt{m_{oz}^2 + m_{изм i}^2} ; \quad m_{изм i} = \sqrt{m_s^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2} * S^2 \quad (4.4)$$

где S – измеренное горизонтальное расстояние; $m_{оз}$ – точность обратной засечки; m_s – паспортная точность прибора для измерения расстояния; m_β – паспортная точность прибора для измерения горизонтального угла.

Таблица 4.2 – Результаты оценки точности наблюдений с одной станции наблюдения

		A	B	C	D	E	F
$m_{изм}$ (станция АТС1)	GP (м)	68,1814	82,4553	96,7345	98,0312	84,0006	70,0012
	$m_{1изм}$ (мм)	0,6883	0,7111	0,7351	0,7374	0,7137	0,6912
	$m_{1} = \sqrt{m_{оз}^2 + m_{изм1}^2}$ (мм)	0,7148	0,7368	0,76	0,7622	0,7393	0,7176
$m_{изм}$ (станция АТС2)	GP (м)	95,6685	81,7117	67,997	64,7207	78,9916	93,3628
	$m_{2изм}$ (мм)	0,7333	0,7099	0,688	0,683	0,7055	0,7294
	$m_{2} = \sqrt{m_{оз}^2 + m_{изм2}^2}$ (мм)	1,0247	1,0081	0,9928	0,9894	1,005	1,0219

Погрешность определения координат марок, полученная с одной станции (со станции АТС 1, таблица 4.2), составила около 0,7 мм. В соответствии с нормативами при расчетных значениях осадок до 50 мм СКП измерений деформации не должна быть более 1 мм, а в эксплуатационный период не более 0,5 мм (для песчаных грунтов).

Для повышения точности использованы дополнительные измерения и их обработка по МНК. Здесь возникает вопрос – зачем еще повышать точность? Дело в том, что при оценке деформационного процесса, особенно если мы хотим поймать начало негативного развития, важны доли мм. Ведь деформация, это конечный результат действия напряжений и если она происходит, то в этом участвовали значительные силы. Начальное приближение координат деформационных марок получили путем усреднения координат, полученных из измерений от съемочных точек АТС1 и АТС2. Результаты измерений и приближенные координаты приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты измерений и приближенные координаты

Значения				Наименования пунктов	Координаты	
От	До	Направления (Градусы)	Расстояния (м)		X (м)	Y (м)
АТС1	А	48,1948	68,1814	АТС1	167918,9298	2437627,4880
	В	47,0275	82,4553	АТС2	167837,1959	2437766,9154
	С	46,2948	96,7345	≈ А	167896,565	2437691,897
	Д	31,4719	98,0312	≈ В	167890,301	2437704,814
	Е	29,7458	84,0006	≈ С	167884,186	2437717,768
	F	27,2720	70,0012	≈ Д	167861,487	2437706,926
АТС2	А	22,6880	95,6685	≈ Е	167867,680	2437694,043
	В	20,5106	81,7117	≈ F	167873,867	2437681,056
	С	17,3309	67,9970			
	Д	39,0020	64,7207			
	Е	38,3452	78,9916			
	Ф	37,9181	93,3628			

В соответствии с уравнениями (2.6) – (2.10) и процессом определения координат и проведения оценки точности пунктов, показанных на рисунке 2.6, вычисляем матрицы В, Р и W.

В таблице 4.4 показаны Априорные СКП и Апостериорные СКП. Видно, что точность наблюдений повысилась относительно паспортной точности.

Таблица 4.4 – Погрешности определения координат марок после обработки измерений с двух станций

		Априорный	Апостериорный	Априорный		Апостериорный	
		(мм)	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)
А	m_x	0,22	0,09	m_{xy}	0,45	m_{xy}	0,18
	m_y	0,39	0,16				
В	m_x	0,25	0,10	m_{xy}	0,44	m_{xy}	0,18
	m_y	0,37	0,15				
С	m_x	0,27	0,11	m_{xy}	0,43	m_{xy}	0,17
	m_y	0,34	0,14				
Д	m_x	0,23	0,09	m_{xy}	0,47	m_{xy}	0,19
	m_y	0,41	0,16				
Е	m_x	0,25	0,10	m_{xy}	0,46	m_{xy}	0,19
	m_y	0,39	0,16				
F	m_x	0,27	0,11	m_{xy}	0,46	m_{xy}	0,18
	m_y	0,37	0,15				

На рисунке 4.11 представлена диаграмма, демонстрирующая значительное

различие и увеличение точности определения координат при избыточных измерениях и использовании МНК. Данные свидетельствуют о необходимости применения разработанного алгоритма в работах по мониторингу. Однако для обоснования и обеспечения достаточности будущих результатов необходимо сравнить предварительно рассчитанную точность с допустимой ошибкой, а затем может быть принято окончательное решение.

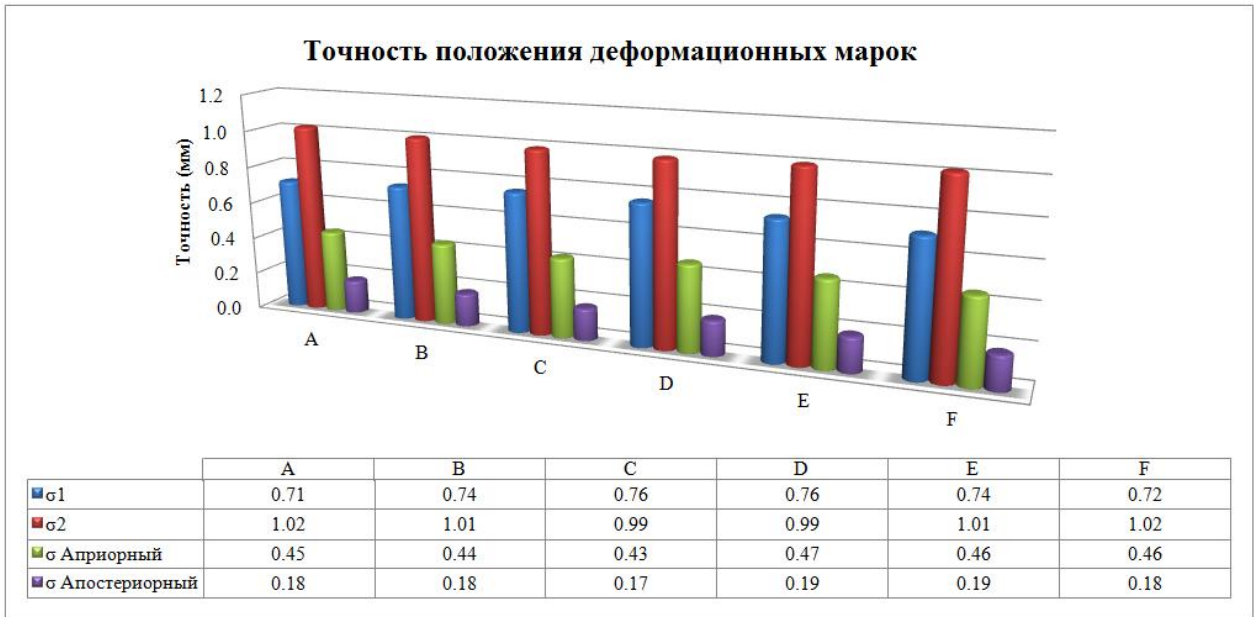


Рисунок 4.11 – Погрешности определения координат деформационных марок (упрощенный способ и МНК)

Согласно ГОСТ 24846-2012 допускаемая погрешность измерения перемещений составляет 1 мм при расчетном значении вертикальных или горизонтальных перемещений до 50 мм.

Таким образом, полученная точность определения координат деформационных марок (по разработанному алгоритму, основанному на МНК) отвечает требованиям, указанными в нормативном документе «Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. Грунты» (ГОСТ 24846-2012, Межгосударственный стандарт).

4.4 Обработка геодезических измерений

Наблюдения за деформационными марками проводились в течение четырех недель подряд. Результаты только для одной деформационной марки представлены в таблице 4.5 и интерпретируются в качестве реального примера обработки данных.

Таблица 4.5 – Данные мониторинга в течение 4 недель (ΔX , ΔY , мм)

	<i>Первый День</i>	<i>После 1 недели</i>	<i>После 2 недели</i>	<i>После 3 недели</i>	<i>После 4 недели</i>
<i>Час</i>	ΔX	$\Delta X1$	$\Delta X2$	$\Delta X3$	$\Delta X4$
0:00	-0,60	-0,70	-1,00	-1,00	-0,90
1:00	-0,60	-0,70	-1,00	-1,00	-0,90
2:00	-0,40	-0,70	-1,00	-1,00	-0,90
3:00	-0,40	-0,70	-1,00	-1,00	-0,90
4:00	-0,40	-0,70	-1,00	-1,05	-0,90
5:00	-0,40	-0,70	-0,90	-0,95	-0,80
6:00	-0,40	-0,80	-0,85	-0,90	-0,70
7:00	-0,50	-0,80	-0,95	-0,90	-0,70
8:00	-0,50	-0,80	-1,00	-1,00	-0,80
9:00	-0,60	-0,80	-0,90	-1,00	-0,85
10:00	-0,60	-0,70	-0,80	-0,90	-0,80
11:00	-0,40	-0,60	-0,60	-0,90	-0,70
12:00	-0,40	-0,50	-0,60	-0,80	-0,70
13:00	-0,40	-0,30	-0,60	-0,75	-0,75
14:00	-0,50	-0,40	-0,60	-0,70	-0,80
15:00	-0,40	-0,40	-0,60	-0,90	-0,80
16:00	-0,40	-0,50	-0,80	-0,90	-1,00
17:00	-0,40	-0,60	-0,80	-0,90	-1,00
18:00	-0,50	-0,60	-0,80	-0,80	-1,00
19:00	-0,50	-0,60	-0,80	-0,90	-1,00
20:00	-0,50	-0,60	-0,90	-0,85	-0,70
21:00	-0,60	-0,70	-0,90	-0,90	-0,80
22:00	-0,60	-0,70	-0,95	-0,95	-0,80
23:00	-0,60	-0,70	-0,95	-0,90	-0,90
0:00	-0,60	-0,70	-0,90	-0,95	-0,90
σ	0,09	0,13	0,14	0,08	0,10
<i>Медиана</i>	-0,50	-0,70	-0,90	-0,90	-0,80

Продолжение таблицы 4.5

	<i>Первый День</i>	<i>После 1 недели</i>	<i>После 2 недели</i>	<i>После 3 недели</i>	<i>После 4 недели</i>
<i>Час</i>	ΔY	$\Delta Y1$	$\Delta Y2$	$\Delta Y3$	$\Delta Y4$
0:00	-0,30	-0,50	-0,50	-0,70	-0,90
1:00	-0,30	-0,40	-0,50	-0,70	-0,90
2:00	-0,40	-0,40	-0,60	-0,60	-0,90
3:00	-0,40	-0,40	-0,60	-0,60	-0,90
4:00	-0,40	-0,40	-0,70	-0,65	-0,90
5:00	-0,40	-0,50	-0,70	-0,65	-1,00
6:00	-0,40	-0,40	-0,65	-0,65	-1,00
7:00	-0,40	-0,40	-0,65	-0,70	-1,00
8:00	-0,40	-0,40	-0,60	-0,80	-0,95
9:00	-0,40	-0,40	-0,50	-0,80	-0,85
10:00	-0,40	-0,40	-0,50	-0,70	-0,80
11:00	-0,30	-0,40	-0,50	-0,70	-0,80
12:00	-0,30	-0,40	-0,50	-0,60	-0,70
13:00	-0,30	-0,40	-0,40	-0,60	-0,75
14:00	-0,20	-0,30	-0,40	-0,50	-0,70
15:00	-0,20	-0,30	-0,40	-0,60	-0,70
16:00	-0,30	-0,30	-0,40	-0,65	-0,75
17:00	-0,30	-0,20	-0,50	-0,70	-0,80
18:00	-0,10	-0,20	-0,50	-0,60	-0,80
19:00	-0,10	-0,20	-0,50	-0,60	-0,80
20:00	-0,30	-0,40	-0,60	-0,65	-0,85
21:00	-0,30	-0,40	-0,60	-0,75	-0,85
22:00	-0,30	-0,40	-0,65	-0,75	-0,90
23:00	-0,40	-0,50	-0,60	-0,80	-0,90
0:00	-0,30	-0,60	-0,60	-0,75	-0,90
σ	0,09	0,09	0,09	0,08	0,09
<i>Медиана</i>	-0,30	-0,40	-0,50	-0,65	-0,85

В таблице 4.5 представлены результаты измерений. Видно различие между разностью координат деформационной марки относительно эпохи «0». Различия представлены в 2D (Δ_x и Δ_y). Координаты вычислялись в общей системе

координат страны. Данные получены в течение 24 часов, проверены на наличие грубых ошибок. При этом определялось их соответствие нормальному закону распределения. В результате вместо представления данных в виде Δ_x и Δ_y для всего периода мониторинга вычисляются медиана и стандартное отклонение, а затем может быть выполнен анализ. В таблице 4.6 показаны значения, рассчитанные для медианы и стандартного отклонения.

Таблица 4.6 – Стандартное отклонение и медиана для данных Δ_x и Δ_y в мм

<i>Неделя</i>	<i>Стандартное отклонение</i>		<i>Медиана</i>	
	σ_x	σ_y	M_x	M_y
<i>Первый День</i>	0,09	0,09	-0,50	-0,30
<i>1</i>	0,13	0,09	-0,70	-0,40
<i>2</i>	0,14	0,09	-0,90	-0,50
<i>3</i>	0,08	0,08	-0,90	-0,65
<i>4</i>	0,10	0,09	-0,80	-0,85

Таблица 4.6 показывает, что стандартное отклонение является приблизительно постоянным в каждом из двух направлений, это означает, что вероятность существования грубых ошибок очень мала. Однако M_x и M_y являются центром нормального распределения, вокруг которого распределяются данные; они также отражают реальную величину деформации вдоль каждой оси соответственно.

В таблице 4.7 медиана сравнивается с радиусом круга для 95% степени достоверности, чтобы проверить деформацию и определить ее значение.

Таблица 4.7 – Результаты сравнения измеренных данных с радиусом круга для 95% степени достоверности (Марк «D»)

<i>Деформационный Марк «D»</i>				<i>Априорные</i>			<i>Апостериорные</i>		
<i>Неделя</i>	M_x (мм)	M_y (мм)	M_{xy} (мм)	r (мм)	<i>Деф.</i>	<i>Статус Марка</i>	r (мм)	<i>Деф.</i>	<i>Статус Марка</i>
<i>Первый День</i>	-0,50	-0,30	0,58	1,46	-0,87	Стабильный	0,59	0,00	Стабильный
<i>1</i>	-0,70	-0,40	0,81		-0,65	Стабильный		0,22	Деф
<i>2</i>	-0,90	-0,50	1,03		-0,43	Стабильный		0,44	Деф
<i>3</i>	-0,90	-0,65	1,11		-0,35	Стабильный		0,52	Деф
<i>4</i>	-0,80	-0,85	1,17		-0,29	Стабильный		0,58	Деф

В таблице 4.7 показано, что марка «D» была стабильной только в первый день мониторинга. Об этом свидетельствует значение смещения, которое меньше радиуса круга для 95% степени достоверности. Однако каждую следующую неделю смещение марки увеличивалось и в конце концов превысило расчетный радиус. Таким образом деформация обнаружена и следует проверить, что это за деформация.

Следует отметить, что при мониторинге заданий и сооружений представление данных в табличной форме не дает наглядной картины и возможно без использования специальных средств математической обработки упущение важных изменений в деформационной процессе. В этой связи графическое представление более информативно. На рисунке 4.12 показан график смещений исследуемой деформационной марки.

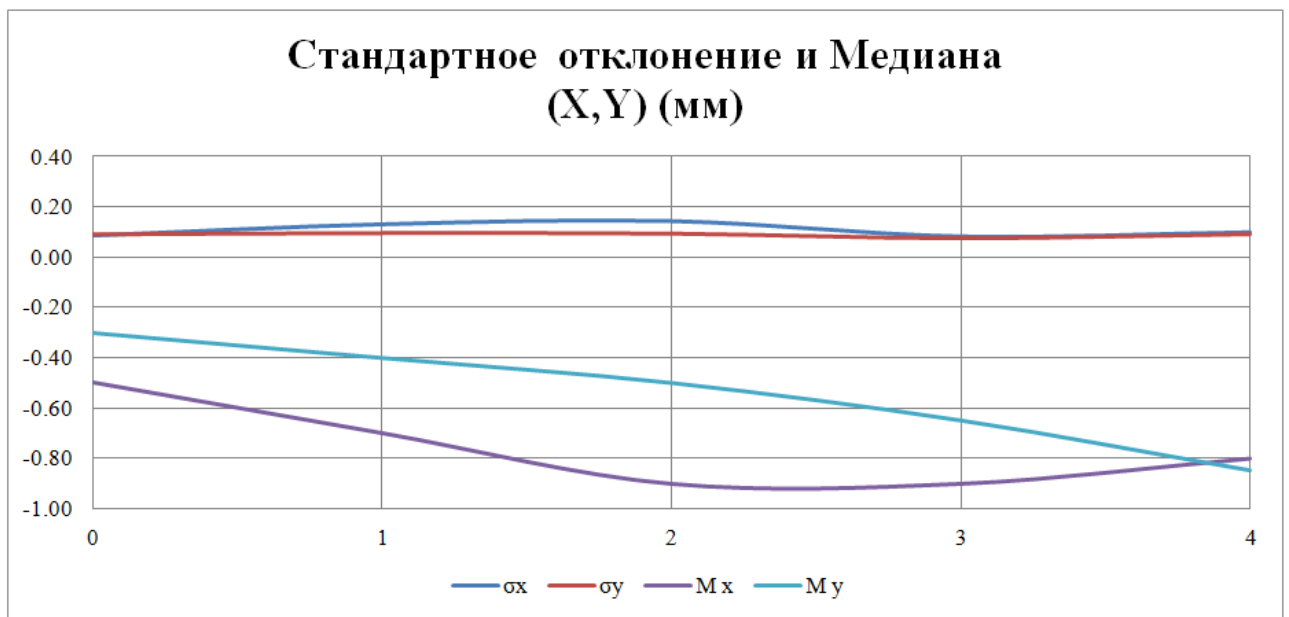


Рисунок 4.12 – Графическое представление траектории и направления смещения деформационной марки

Согласно рисунку 4.12 деформация по оси X увеличивалась в первые 2 недели, а затем скорость изменения и величина деформации уменьшалась, достигнув своих первоначальных значений. Однако в направлении Y деформация увеличивается с постоянной скоростью изменения. Из графика видно, что деформация наблюдалась в течение следующих недель.

Анализ деформации по общей системе координат не даст четкого

понимания результирующего направления деформации согласно геометрии котлована по его сторонам. Поэтому Δ_x и Δ_y проецировались на 2 другие оси А и В, где ось А перпендикулярна \perp стороне "S1-S2" и "S3-S4" и ось В направлена вдоль упомянутой стороны. Таблицы 4.8 и 4.9 показывают скорректированные данные, а на рисунке 4.13 представлены альтернативные графики смещений деформационной марки.

Таблица 4.8 – Данные мониторинга в течение 4 недель (ΔA и ΔB) в мм

	<i>Первый День</i>	<i>После 1 недели</i>	<i>После 2 недели</i>	<i>После 3 недели</i>	<i>После 4 недели</i>
<i>Час</i>	ΔA	$\Delta A1$	$\Delta A2$	$\Delta A3$	$\Delta A4$
0:00	0,67	0,85	1,12	1,20	1,20
1:00	0,67	0,80	1,12	1,20	1,20
2:00	0,53	0,80	1,16	1,16	1,20
3:00	0,53	0,80	1,16	1,16	1,20
4:00	0,53	0,80	1,20	1,23	1,20
5:00	0,53	0,85	1,11	1,14	1,15
6:00	0,53	0,89	1,05	1,09	1,06
7:00	0,62	0,89	1,14	1,11	1,06
8:00	0,62	0,89	1,16	1,25	1,13
9:00	0,71	0,89	1,03	1,25	1,13
10:00	0,71	0,80	0,94	1,11	1,07
11:00	0,49	0,71	0,76	1,11	0,98
12:00	0,49	0,62	0,76	0,98	0,93
13:00	0,49	0,44	0,71	0,94	1,00
14:00	0,54	0,49	0,71	0,85	1,02
15:00	0,45	0,49	0,71	1,07	1,12
16:00	0,49	0,58	0,89	1,09	1,25
17:00	0,49	0,63	0,94	1,11	1,25
18:00	0,49	0,63	0,94	0,98	1,25
19:00	0,49	0,63	0,94	1,07	1,25
20:00	0,58	0,71	1,07	1,05	1,00
21:00	0,67	0,80	1,07	1,14	1,09
22:00	0,67	0,80	1,14	1,18	1,11
23:00	0,71	0,85	1,12	1,16	1,20
0:00	0,67	0,89	1,07	1,18	1,20
σ	0,09	0,14	0,16	0,10	0,09
<i>Медиана</i>	0,53	0,80	1,07	1,11	1,13

Продолжение таблицы 4.8

	<i>Первый День</i>	<i>После 1 недели</i>	<i>После 2 недели</i>	<i>После 3 недели</i>	<i>После 4 недели</i>
Час	$\Delta B0$	$\Delta B1$	$\Delta B2$	$\Delta B3$	$\Delta B4$
0:00	0,01	-0,15	-0,02	-0,20	-0,43
1:00	0,01	-0,06	-0,02	-0,20	-0,43
2:00	0,19	-0,06	-0,11	-0,11	-0,43
3:00	0,19	-0,06	-0,11	-0,11	-0,43
4:00	0,19	-0,06	-0,20	-0,13	-0,43
5:00	0,19	-0,15	-0,24	-0,18	-0,56
6:00	0,19	-0,02	-0,22	-0,20	-0,60
7:00	0,15	-0,02	-0,18	-0,24	-0,60
8:00	0,15	-0,02	-0,11	-0,29	-0,51
9:00	0,10	-0,02	-0,06	-0,29	-0,40
10:00	0,10	-0,06	-0,11	-0,24	-0,38
11:00	0,10	-0,10	-0,19	-0,24	-0,42
12:00	0,10	-0,15	-0,19	-0,20	-0,33
13:00	0,10	-0,23	-0,10	-0,22	-0,35
14:00	-0,03	-0,10	-0,10	-0,15	-0,29
15:00	0,01	-0,10	-0,10	-0,15	-0,29
16:00	0,10	-0,06	-0,02	-0,20	-0,29
17:00	0,10	0,08	-0,11	-0,24	-0,29
18:00	-0,12	0,08	-0,11	-0,20	-0,29
19:00	-0,12	0,08	-0,11	-0,15	-0,29
20:00	0,06	-0,10	-0,15	-0,22	-0,47
21:00	0,01	-0,06	-0,15	-0,29	-0,42
22:00	0,01	-0,06	-0,18	-0,27	-0,47
23:00	0,10	-0,15	-0,13	-0,33	-0,43
0:00	0,01	-0,24	-0,15	-0,27	-0,43
σ	0,09	0,08	0,06	0,06	0,09
Медиана	0,10	-0,06	-0,11	-0,20	-0,43

Таблица 4.9 – Стандартное отклонение и медиана для данных ΔA и ΔB в мм

<i>Неделя</i>	<i>Стандартное отклонение</i>		<i>Медиана</i>	
	σ_A	σ_B	M_A	M_B
<i>Первый День</i>	0,09	0,09	0,53	0,10
1	0,14	0,08	0,80	-0,06
2	0,16	0,06	1,07	-0,11
3	0,10	0,06	1,11	-0,20
4	0,09	0,09	1,13	-0,43

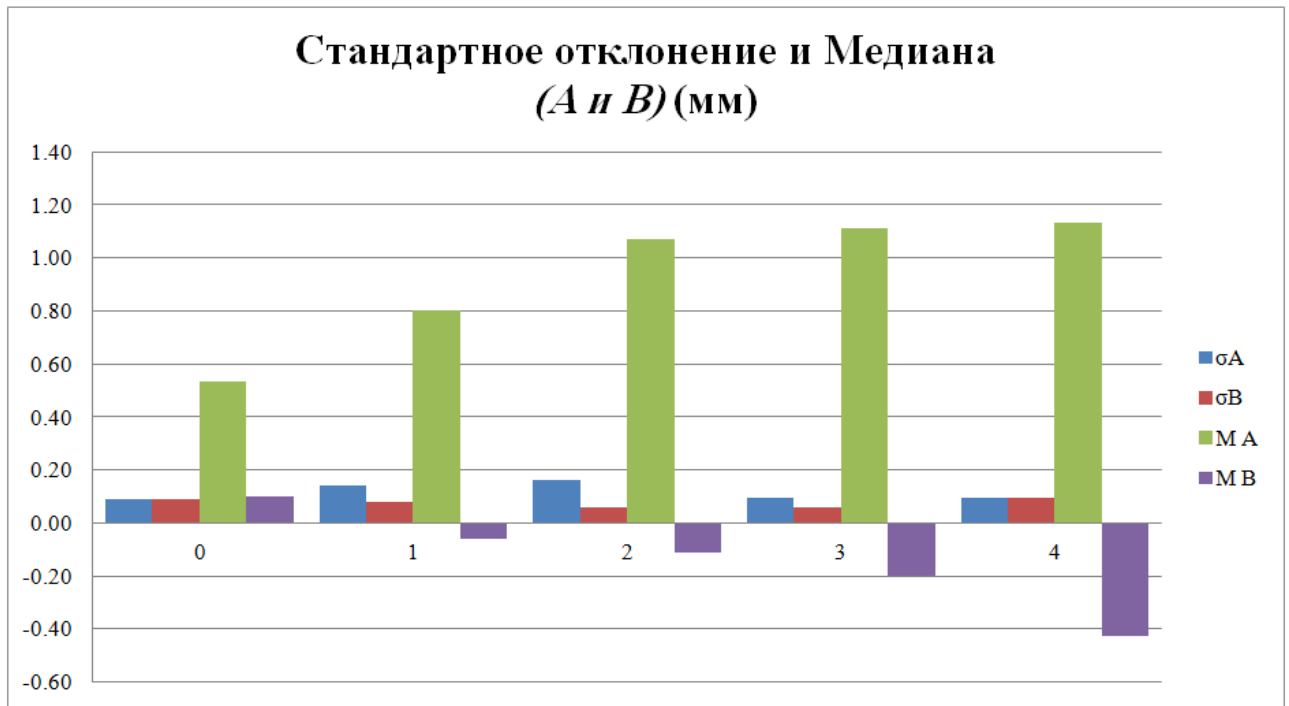


Рисунок 4.13 – Графическое представление траектории и направления смещений деформационной марки в новой локальной системе координат

Согласно таблице 4.9 и рисунку 4.13 основная деформация перпендикулярна блоку станции (\perp - «S3-S4»), где вначале он увеличился со скоростью 0,25 мм в неделю в первую и вторую неделю, однако этот показатель значительно снизился до 0,04 и 0,02 мм в неделю в третьей и четвертой неделях соответственно. Эти данные означают, что во второй неделе произошел деформационный перегиб (максимум).

Деформация по оси В неопределенна в смысле ее прогноза. Вначале приращение шло экспоненциально, но точки перегиба не достигло, поэтому оно будет продолжать расти, и потребуются дополнительный мониторинг. Однако, ссылаясь на полевые журналы, где было упомянуто, что земляные работы проводились возле деформационной марки D в течение последних 2 недель. Эта информация очень важна и объясняет обнаруженные смещения. В то же время она должна быть учтена при следующем анализе данных мониторинга, чтобы определить, зависит ли прогресс деформации от упомянутых земляных работ или причина этой деформации все еще нуждается в дополнительном исследовании.

Марка D взята как пример обработки геодезических измерений для определения деформации контролируемого объекта. Такой анализ проводился для

всех остальных деформационных марок на протяжении всего периода строительства вблизи котлована и до тех пор, пока не была построена опорная вертикальная армированная стена для строительства вестибюля метрополитена.

4.5 Выводы по четвертой главе

Разработанная методология, модели и алгоритмы оптимизации геодезических и деформационных сетей успешно прошли натурные испытания на конкретном объекте. Осуществлена практическая реализация результатов диссертационных исследований. Выполнены и представлены все работы, связанные с определением участков с максимальной деформацией, определением зоны влияния, построением геодезической сети, проектированием конфигурации новых опорных точек (квазиопорных), выделением деформационных марок на основе геомеханических расчетов.

Основные результаты и особенности практической реализации разработанной методики:

1. На основе разработанного алгоритма расчета координат и точности определения местоположения были выполнены моделирование и имитационное моделирование для проектирования геодезической сети и оптимизации расположения автоматизированных наблюдательных станций.

2. По результатам геомеханических расчетов и результатов были определены чувствительные зоны максимально вероятной деформации, а затем в этих зонах выделены деформационные марки. Также была определена зона влияния, и все новые опорные точки были спроектированы так, чтобы располагаться за пределами этой зоны.

3. Разработанный алгоритм использовался для обработки измерений деформационных марок с целью вычисления их координат, проведения оценки точности их положения, а также вычисления эллипса и круга ошибки для 95% степени достоверности. Обработка геодезических измерений проводилась путем расчета стандартного отклонения собранных данных для каждой деформационной марки, чтобы гарантировать отсутствие грубых ошибок. Медиана также была

рассчитана и сопоставлена с критерием деформации и радиусом круга для 95% степени достоверности.

4. По результатам исследований, приведенных в главе 3, и практической проверки методики организации геодезического мониторинга сформулировано третье защищаемое научное положение: «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».

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 метода наименьших квадратов (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 ВІМ-технологии (строительство с использованием информационного моделирования) строительства зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авершин, С.Г. Горное давление в одиночных подземных выработках / С.Г. Авершин. – Фрунзе: Илим. – 1976. – 120 с.
2. Азаров, Б.Ф. Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений / Б.Ф. Азаров // Ползуновский вестник. – Барнаул. – 2011. – №1. – С. 19-29.
3. Алешин, А.С. Методика и техника спутниковой геодезии для целей деформационного мониторинга / А.С. Алешин, О.Н. Галаганов // Геоэкология. – 2001. – №1. – С. 83-88.
4. 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.
5. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / К.М. Антонович // – М.: ФГУП «Картгеоцентр». – 2006. – Т.2. – 360 с.
6. Афонин, Д.А. Предрасчет точности геодезических измерений при организации мониторинга деформаций порталных частей транспортных тоннелей / Д.А. Афонин, Н.Н. Богомолова, М.Я. Брынь // Геодезия и картография. – 2014. – Т. 75 – № 1. – С. 7-11. DOI: 10.22389/0016-7126-2014-883-1-7-11.
7. Афонин, Д.А. Проектирование геометрических параметров наземного лазерного сканирования при контроле деформаций зданий и сооружений в условиях плотной застройки / Д.А. Афонин, М.Я. Брынь, Е.Г. Толстов // Геодезия и картография. – 2013. – №2. – С. 2-7.
8. Ашраф, А. Анализ структурной деформации цилиндрических резервуаров для хранения нефти с использованием геодезических измерений / А. Ашраф, Р. Бешр, Эхигиатор-Иругхе, О.М. Эхигиатор // Новосибирск. – 2010. – Т. 1. – №1. – С. 38-43.
9. Богданов, В.В. Комплексный геотехнический мониторинг при устройстве котлована в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга /

В.В. Богданов // Известия Петербургского университета путей сообщения. -СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2009. – Вып. 2 (19). – С. 110-120.

10. Богомолова, Е.С. Инженерная геодезия. Учебное пособие, часть I / Е.С. Богомолова, М.Я. Брынъ, В.В. Грузинов, В.А. Коугия, В.И. Полетаев. - СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения. – 2006. – 86 с.

11. Большаков, В.Д. Геодезия. Изыскания и проектирование инженерных сооружений: Справ. пособие./ В.Д. Большаков, Е.Б. Ключин, И.Ю. Васютинский // – М.: Недра, 1991. – 238 с.

12. Вальков, В.А. Применение наземного лазерного сканирования для создания трехмерных цифровых моделей Шуховской башни / В.А. Вальков, М.Г. Мустафин, Г.В. Макаров // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 58-61.

13. Волков, В.И. Новый подход к применению маркшейдерско-геодезических наблюдений для контроля техногенных последствий разработки нефтегазовых месторождений / В.И. Волков, Н.В. Волков, О.В. Волков // Маркшейдерский вестник. – 2018. – №3. – С. 45-50.

14. Волков, В. И. Особенности геодезического контроля за вертикальными деформациями строящегося сооружения / В.И. Волков, Т.Н. Волкова, Н.В. Волков // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2018 г.). – Казань: Молодой ученый. – 2018. – С. 911.

15. Волохов, Е.М. Современные системы контроля сдвижений и деформаций при строительстве подземных сооружений / Е.М. Волохов, С.Ю. Новоженин, Н.С. Бак // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 253-259.

16. Ганьшин, В.Н. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В.Н. Ганьшин, А.Ф. Стороженко, А.Г. Ильин. – М.: Недра. – 1981. – 215 с.

17. Горяинов, И.В. О наилучшей конфигурации обратной линейно-угловой засечки и необходимом количестве пунктов для достижения заданной точности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2016. – Т. 60. – №4. – С. 41-47.

18. Господариков, А.П. Разработка нелинейных математических моделей и численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Записки Горного института. – 2016. – Т.219. – С. 382-386. DOI 10.18454/PMI.2016.3.382.

19. ГОСТ 24846-2012 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений, Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 24 с.

20. ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций зданий и сооружений. – введ. 2013 – 07 – 01. - Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Москва: Стандартинформ. – 2014. – 18 с.

21. ГОСТ Р 53778 - 2010 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. - М.: Стандартинформ. – 2010. – 96 с.

22. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. – 2010. – 56 с.

23. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерения. Общие положения. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 24 с.

24. Градостроительный кодекс Российской Федерации, Федеральный закон РФ от 29.12.2004. N 190-ФЗ, принят Государственной Думой 22.12.2004 г. (ред. от 28.07.2012). - 2012. - Режим доступа: <http://mgrado.ru/images/stories/img/inform/tehregul/FZ/FZ190.pdf>.

25. Грищенко, Е.Н. Современное маркшейдерско-геодезическое обеспечение эксплуатации горных предприятий / Е.Н. Грищенко, М.Г. Мустафин, Ж.А. Юнес, Г.И. Худяков // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2017. – №4. – С. 190-203.

26. Грузин, Н.Е. О необходимой точности измерения деформаций строительных конструкций. / Н.Е. Грузин, В.К. Мисковец // инженерная геодезия. – 1981. – №24. – С. 42-44.

27. Губайдуллина, Р.А. О соотношении точностей линейных и угловых измерений в линейно-угловых сетях / Р.А. Губайдуллина, Ю.Н. Корнилов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. – №2. – С. 145-149.

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

29. Гусев, В.Н. Исследование процессов сдвижения и деформаций горных пород по данным геомеханического мониторинга на Яковлевском руднике / В.Н.Гусев, Е.М.Малюхина // Маркшейдерский вестник. 2017. №5. С. 64-71.

30. Гусев, В.Н. Основы наземной лазерно-сканирующей съемки: Учеб. пособие / В.Н. Гусев, А.И. Науменко, Е.М. Волохов, В.А. Голованов // Санкт-Петербургский государственный горный университет. 2-е изд., испр. СПб. – 2011. – 80 с.

31. Деменков, П.А. Прогноз оседания поверхности земли при сооружении котлована вблизи застройки / П.А. Деменков, О.В. Трушко, В.В. Комолов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – №2. – С. 300-309. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38509787>.

32. Дегтярев, А.М. Использование методов оптимизации для решения инженерно-геодезических задач / А.М. Дегтярев, В.В. Ялтыхов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – №1 (29). – С. 24-33.

33. Дьяков, Б.Н. Выбор оптимального варианта плановой сети сгущения / Б.Н. Дьяков, М.А. Иванов, Д.А. Быкасов // Маркшейдерский вестник. – 2016. – №5. – С. 14-17.

34. Дьяков, Б.Н. Равнительный анализ формул для оценки точности площади многоугольников / Б.Н. Дьяков, А.А. Кузин // Маркшейдерский вестник. – 2020. – №3 (136). – С. 30-33.

35. Елисеева, Н.Н. Применение методов поисковой оптимизации при решении геодезических задач / Н.Н. Елисеева, А.В. Зубов, В.Н. Гусев // Известия

высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. –Т. 64. – №5. – С. 491-498

36. Жуков, Б.Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации. – Новосибирск: СГГА. – 2004. – 376 с.

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

38. Игнатъев, С.А. Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок / С.А. Игнатъев, А.Е. Судариков, А.Ж. Имашев // Записки Горного института. – 2019. – Т. 238. – С. 371-375. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371.

39. Инструкция по наблюдениям за сдвигениями земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений [Текст]: РД 07-166-97: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 17.09.07 №29: введ. в действие 17.09.97. – М. – 2002. – 42 с.

40. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов ГКИНП (ГНТА)-03-010-02. М.: ЦНИИГАиК, – 2003 – 135 с.

41. Информационный сайт интернет-газеты Канонер: <http://karpovka.net/net/145973>.

42. Информационный сайт интернет-издания news :<https://www.theage.com.au/politics/victoria/engineer-fined-480-000-over-mount-waverley-building-site-pit-collapse-20180323-p4z5yw.html>.

43. Информационный сайт интернет-издания news: <http://www.newsru.com/russia/11jul2015/permdom>.

44. Казанцев, А.И. Геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений в условиях уплотнительной застройки с учетом оценки зоны влияния строящегося объекта: диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.32 / Казанцев Александр Игоревич. – Санкт-Петербург. – 2016. – 117 с.

45. Кантемиров, Ю.И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций Ps и SBas / Ю.И. Кантемиров // Геоматика. – Москва. – 2012. – №1. – С.22-26.

46. Карлсон, А.А. Измерение деформаций гидротехнических сооружений / А.А. Карлсон. – М.: Недра, 1984. – 245 с.

47. Кафтан, В.И. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений / В.И. Кафтан, П.А. Докукин // Геодезия и картография. – 2007. – №9. – С. 18-22.

48. Ключин, Е.Б. Оценка точности обратной угловой засечки / Е.Б. Ключин, М.З.Э.-Ш.Заки, Е.П. Власенко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – №3. – С. 31-39.

49. Кожаяев, Ж.Т. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии / Ж.Т. Кожаяев, М.А. Мухамедгалиева, Б.Б. Имансакипова, М.Г. Мустафин // Горный журнал. – 2017. – №2. – С. 39-44.

50. Корнилов, Ю.Н. Использование относительных величин для исключения систематических погрешностей геодезических измерений / Ю.Н. Корнилов, Р.А. Губайдуллина // Маркшейдерский вестник. – 2020. – №3 (136). – С. 17-24.

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

52. Коршунов, В.А. Расчетный метод построения паспорта прочности горной породы по результатам испытаний образцов сферическими инденторами / В.А. Коршунов, Д.Н. Петров, К.Н. Ястребова // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ: Сборник научных трудов. VIII Международная научно-практическая конференция / Санкт-Петербургский горный университет. СПб. – 2017. – С. 256-265.

53. Коугия, В.А. Геодезические работы при строительстве мостов / В.А. Коугия, В.В. Грузинов, О.Н. Малковский – М.: Недра, 1986. – 247 с.

54. Левчук, Г.П. Прикладная геодезия. Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ: учебн. Пособие для вузов / Г.П. Левчук, В.Е. Новак, В.Г. Конусов. – М.: Недра, 1981. – 438 с.

55. Мазуров, Б.Т. Метод оценки дивергенции векторных полей деформаций земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых / Б.Т. Мазуров, М.Г. Мустафин, А.А. Панжин // Записки Горного института. – 2019. – Т. 238. – С. 376-382. DOI 10.31897/PMI.2019.4.376.

56. Маркузе, Ю.И. Исследование алгоритма для анализа деформаций геодезических пунктов при наблюдении за горизонтальными смещениями гидротехнических сооружений / Ю.И. Маркузе, Ань Куонг Лэ // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78. – №7. – С. 23–30. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-925-7-23-30.

57. Маркузе, Ю.И. Основы уравнительных вычислений / Ю. И. Маркузе – М.: Недра. – 1990. – 240 с.

58. Маркузе, Ю.И. Теория математической обработки геодезических измерений. Книга 2. Основы метода наименьших квадратов и уравнительных вычислений: учебное пособие / Ю.И. Маркузе. – М.: МИИГАиК. – 2005. – 280 с.

59. Марфенко, С.В. Геодезические работы по наблюдению за деформациями сооружений: учебн. пособие / С.В. Марфенко. – М.: МИИГАиК. – 2004. – 36 с.

60. Методическая документация в строительстве: МДС 13-22.2009. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений. – утв. Департаментом градостроительной политики, развития и реконструкции города Москва. – 2009. – С. 79.

61. Мицкевич, В.И. О новом методе математической обработки измерений и о перспективах дальнейшего развития теории уравнительных вычислений / В.И. Мицкевич, П.В. Субботенко, В.В. Ялтыхов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – №8. – С. 129-132.

62. 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. Под ред. А.М. Олейника, М.А.Подковыровой. «Актуальные проблемы геодезии, кадастра, рационального земле- и природопользования» –Тюменский индустриальный университет (Тюмень) – 2019. – С. 47-54.

63. Мустафин, М.Г. Оценка вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов деформационной сети / М.Г. Мустафин, Х.В. Нгуен. Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – №3. – С. 11-19.

64. Мустафин, М.Г. Геомеханическая модель системы «выработка – вмещающие породы» и ее использование при прогнозировании динамических проявлений горного давления / М.Г. Мустафин // Горная геомеханика и маркшейдерское дело: ВНИМИ – СПб. – 1999. – С. 57-61.

65. Мустафин, М.Г. Методика контроля допустимых деформаций при строительстве подземных коммуникаций / М.Г. Мустафин, А.С. Наумов // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2012. – №15. – С. 198-201.

66. 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.

67. Наумов, А.С. Мониторинг деформаций земной поверхности при строительстве вертикальных стволов подземных коммуникаций в условиях застроенных территорий / А.С. Наумов // Альманах современной науки и образования. – 2012. – №7. – С. 99-102.

68. Нгуен, Х.В. Анализ и пути развития методов оценки устойчивости опорных реперов при наблюдениях за оседаниями земной поверхности / Х.В. Нгуен, М.Г. Мустафин // Естественные и технические науки. – 2017. – №5 (107). – С. 89-96.

69. Никонов, А.В. Конструкция визирной цели для выполнения высокоточного тригонометрического нивелирования / А.В. Никонов // Вестник СГУГиТ – 2014. – №2. – С. 1-26.

70. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследование и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений: пособие к МГСН 2.07.01. – М.: Москомархитектура . – 2004. – 55 с.

71. Падве, В.А. Метод наименьших квадратов (статика, динамика, модели с уточняемой структурой) / В.А. Падве, Б.Т. Мазуров // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22. – №2. – С. 22-35.

72. Пандул, И.С. Геодезические работы при изысканиях и строительстве гидротехнических сооружений: учебное пособие / И.С. Пандул. – СПб.: Политехника. – 2008. – 154 с.

73. Панжин, А.А. Результаты наблюдений за деформациями породных массивов методами спутниковой геодезии / А.А. Панжин // Сборник трудов международной конференции « Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2001.

74. Певзнер, М.Е. Геомеханика / М.Е. Певзнер, М.А. Иофис, В.Н. Попов // М.: МГГУ. – 2008. – 438 с.

75. Пискунов, М.Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений / М.Е. Пискунов. – М.: Недра. – 1980. – 248 с.

76. Прикладная геодезия. Наблюдение за осадками и деформациями инженерных сооружений / Сост.: А.В. Зубов, Т.В. Зубова, Ю.Х. Гилевский. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). – 2009. – 36 с.

77. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге. ТСН 50-302-2004 – введ. 2004-08-05. – СПб. – 2004. – Режим доступа: http://snipov.net/c_4634_snip_108096.html.

78. Рекомендации по геотехническому сопровождению нового строительства и реконструкции в условиях городской застройки: дополнение к ТСН 50-302-96 «Устройство фундаментов гражданских зданий и сооружений в

Санкт-Петербурге и на территориях, административно подчиненных Санкт-Петербургу» – Режим доступа: <http://georec.narod.ru/str/recomend/>.

79. Рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния эксплуатируемых зданий, расположенных вблизи нового строительства или реконструкции. - введены в действие указанием Москомархитектуры. – 1998. – 85 с.

80. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов. – М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2004. – Режим доступа: http://snipov.net/c_4646_snip_108686.html.

81. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1975. - 160 с.

82. Савиных, В.П. Автоматизация высокоточных измерений в прикладной геодезии. Теория и практика: учебное пособие для высшей школы/ В.П. Савиных, Я.М. Инвандиков, А.А. Майоров, А.В. Зацаринный, И.М. Герасимов; под ред. В.П. Савиных. – М.: Академический проект; Альма Матер. – 2016. – 394 с.

83. 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 Санкт-Петербургский горный университет.

84. Сдвигение и деформации горных пород / В.Н. Гусев, Е.М. Волохов // Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). 2-е изд., исправленное – СПб. – 2008. – 83 с.

85. Селиханович, В.Г. Геодезия: Ч. II – М.: Недра. –1981. – 544 с.

86. Строительные нормы и правила: СНиП 3.01.03-84. Геодезические работы в строительстве. – утв. Постановлением государственного комитета СССР по делам строительства. – 1985. – 19 с.

87. Территориальные строительные нормы: ТСН 31-332-2006. Жилые и общественные высотные здания. – утв. Комитетом по строительству Правительства Санкт-Петербурга. – 2005. – 37 с.

88. 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 . DOI: 10 .22389/0016-7126-2020-963-9-2-13.

89. 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.

90. 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.

91. Шек, В.М. Программный комплекс «Недра» подсистемы геолого-маркшейдерского обеспечения АСУ горных предприятий / В.М. Шек, Е.А. Конкин, А.Г. Литвинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №9. – С. 230–235.

92. Шеховцов, Г.А. О реализации принципа редуцирования при разбивке зданий и сооружений / Г.А. Шеховцов, Д.П. Ивенин // Приволжский научный журнал. – 2017. – №3 (43). – С. 26–34.

93. Щерба, О.С. Методы тригонометрического нивелирования при маркшейдерских наблюдениях на профильных линиях / О.С. Щерба // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – №16. – С. 53-55.

94. Abd El-Wanis Beshr, A. Monitoring Bridge Deformation Using Auto-Correlation Adjustment Technique for Total Station Observations / A. Abd El-Wanis Beshr, M.R. Kaloop // <http://dx.doi.org/10.4236/pos.2013.41001>.

95. Alba, M. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning / M. Alba, L. Fregonese, F. Prandi, M. Scaioni, P. Valgoi // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2006. – Vol. 36. – № 5. – P. 6.

96. Barazzetti, L. Development and implementation of image-based algorithms for measurement of deformations in material testing / L. Barazzetti, M. Scaioni // *Sensors*. – 2010. – Vol. 10. – №8. – pp.7469-7495.
97. Bellone, T. Real-time monitoring for fast deformations using GNSS low-cost receivers / T. Bellone, P. Dabove, A.M. Manzano, C. Taglioretti // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2016. – Vol. 7. – №2. – pp. 458-470, <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2014.966867>.
98. Blachut, T. *Urban Surveying and Mapping* / T. Blachut, A. Chrzanowski, J.H. Saastamoinen // Springer, New York, NY. – 1979. – pp. 42-138.
99. Bryn, M.J. Geodetic monitoring of deformation of building surrounding an underground construction. / M.J. Bryn, D.A. Afonin , N.N. Bogomolova // *Procedia Eng.* – 2017. – Vol. 189. – pp. 386-392.
100. Cai, J. Horizontal deformation rate analysis based on multiepoch GPS measurements in Shanghai / J. Cai, J. Wang, J. Wu, C. Hu, E. Grafarend, J. Chen // *J. Surv. Eng.* – 2008. – Vol. 134. – №4. – pp. 132-137.
101. Casciati, F. Engineering vibration monitoring by GPS: Long duration records / F. Casciati, C. Fuggini // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. – 2009. – Vol. 8. – pp. 459-467.
102. Cerminaro, D.J. *Implementation of Photogrammetry to Improve Proactive Assessment of Retaining Walls along Transportation Corridors*; Michigan Technological University: Houghton, MI, USA, 2014.
103. Chai, J. Numerical investigation of the failure of a building in Shanghai, China / J. Chai, S. Shen, W. Ding , H. Zhu , J. Carter // *Computers and Geotechnics Journal*. – 2014. – Vol. 55. – pp. 482-493.
104. Chan, W.S. Assessment of dynamic measurement accuracy of GPS in three directions / W.S. Chan, Y.L. Xu, X.L. Ding, Y.L. Xiong, W.J. Dai // *J. Surv. Eng.* – 2006. – Vol. 132. – pp. 108-117.
105. Chen, B. Integrated vibration control and health monitoring of building structures: a time-domain approach / B. Chen, Y.L. Xu, X. Zhao // *Smart Structures and Systems*. – 2010. – Vol. 6. – №7. – pp. 811-833.

106. 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. – Vol. 698. – pp. 1-7.

107. Cridland, T. The Use of Ground Based Laser Scanners for the Monitoring of Building Deformations, MEng dissertation, the University of Nottingham. – 2004.

108. Erol, S. A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: analysing deformations using gps/levelling / S. Erol, B. Erol, T. Ayan// Commission VII, WG VII/5. – 2004. – Vol. 7. – №5. – P. 12.

109. Esmaeili, F. Displacement measurement of the soil nail walls by using close range photogrammetry and introduction of CPDA method / F. Esmaeili, M. Varshosaz, H. Ebadi // Measurement. – 2013. – Vol. 46. – №9. – pp. 3449-3459.

110. Even-Tzur, G. Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks / G. Even-Tzur // Zeitschrift für Vermessungswes. – 2006. – Vol. 131. – № 2. – pp. 87-95.

111. Feng, T. Measurement of Surface Changes in a Scaled-Down Landslide Model Using High-Speed Stereo Image Sequences / T. Feng, H. Mi, M. Scaioni, G. Qiao, P. Lu, W.Wang, X. Tong, R. Li // Photogramm. Eng. Remote Sens. – 2016. – Vol. 82. – №7. – pp. 547-557.

112. Fraser, C.S. Hyper redundancy for accuracy enhancement in automated close range photogrammetry / C.S. Fraser, A. Woods, D. Brizzi // Photogramm. Rec. – 2005. – Vol. 20. – pp. 205-217.

113. Ge, L. GPS seismometers with up to 20 Hz sampling rate / L. Ge, S. Han, C. Rizos, Y. Ishikawa, M. Hoshiba, Y. Yoshida, M.Izawa, N. Hashimoto, S. Himori // Earth Planets Space. – 2000. – Vol. 52. – pp. 881-884.

114. Gonzales-Aguilera, D. A new approach for structural monitoring of large dams with a three-dimensional laser scanner / D. Gonzales-Aguilera, J. Gomez-Lahoz, J. Sanchez // Sensors. – 2008. – Vol. 8. – pp. 5866-5883.

115. Gordon, S. Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners / S. Gordon, D. Lichti, J. Franke, M. Stewart // FIG Working Week. – 2004. – Nottingham, United Kingdom. – 28 June - 1 July 2004. – P. 16.
116. Grafarend, E.W. Optimization and design of geodetic networks / E.W.Grafarend, F.Sansò // Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, NewYork, Tokyo: Springer Science & Business Media. – 2012. – P. 698.
117. **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. – Vol. 698. – pp. 1-7.
118. Hill, C.D. Modern deformation monitoring: A multi sensor approach / C.D. Hill, K.D. Sippel // FIG XXII International Congress, Washington DC, USA. – 2002. – P. 12.
119. Ioannidis, C. Rapid 3D Recording of Archaeological Sites Found During Construction Development / C. Ioannidis, M. Tsakiri, S. Soile // FIG Working Week, Athens, Greece. – May 22-27, 2004. – P. 15.
120. Jiang, R. Development of a digital close-range photogrammetric bridge deflection measurement system / R. Jiang, D.V.Jauregui // Measurement. – 2010. – Vol. 43. – № 10. – pp. 1431-1438.
121. Jiang, R. Development of a Digital Photogrammetric System for Bridge Deflection Measurement; New Mexico State University: Las Cruces, New Mexico. – 2005. –187 p.
122. Kaloop, M.R. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique / M.R. Kaloop, J.W. Hu // J. Sens. – 2016. – P. 7494817.
123. Kaloop, M.R. Using Total Station for monitoring the deformation of high strength concrete beams / M.R. Kaloop, A.A. Beshr, M.Y. Elshiekh // 6th International Conference on Vibration Engineering (ICVE'2008), Dalian. – 2008. – pp. 411-419.
124. Li, L. Measuring unsaturated soil deformations during triaxial testing using a photogrammetry-based method / L. Li, X. Zhang, G. Chen, R. Lytton // Can. Geotech. J. – 2015. – Vol. 53. – pp. 472-489.

125. Lichti, D. The effects of reflecting surface material properties on time of flight laser scanner measurements / D. Lichti, B. Harvey // Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa 2002. – P. 9.

126. Limpach, P. GNSS for Deformation and Geohazard Monitoring in the Swiss Alps / P. Limpach, A. Geiger, H. Raetzo // 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2016). International Federation of Surveyors, Vienna, Austria <http://hdl.handle.net/20.500>. – 2016. – Vol. 11850. – P. 126642.

127. Litvinenko, V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018. Saint-Petersburg, Russia, 22 May 2018). London: Taylor and Francis Group. UK. – 2018. – Vol. 1. – pp. 3-16.

128. Litvinenko, V. Preface. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses // International European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018. Saint-Petersburg, Russia, 22 May 2018). London: Taylor and Francis Group. UK. – 2018. – Vol. 1. – pp. 9-15.

129. Lovas, T. Laser scanning in deformation measurement / T. Lovas, A. Berényi // GIM Int. – 2009, – Vol. 23. – №3. – pp. 17-21.

130. Marazio, A. Monitoring of Dams and their Foundations. State of the art. Bulletin 68 CIGB ICOLD. – Paris – 1989. – Vol. 68.

131. McHugh, E.L. Applications of ground-based radar to mine slope monitoring. / E.L. McHugh, J. Dwyer, G. David, D.G. Long, C. Sabine // Report of Investigations 9666; Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health. – 2006. – 39 p.

132. Mills, J. Geomatics Techniques for Structural Surveying / J. Mills, D. Barber // Journal of Surveying Engineering. – 2004. – Vol. 130. – №2. – pp. 56-64.

133. Moschas, F. Dynamic Deflections of a Stiff Footbridge Using 100-Hz GNSS and Accelerometer Data / F. Moschas, S. Stiros // J. Surv. Eng. – 2015. – Vol. 141. – № 4. – 4015003.

134. Moschas, F. Dynamic multipath in structural bridge monitoring: An experimental approach / F. Moschas, S. Stiros // *GPS Solut.* – 2014. – Vol. 18. – pp. 209-218.

135. Mrówczyńska, M. The network structure evolutionary optimization to geodetic monitoring in the aspect of information entropy / M.Mrówczyńska, J.Sztubecki // *Measurement.* – 2021. Vol. 179. – P. 109369. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109369>.

136. Mustafin, M.G. Monitoring of Deformation Processes in Buildings and Structures in Metropolises / M.G. Mustafin , A.I. Kazantsev, V.A. Valkov // *Procedia Engineering.* – 2017. – № 189. – pp. 729-736.

137. Ozbek, M. Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry / M. Ozbek, D.J. Rixen, O.Erne, G. Sanow // *Energy.* – 2010. – Vol. 35. – №12. – pp. 4802-4811.

138. Palazzo, D. Dynamic Monitoring of Structures Using a Robotic Total Station / D. Palazzo, R. Friedmann, C. Nadal, M. Santos Filho, L. Veiga, P. Faggion // *Proceedings of the Shaping the Change XXIII FIG Congress, Munich, Germany.* – 2006. – Vol. 813. – P. 10.

139. Pavlovich, A.A. Geomechanical substantiation of calculate indentors of the rock mass strength for slopes stability analysis of open pit / A.A.Pavlovich, V.A.Korshunov, S.V.Tsirel, N.Ya.Melnikov, A.A.Bazhukov // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018, Saint-Petersburg, Russia, 22-26 May 2018).* London: Taylor and Francis Group. UK. – 2018. – Vol. 2. –pp. 1053-1058.

140. PLAXIS 3D. Руководство пользователя / под ред. R.B.J. Brinkgreve. – 2012. – 670 p.

141. Ran, L. Long-term deformation monitoring of metro-tunnel airshaft excavation during construction stage / L. Ran, T.H. Yi, X.W. Ye, X.B. Dong // *International Journal of Distributed Sensor Networks.* – 2012. – Vol. 8. – №10. – Article ID 972893. – P. 11.

142. Roberts, G. A Remote Bridge Health Monitoring System Using Computational Simulation and Single Frequency GPS Data / G. Roberts, E. Cosser, X. Meng, A. Dodson, A. Morris, M. Meo // Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, 25-28 May 2003. – P. 7.

143. Rüeger, J. M. Propagation of Electromagnetic Waves Through the Atmosphere. In Electronic Distance Measurement // Springer, Berlin, Heidelberg. – 1990. – pp. 48-72.

144. Rüeger, J.M. EDM monitoring surveys using a local scale parameter model / J.M. Rüeger, F.K. Brunner, K. Becek // Proceedings of the Symposium on Surveillance and Monitoring Surveys. Department of Surveying and Land Information, University of Melbourne, Australia, 9-10 November. – 1989. – pp. 183-194.

145. Rüeger, J.M. Monitoring of an open cut mine with a surveying robot / J.M. Rüeger, G. Alanko and T.J. Snow // Australian Surveyor. –1994. – Vol. 39. – №4. – pp. 252-266.

146. Rüeger, J.M. Monitoring with surveying robots // International Journal for Surveying, Mapping and Applied GIS. – 1994. – Vol. 8. – № 2. – pp. 58-63.

147. Scaioni, M. Photogrammetric techniques for monitoring tunnel deformation / M. Scaioni, L. Barazzetti, A. Giussani, M. Previtali, F. Roncoroni, M.I. Alba // Earth Science. Informatics. – 2014. – Vol. 7. – № 2. – pp. 83-95.

148. Schlotfeldt, P. Overhanging rock slope by design: An integrated approach using rock mass strength characterization, largescale numerical modelling and limit equilibrium methods / P. Schlotfeldt, D. Elmo, B. Panton // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2018. – №10. – pp. 72-90.

149. Schofield, W. Engineering surveying / W. Schofield, M. Breach // Oxford: Linacre House. – 2007. – 367 p.

150. Schulz, T. Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning / T. Schulz, H. Ingensand // FIG Working Week Athens, Greece, May 22-27. – 2004. – P. 14.

151. Stiros, S. Response of a Historical Short-Span Railway Bridge to Passing Trains: 3-D Deflections and Dominant Frequencies Derived from Robotic Total Station

(RTS) Measurements / S. Stiros, P. Psimoulis // Engineering Structures. – 2012. – Vol. 45 – pp. 362-371. doi:10.1016/j.engstruct.2012.06.029

152. Strain Field Measurements Using Digital Photogrammetry for Large Inflatable Structures / X. Luo, H. Tan, G. Lin, Y. Lian // Exp. Tech. – 2017. – Vol. 41. – pp. 453-462.

153. The Nicoll Highway Collapse / D.W. Hight, T.O. Henderson, A.R. Pickles, S. Marchand // Yumpu Magazine, Available online at www.yumpu.com.

154. The Riyadh Metro District Map [electronic resource]. – Access mode: http://riyadhmetro.sa/wp-content/uploads/2017/07/Riyadh-Metro-District-Map_-Stations.

155. The Leica equipment [electronic resource]. – Access mode: https://www.google.com/search?q=the+leica+tribrach&tbm=isch&chips=q:the+leica+tribrach,online_chips:prism:BxYks7afFP4%3D&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwjwuvypx7v0AhUTohoKHa4FB04Q4lYoAHoECAEQEA&biw=1349&bih=657.

156. Tsvetkov, R. Deformation monitoring of load-bearing reinforced concrete beams / R. Tsvetkov, I. Shardakov, A. Shestakov, G. Gusev, V. Epin // Procedia Struct. Integr. – 2017. – Vol. 5. – Pp. 620-626.

157. Van Gosliga, R. Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning / R. Van Gosliga, R. Lindenbergh, N. Pfeifer // In Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Dresden, Germany, September 25-27. – 2006. – Vol. XXXVI (Part 5), (CD-ROM). – P. 6.

158. Wells, D. The method of least squares / D. Wells, E.J. Krakiwsky // Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report. University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada. – 1971. – №18. – 192 p.

159. Whitaker, C. Design of an Automated Dam Deformation Monitoring System: A Case Study / C. Whitaker, M. Duffy, A. Chrzanowski // Journal of Geospatial Engineering. – 1971. – Vol. 2. – №1. – pp.23-34.

160. Xiao, Z. Rapid three-dimension optical deformation measurement for transmission tower with different load / Z. Xiao, J. Liang, D. Yu, J. Liu // *Opt. Lasers Eng.* – 2010. – Vol. 48. – pp. 869-876.

161. Yang, J.P. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / J.P. Yang, W.Z. Chen, D.S. Yang, J.Q. Yuan // *Computers and Geotechnics.* – 2015. – Vol. 64. – pp. 20-31.

162. Ye, X.W. Safety monitoring of railway tunnel construction using FBG sensing technology / X.W. Ye, Y.Q. Ni, J.H. Yin // *Advances in Structural Engineering.* – 2013. – Vol. 16. – № 8. – pp. 1401-1409.

163. Yi, T.H. Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge. Meas / T.H. Yi, H.N. Li, M. Gu // *J. Int. Meas. Confed.* – 2013. – Vol. 46. – pp. 420-432.

164. Zahariadis, H. Low cost monitoring system in the Open Pit Lignite Mines of Megalopoli, Greece / H. Zahariadis, M. Tsakiri // *3rd International Association of Geodesy (IAG)/12th FIG Symposium.* – Baden. – 2006. – P. 10.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

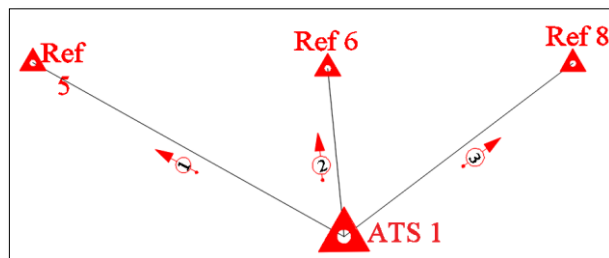
Результаты расчета координат «АТС 1» и оценки точности его положения с использованием упрощенного метода обратной-угловой засечки (традиционный метод)

ORIGIN := 1

Исходные данные

$$\rho := 206265 \quad \zeta := \frac{180}{\pi} = 57.295780 \quad \sigma_s := 0.0006 \quad ppm := 1 \quad \sigma_\beta := 0.5''$$

$$Coord = \begin{pmatrix} \langle X_A \rangle & \langle Y_A \rangle \\ \langle X_B \rangle & \langle Y_B \rangle \\ \langle X_C \rangle & \langle Y_C \rangle \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} Deg \beta_1 \\ Deg \beta_2 \end{matrix}$$



Точка А – здесь это точка «Ref 5».

Точка В – здесь это точка «Ref 6».

Точка С – здесь это точка «Ref 8».

Точка Р – здесь это точка «АТС1».

Угол β_1 - это угол между точкой «Ref 5» и точкой «Ref 6».

Угол β_2 - это угол между точкой «Ref 6» и точкой «Ref 8».

$$Coord = \begin{pmatrix} 167924.5025 & 2437717.1919 \\ 167955.3246 & 2437649.3391 \\ 167983.0784 & 2437593.9568 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} Deg \beta_1 := 55.4651 & ; & \beta_1 := \frac{Deg \beta_1}{\zeta} \\ Deg \beta_2 := 58.5766 & ; & \beta_2 := \frac{Deg \beta_2}{\zeta} \end{matrix}$$

Азимуты и расстояния векторов ВА и ВС рассчитываются следующим образом:

$$Az_{BA} := angle(Coord_{1,2} - Coord_{2,2}, Coord_{1,1} - Coord_{2,1})$$

$$S_{AB} := \sqrt{(Coord_{1,2} - Coord_{2,2})^2 + (Coord_{1,1} - Coord_{2,1})^2}$$

$$Az_{BC} := \text{angle}(\text{Coord}_{3,2} - \text{Coord}_{2,2}, \text{Coord}_{3,1} - \text{Coord}_{2,1})$$

$$S_{BC} := \sqrt{(\text{Coord}_{3,2} - \text{Coord}_{2,2})^2 + (\text{Coord}_{3,1} - \text{Coord}_{2,1})^2}$$

$$Az_{BA} = 5.8568 \quad Az_{BA} \cdot \zeta = 335.5701 \quad S_{AB} = 74.5252$$

$$Az_{BC} = 2.677 \quad Az_{BC} \cdot \zeta = 153.3831 \quad S_{BC} = 61.9473$$

$$\gamma := Az_{BA} - Az_{BC} \quad \gamma = 3.1798 \quad \text{Deg } \gamma := \gamma \cdot \zeta = 182.187$$

$$X := 2\pi - \beta_1 - \beta_2 - \gamma \quad X = 1.113 \quad \text{Deg } X := X \cdot \zeta = 63.7713$$

$$K := \frac{S_{AB} \cdot \sin(\beta_2)}{S_{BC} \cdot \sin(\beta_1)} \quad K = 1.2462$$

$$\theta := \text{acot}\left(\frac{K + \cos(X)}{\sin(X)}\right) \quad \theta = 0.4884 \quad \text{Deg } \theta := \theta \cdot \zeta = 27.9848$$

$$S_{AP} := S_{AB} \cdot \left(\frac{\sin(\pi - \theta - \beta_1)}{\sin(\beta_1)}\right) \quad S_{AP} = 89.8767 \quad (S_{AP} := S_{PA})$$

$$S_{PB} := S_{AB} \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin(\beta_1)} \quad S_{PB} = 42.4506$$

$$S_{PC} := S_{BC} \cdot \frac{\sin[\pi - (X - \theta) - \beta_2]}{\sin(\beta_2)} \quad S_{PC} = 72.3838$$

$$Az_{AB} := \text{angle}(\text{Coord}_{2,2} - \text{Coord}_{1,2}, \text{Coord}_{2,1} - \text{Coord}_{1,1})$$

$$Az_{AP} := Az_{AB} + \theta \quad \text{Deg } Az_{AP} := Az_{AP} \cdot \zeta = 183.5549$$

$$X_P := \text{Coord}_{1,1} + (S_{AP} \cdot \sin(Az_{AP})) \quad X_P = 167918.9297$$

$$Y_P := \text{Coord}_{1,2} + (S_{AP} \cdot \cos(Az_{AP})) \quad Y_P = 2437627.4881$$

Проверка правильности вычислений будет следующей:

$$S1_{PB} := \sqrt{(\text{Coord}_{2,1} - X_P)^2 + (\text{Coord}_{2,2} - Y_P)^2} \quad S1_{PB} = 42.4506$$

$$S1_{PC} := \sqrt{(\text{Coord}_{3,1} - X_P)^2 + (\text{Coord}_{3,2} - Y_P)^2} \quad S1_{PC} = 72.3838$$

$$\Lambda := \text{if} [(-0.0001 \leq S1_{PB} - S_{PB}) < 0.0001, \text{"OK"}, \text{"Необходимо проверить"}]$$

$$\Omega := \text{if} [(-0.0001 \leq S1_{PC} - S_{PC}) < 0.0001, \text{"OK"}, \text{"Необходимо проверить"}]$$

$$\Lambda = OK \quad \Omega = OK$$

Точность точки P вычисляется следующим образом:

$$m_{03} = 1000 \cdot \left| \frac{\sigma_{\beta} \cdot S_{PB}}{\rho \cdot \sin(\beta_1 + \beta_2 + \gamma)} \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{PA}}{S_{AB}}\right)^2 + \left(\frac{S_{PC}}{S_{BC}}\right)^2} \right|$$

$$m_{03} = 0.1926 \text{ мм}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

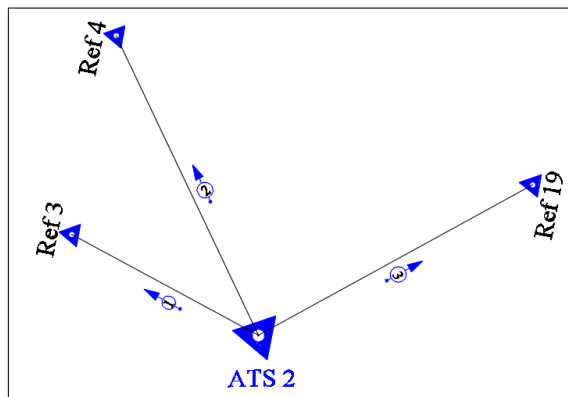
Результаты расчета координат «АТС 2» и оценки точности его положения с использованием упрощенного метода обратной-угловой засечки (традиционный метод)

ORIGIN := 1

Исходные данные

$$\rho := 206265 \quad \zeta := \frac{180}{\pi} = 57.295780 \quad \sigma_s := 0.0006 \quad ppm := 1 \quad \sigma_\beta := 0.5''$$

$$Coord = \begin{pmatrix} \langle X_A \rangle & \langle Y_A \rangle \\ \langle X_B \rangle & \langle Y_B \rangle \\ \langle X_C \rangle & \langle Y_C \rangle \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} Deg \beta_1 \\ Deg \beta_2 \end{matrix}$$



Точка А – здесь это точка «Ref 3».

Точка В – здесь это точка «Ref 4».

Точка С – здесь это точка «Ref 19».

Точка Р – здесь это точка «ATS2».

Угол β_1 - это угол между точкой «Ref 3» и точкой «Ref 4».

Угол β_2 - это угол между точкой «Ref 4» и точкой «Ref 19».

$$Coord = \begin{pmatrix} 167897.4033 & 2437774.558 \\ 167921.3426 & 2437720.360 \\ 167800.1112 & 2437685.436 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} Deg \beta_1 := 36.1889 & ; & \beta_1 := \frac{Deg \beta_1}{\zeta} \\ Deg \beta_2 := 85.5182 & ; & \beta_2 := \frac{Deg \beta_2}{\zeta} \end{matrix}$$

Азимуты и расстояния векторов BA и BC рассчитываются следующим образом:

$$Az_{BA} := \text{angle}(\text{Coord}_{1,2} - \text{Coord}_{2,2}, \text{Coord}_{1,1} - \text{Coord}_{2,1})$$

$$S_{AB} := \sqrt{(\text{Coord}_{1,2} - \text{Coord}_{2,2}, \text{Coord}_{1,1} - \text{Coord}_{2,1})}$$

$$Az_{BC} := \text{angle}(\text{Coord}_{3,2} - \text{Coord}_{2,2}, \text{Coord}_{3,1} - \text{Coord}_{2,1})$$

$$S_{BC} := \sqrt{(\text{Coord}_{3,2} - \text{Coord}_{2,2}, \text{Coord}_{3,1} - \text{Coord}_{2,1})}$$

$$Az_{BA} = 5.8673 \quad Az_{BA} \cdot \zeta = 336.1689 \quad S_{AB} = 59.2496$$

$$Az_{BC} = 4.4319 \quad Az_{BC} \cdot \zeta = 253.9295 \quad S_{BC} = 126.1616$$

$$\gamma := Az_{BA} - Az_{BC} \quad \gamma = 1.4353 \quad \text{Deg } \gamma := \gamma \cdot \zeta = 82.2394$$

$$X := 2\pi - \beta_1 - \beta_2 - \gamma \quad X = 2.7236 \quad \text{Deg } X := X \cdot \zeta = 156.0535$$

$$K := \frac{S_{AB} \cdot \sin(\beta_2)}{S_{BC} \cdot \sin(\beta_1)} \quad K = 0.7929$$

$$\theta := \text{acot}\left(\frac{K + \cos(X)}{\sin(X)}\right) \quad \theta = 1.8605 \quad \text{Deg } \theta := \theta \cdot \zeta = 106.5969$$

$$S_{AP} := S_{AB} \cdot \left(\frac{\sin(\pi - \theta - \beta_1)}{\sin(\beta_1)}\right) \quad S_{AP} = 60.6893 \quad (S_{AP} := S_{PA})$$

$$S_{PB} := S_{AB} \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin(\beta_1)} \quad S_{PB} = 96.1660$$

$$S_{PC} := S_{BC} \cdot \frac{\sin[\pi - (X - \theta) - \beta_2]}{\sin(\beta_2)} \quad S_{PC} = 89.5227$$

$$Az_{AB} := \text{angle}(\text{Coord}_{2,2} - \text{Coord}_{1,2}, \text{Coord}_{2,1} - \text{Coord}_{1,1})$$

$$Az_{AP} := Az_{AB} + \theta \quad \text{Deg } Az_{AP} := Az_{AP} \cdot \zeta = 262.7658$$

$$X_P := \text{Coord}_{1,1} + (S_{AP} \cdot \sin(Az_{AP})) \quad X_P = 167837.1971$$

$$Y_P := \text{Coord}_{1,2} + (S_{AP} \cdot \cos(Az_{AP})) \quad Y_P = 2437766.9157$$

Проверка правильности вычислений будет следующей:

$$S1_{PB} := \sqrt{(Coord_{2,1} - X_P)^2 + (Coord_{2,2} - Y_P)^2} \quad S1_{PB} = 96.1660$$

$$S1_{PC} := \sqrt{(Coord_{3,1} - X_P)^2 + (Coord_{3,2} - Y_P)^2} \quad S1_{PC} = 89.5227$$

$$\Lambda := \text{if} \left[(-0.0001 \leq S1_{PB} - S_{PB}) < 0.0001, \text{"OK"}, \text{"Необходимо проверить"} \right]$$

$$\Omega := \text{if} \left[(-0.0001 \leq S1_{PC} - S_{PC}) < 0.0001, \text{"OK"}, \text{"Необходимо проверить"} \right]$$

$$\Lambda = \text{OK} \quad \Omega = \text{OK}$$

Точность точки P вычисляется следующим образом:

$$m_{03} = 1000 \cdot \left| \frac{\sigma_\beta \cdot S_{PB}}{\rho \cdot \sin(\beta_1 + \beta_2 + \gamma)} \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{PA}}{S_{AB}}\right)^2 + \left(\frac{S_{PC}}{S_{BC}}\right)^2} \right|$$

$$m_{03} = 0.7157 \text{ мм}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты расчета координат «АТС 1» и оценки точности его положения путем разработанного метода и алгоритма с использованием Метода Наименьших Квадратов (МНК)

ORIGIN := 1 П := 8 № Исходных точек

$$\begin{array}{l}
 \left(\begin{array}{ll}
 \langle \text{Dir1} \rangle & \langle \text{ГП1} \rangle \\
 \langle \text{Dir2} \rangle & \langle \text{ГП2} \rangle \\
 \langle \text{Dir3} \rangle & \langle \text{ГП3} \rangle \\
 \langle \text{Dir4} \rangle & \langle \text{ГП4} \rangle \\
 \langle \text{Dir5} \rangle & \langle \text{ГП5} \rangle \\
 \langle \text{Dir6} \rangle & \langle \text{ГП6} \rangle \\
 \langle \text{Dir7} \rangle & \langle \text{ГП7} \rangle \\
 \langle \text{Dir8} \rangle & \langle \text{ГП8} \rangle
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{Coord} = \left(\begin{array}{ll}
 \langle X_{\text{Ref17}} \rangle & \langle Y_{\text{Ref17}} \rangle \\
 \langle X_{\text{Ref5}} \rangle & \langle Y_{\text{Ref5}} \rangle \\
 \langle X_{\text{Ref6}} \rangle & \langle Y_{\text{Ref6}} \rangle \\
 \langle X_{\text{Ref7}} \rangle & \langle Y_{\text{Ref7}} \rangle \\
 \langle X_{\text{Ref8}} \rangle & \langle Y_{\text{Ref8}} \rangle \\
 \langle X_{\text{Ref12}} \rangle & \langle Y_{\text{Ref12}} \rangle \\
 \langle X_{\text{Ref15}} \rangle & \langle Y_{\text{Ref15}} \rangle \\
 \langle X_{\text{Ref16}} \rangle & \langle Y_{\text{Ref16}} \rangle
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Исходные данные

$$\rho := 206265$$

$$\zeta := \frac{180}{\pi} = 57.295780$$

$$\mu_0 := 1$$

$$\sigma_s := 0.0006 \quad ppm := 1$$

$$\sigma_a := 0.5$$

$$n := 2.П \quad t := 3 \quad r := n - t$$

$$\text{Raw} := \left(\begin{array}{ll}
 0.000000 & 123.3912 \\
 70.898203 & 89.8761 \\
 126.363261 & 42.4502 \\
 159.925581 & 47.3889 \\
 184.939878 & 72.3832 \\
 261.529536 & 105.5849 \\
 293.766581 & 67.7021 \\
 350.636150 & 143.2590
 \end{array} \right)$$

$$\text{Coord} := \left(\begin{array}{ll}
 167805.0602 & 2437675.0191 \\
 167924.5025 & 2437717.1919 \\
 167955.3246 & 2437649.3391 \\
 167966.2719 & 2437625.3531 \\
 167983.0784 & 2437593.9568 \\
 167893.0537 & 2437525.1222 \\
 167869.8829 & 2437580.8191 \\
 167779.5090 & 2437660.4269
 \end{array} \right)$$

Начальная ориентация (Initial Orientation) $Or_0 := 292.655969309144$

Расстояние между первыми двумя исходными точками:

$$L_{1,2} := \sqrt{(Coord_{2,1} - Coord_{1,1})^2 + (Coord_{2,2} - Coord_{1,2})^2}$$

Азимут первой линии визирования (1-P)

$$\alpha := \operatorname{asin} \left[Raw_{2,2} \cdot \frac{\sin \left[\left(\frac{\pi}{180} Raw \right)_{2,1} \right]}{L_{1,2}} \right] = 0.734839$$

$$Az_{1,2} := \operatorname{angle}(Coord_{2,2} - Coord_{1,2}, Coord_{2,1} - Coord_{1,1}) \quad Az_{1,2} \cdot \zeta = 70.552844$$

$$Az_{1,P} := Az_{1,2} + \alpha = 1.966218 \quad Az_{1,P} \cdot \zeta = 112.656017$$

Приближенные координаты точки P:

$$X_P := Coord_{1,1} + (Raw_{1,2} \cdot \sin(Az_{1,P})) = 167918.9298$$

$$Y_P := Coord_{1,2} + (Raw_{1,2} \cdot \cos(Az_{1,P})) = 2437627.4891$$

Расчетные расстояния (S) и азимуты (G) на основе первоначально рассчитанных координат (приближенные координаты точки P):

i := 1..Π

$$S_i := \sqrt{(X_P - Coord_{i,1})^2 + (Y_P - Coord_{i,2})^2}$$

$$S = \begin{pmatrix} 123.391200 \\ 89.875744 \\ 42.450022 \\ 47.390260 \\ 72.384094 \\ 105.586706 \\ 67.702927 \\ 143.258715 \end{pmatrix}$$

$$G_i := \text{angle}(\text{Coord}_{i,2} - Y_P, \text{Coord}_{i,1} - X_P). \zeta$$

$$G = \begin{pmatrix} 292.65602 \\ 3.55487 \\ 59.02104 \\ 92.58333 \\ 117.59734 \\ 194.18595 \\ 226.42252 \\ 283.29227 \end{pmatrix}$$

Матрица В строится следующим образом:

$$M_{i,1} := \text{if}(G_{i,1} - Or_0 > -0.0005, G_{i,1} - Or_0, G_{i,1} - Or_0 + 360)$$

$$M_{i,2} := \frac{-(\text{Coord}_{i,2} - Y_P). \zeta}{(S_{i,1})^2}$$

$$M_{i,3} := \frac{(\text{Coord}_{i,1} - X_P). \zeta}{(S_{i,1})^2}$$

$$M_{i,4} := \frac{-(\text{Coord}_{i,1} - X_P)}{(S_{i,1})}$$

$$M_{i,5} := \frac{-(\text{Coord}_{i,2} - Y_P)}{(S_{i,1})}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0.000048 & -0.178864 & -0.428511 & 0.922834 & -0.385198 \\ 70.898906 & -0.636273 & 0.039528 & -0.062004 & -0.998076 \\ 126.365075 & -0.694734 & 1.157194 & -0.857356 & -0.514723 \\ 159.927359 & 0.054493 & 1.207791 & -0.998984 & 0.045072 \\ 184.941373 & 0.366690 & 0.701493 & -0.886225 & 0.463255 \\ 261.529983 & 0.526094 & -0.132985 & 0.245070 & 0.969505 \\ 293.766550 & 0.583372 & -0.613083 & 0.724443 & 0.689335 \\ 350.636297 & -0.091955 & -0.389232 & 0.973210 & -0.229918 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{l}
B_{S_{i,1}} := 0 \\
B_{S_{i,2}} := M_{i,4} \\
B_{S_{i,3}} := M_{i,5}
\end{array}
\Rightarrow B_S = \begin{pmatrix} 0.000000 & 0.922834 & -0.385198 \\ 0.000000 & -0.062004 & -0.998076 \\ 0.000000 & -0.857356 & -0.514723 \\ 0.000000 & -0.998984 & 0.045072 \\ 0.000000 & -0.886225 & 0.463255 \\ 0.000000 & 0.245070 & 0.969505 \\ 0.000000 & 0.724443 & 0.689335 \\ 0.000000 & 0.973210 & -0.229918 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{l}
B_{Dir_{i,1}} := -1 \\
B_{Dir_{i,2}} := M_{i,2} \\
B_{Dir_{i,3}} := M_{i,3}
\end{array}
\Rightarrow B_{Dir} = \begin{pmatrix} -1.000000 & -0.178864 & -0.428511 \\ -1.000000 & -0.636273 & 0.039528 \\ -1.000000 & -0.694734 & 1.157194 \\ -1.000000 & 0.054493 & 1.207791 \\ -1.000000 & 0.366690 & 0.701493 \\ -1.000000 & 0.526094 & -0.132985 \\ -1.000000 & 0.583372 & -0.613083 \\ -1.000000 & -0.091955 & -0.389232 \end{pmatrix}$$

$$B := \text{stack}(B_S, B_{Dir}) \Rightarrow B = \begin{pmatrix} 0.000000 & 0.922834 & -0.385198 \\ 0.000000 & -0.062004 & -0.998076 \\ 0.000000 & -0.857356 & -0.514723 \\ 0.000000 & -0.998984 & 0.045072 \\ 0.000000 & -0.886225 & 0.463255 \\ 0.000000 & 0.245070 & 0.969505 \\ 0.000000 & 0.724443 & 0.689335 \\ 0.000000 & 0.973210 & -0.229918 \\ -1.000000 & -0.178864 & -0.428511 \\ -1.000000 & -0.636273 & 0.039528 \\ -1.000000 & -0.694734 & 1.157194 \\ -1.000000 & 0.054493 & 1.207791 \\ -1.000000 & 0.366690 & 0.701493 \\ -1.000000 & 0.526094 & -0.132985 \\ -1.000000 & 0.583372 & -0.613083 \\ -1.000000 & -0.091955 & -0.389232 \end{pmatrix}$$

Вектор W (матрица-столбцом) разности измеренных и расчетных величин будет следующим:

$$W_{S_i} := Raw_{i,2} - S_{i,1}$$

$$W_s = \begin{pmatrix} -0.000000 \\ 0.000356 \\ 0.000178 \\ -0.001360 \\ -0.000894 \\ -0.001806 \\ -0.000827 \\ 0.000285 \end{pmatrix}$$

$$W_{Dir_i} := Raw_{i,1} - M_{i,1}$$

$$W_{Dir} = \begin{pmatrix} -0.000048 \\ -0.000703 \\ -0.001814 \\ -0.001778 \\ -0.001495 \\ -0.000447 \\ 0.000031 \\ -0.000147 \end{pmatrix}$$

$$W := stack(W_s, W_{Dir}) \Rightarrow W = \begin{pmatrix} -0.000000 \\ 0.000356 \\ 0.000178 \\ -0.001360 \\ -0.000894 \\ -0.001806 \\ -0.000827 \\ 0.000285 \\ -0.000048 \\ -0.000703 \\ -0.001814 \\ -0.001778 \\ -0.001495 \\ -0.000447 \\ 0.000031 \\ -0.000147 \end{pmatrix}$$

Весовая матрица (P) будет иметь вид:

$$j := (\Pi + 1)..(2.\Pi)$$

$$weight_i := \frac{\mu_0^2}{\left[\sigma_s + \left(ppm \cdot \frac{Raw_{i,2}}{10^6} \right) \right]^2}$$

$$weight_j := \frac{\mu_0^2}{\left(\frac{\sigma_\alpha}{3600} \right)^2}$$

$$P := diag(weight)$$

$$P = \begin{pmatrix} 1910968.628083 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 2101153.596280 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 2422819.512738 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 2385994.852469 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 2211904.094438 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 2008636.933499 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 2243027.074201 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1810171.181813 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 \end{pmatrix}$$

Матрица нормированных коэффициентов параметрических уравнений: $U := B^T \cdot PW$

Обратная матрица: $Q := (B^T \cdot P \cdot B)^{-1} \Rightarrow Q = \begin{pmatrix} 2.608181 \times 10^{-9} & 3.459265 \times 10^{-10} & 1.037444 \times 10^{-9} \\ 3.459265 \times 10^{-10} & 1.120550 \times 10^{-8} & 2.311623 \times 10^{-9} \\ 1.037444 \times 10^{-9} & 2.311623 \times 10^{-9} & 5.488336 \times 10^{-9} \end{pmatrix}$

Матрица коррекции для приближенных координат: $\beta := QU \Rightarrow \beta = \begin{pmatrix} 0.000595 \\ 0.000010 \\ -0.001064 \end{pmatrix}$

Расчетные координаты, которые будут использоваться в следующей итерации:

$$Or := Or_0 + \beta_{1,1} \Rightarrow Or = 292.656564103938$$

$$X_{P_0} := X_P + \beta_{2,1} \Rightarrow X_{P_0} = 167918.929812$$

$$Y_{P_0} := Y_P + \beta_{3,1} \Rightarrow Y_{P_0} = 2437627.488024$$

Надо повторить процесс, чтобы β стала минимальной.

Приближенные координаты точки P (Итерация №1):

$$Or := Or_0 + \beta_{1,1} \Rightarrow Or = 292.656564103938$$

$$X_{P_0} := X_P + \beta_{2,1} \Rightarrow X_{P_0} = 167918.929812$$

$$Y_{P_0} := Y_P + \beta_{3,1} \Rightarrow Y_{P_0} = 2437627.488024$$

Расчетные расстояния (S) и азимуты (G) на основе первоначально рассчитанных координат (приближенные координаты точки P):

i:=1..П

$$S_i := \sqrt{(X_P - Coord_{i,1})^2 + (Y_P - Coord_{i,2})^2}$$

$$S = \begin{pmatrix} 123.391619 \\ 89.876806 \\ 42.450561 \\ 47.390201 \\ 72.383592 \\ 105.585677 \\ 67.702201 \\ 143.258970 \end{pmatrix}$$

$$G_i := angle(Coord_{i,2} - Y_P, Coord_{i,1} - X_P). \zeta$$

$$G = \begin{pmatrix} 292.65647 \\ 3.55483 \\ 59.01981 \\ 92.58204 \\ 117.5966 \\ 194.1861 \\ 226.42318 \\ 283.29268 \end{pmatrix}$$

Матрица B строится следующим образом:

$$M_{i,1} := \text{if}(G_{i,1} - Or_0 > -0.0005, G_{i,1} - Or_0, G_{i,1} - Or_0 + 360)$$

$$M_{i,2} := \frac{-(Coord_{i,2} - Y_P) \cdot \zeta}{(S_{i,1})^2}$$

$$M_{i,3} := \frac{(Coord_{i,1} - X_P) \cdot \zeta}{(S_{i,1})^2}$$

$$M_{i,4} := \frac{-(Coord_{i,1} - X_P)}{(S_{i,1})}$$

$$M_{i,5} := \frac{-(Coord_{i,2} - Y_P)}{(S_{i,1})}$$

$$M = \begin{pmatrix} -0.000093 & -0.178866 & -0.428508 & 0.922831 & -0.385205 \\ 70.898262 & -0.636266 & 0.039527 & -0.062004 & -0.998076 \\ 126.363241 & -0.694750 & 1.157164 & -0.857345 & -0.514742 \\ 159.925479 & 0.054466 & 1.207794 & -0.998985 & 0.045050 \\ 184.940036 & 0.366684 & 0.701503 & -0.886231 & 0.463243 \\ 261.529535 & 0.526099 & -0.132988 & 0.245072 & 0.969505 \\ 293.766614 & 0.583371 & -0.613096 & 0.724451 & 0.689327 \\ 350.636116 & -0.091958 & -0.389230 & 0.973208 & -0.229925 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} B_{S_{i,1}} &:= 0 \\ B_{S_{i,2}} &:= M_{i,4} \\ B_{S_{i,3}} &:= M_{i,5} \end{aligned} \Rightarrow B_S = \begin{pmatrix} 0.000000 & 0.922831 & -0.385205 \\ 0.000000 & -0.062004 & -0.998076 \\ 0.000000 & -0.857345 & -0.514742 \\ 0.000000 & -0.998985 & 0.045050 \\ 0.000000 & -0.886231 & 0.463243 \\ 0.000000 & 0.245072 & 0.969505 \\ 0.000000 & 0.724451 & 0.689327 \\ 0.000000 & 0.973208 & -0.229925 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 B_{Dir_{i,1}} &:= -1 \\
 B_{Dir_{i,2}} &:= M_{i,2} \\
 B_{Dir_{i,3}} &:= M_{i,3}
 \end{aligned}
 \Rightarrow B_{Dir} = \begin{pmatrix} -1.000000 & -0.178866 & -0.428508 \\ -1.000000 & -0.636266 & 0.039527 \\ -1.000000 & -0.694750 & 1.157164 \\ -1.000000 & 0.054466 & 1.207794 \\ -1.000000 & 0.366684 & 0.701503 \\ -1.000000 & 0.526099 & -0.132988 \\ -1.000000 & 0.583371 & -0.613096 \\ -1.000000 & -0.091958 & -0.389230 \end{pmatrix}$$

$$B := stack(B_S, B_{Dir}) \Rightarrow B = \begin{pmatrix} 0.000000 & 0.922831 & -0.385205 \\ 0.000000 & -0.062004 & -0.998076 \\ 0.000000 & -0.857345 & -0.514742 \\ 0.000000 & -0.998985 & 0.045050 \\ 0.000000 & -0.886231 & 0.463243 \\ 0.000000 & 0.245072 & 0.969505 \\ 0.000000 & 0.724451 & 0.689327 \\ 0.000000 & 0.973208 & -0.229925 \\ -1.000000 & -0.178866 & -0.428508 \\ -1.000000 & -0.636266 & 0.039527 \\ -1.000000 & -0.694750 & 1.157164 \\ -1.000000 & 0.054466 & 1.207794 \\ -1.000000 & 0.366684 & 0.701503 \\ -1.000000 & 0.526099 & -0.132988 \\ -1.000000 & 0.583371 & -0.613096 \\ -1.000000 & -0.091958 & -0.389230 \end{pmatrix}$$

Вектор W (матрица-столбцом) разности измеренных и расчетных величин будет следующим:

$$W_{S_i} := Raw_{i,2} - S_{i,1}$$

$$W_{Dir_i} := Raw_{i,1} - M_{i,1}$$

$$W_s = \begin{pmatrix} -0.000419 \\ -0.000706 \\ -0.000361 \\ -0.001301 \\ -0.000392 \\ -0.000777 \\ -0.000101 \\ 0.000030 \end{pmatrix}$$

$$W_{Dir} = \begin{pmatrix} 0.000093 \\ -0.000059 \\ 0.000020 \\ 0.000102 \\ -0.000158 \\ 0.000001 \\ -0.000033 \\ 0.000034 \end{pmatrix}$$

$$W := stack(W_s, W_{Dir}) \Rightarrow W = \begin{pmatrix} -0.000419 \\ -0.000706 \\ -0.000361 \\ -0.001301 \\ -0.000392 \\ -0.000777 \\ -0.000101 \\ 0.000030 \\ 0.000093 \\ -0.000059 \\ 0.000020 \\ 0.000102 \\ -0.000158 \\ 0.000001 \\ -0.000033 \\ 0.000034 \end{pmatrix}$$

Весовая матрица (P) будет иметь вид:

$$j := (\Pi + 1)..(2\Pi)$$

$$weight_i := \frac{\mu_0^2}{\left[\sigma_s + \left(ppm \cdot \frac{Raw_{i,2}}{10^6} \right) \right]^2}$$

$$weight_j := \frac{\mu_0^2}{\left(\frac{\sigma_\alpha}{3600} \right)^2}$$

$$P := diag(weight)$$

1910968.628083	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	2101153.596280	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	2422819.512738	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	2385994.852469	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	2211904.094438	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	2008636.934499	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	2243027.074201	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1810171.181813	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	51840000.000000

Матрица нормированных коэффициентов параметрических уравнений: $U := B^T . P W$

Обратная матрица: $Q := (B^T . P . B)^{-1} \Rightarrow Q = \begin{pmatrix} 2.608171 \times 10^{-9} & 3.458761 \times 10^{-10} & 1.037424 \times 10^{-9} \\ 3.458761 \times 10^{-10} & 1.120552 \times 10^{-8} & 2.311725 \times 10^{-9} \\ 1.037424 \times 10^{-9} & 2.311725 \times 10^{-9} & 5.488408 \times 10^{-9} \end{pmatrix}$

Матрица коррекции для приближенных координат: $\beta := Q U \Rightarrow \beta = \begin{pmatrix} 0.000000 \\ 0.000000 \\ 0.000000 \end{pmatrix}$

Расчетные и подтвержденные координаты:

$Or := Or_0 + \beta_{1,1} \Rightarrow Or = 292.656564105742$

$X_{P_0} := X_P + \beta_{2,1} \Rightarrow X_{P_0} = 167918.929812$

$Y_{P_0} := Y_P + \beta_{3,1} \Rightarrow Y_{P_0} = 2437627.488024$

Остаточная матрица: $V := B . \beta - W$

Априорные СКП:

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mu_0^2 = 1 \\ m_x = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0.0001059\mathbf{M} \\ m_y = 0.0000741\mathbf{M} \\ m_{xy} = 0.0001292\mathbf{M} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0.11\mathbf{MM} \\ m_y = 0.07\mathbf{MM} \\ m_{xy} = 0.13\mathbf{MM} \end{array} \right\}$$

Апостериорные СКП:

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T \cdot P \cdot V}{n - t}}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mu = 0,873 \\ m_x = \mu \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0.000092\mathbf{M} \\ m_y = 0.000065\mathbf{M} \\ m_{xy} = 0.000113\mathbf{M} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0.09\mathbf{MM} \\ m_y = 0.06\mathbf{MM} \\ m_{xy} = 0.11\mathbf{MM} \end{array} \right\}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

**Результаты расчета координат «АТС 2» и оценки точности его положения
путем разработанного метода и алгоритма с использованием Метода
Наименьших Квадратов (МНК)**

ORIGIN := 1 П := 6 № Исходных точек

$$Raw = \begin{pmatrix} \langle Dir1 \rangle & \langle GP1 \rangle \\ \langle Dir2 \rangle & \langle GP2 \rangle \\ \langle Dir3 \rangle & \langle GP3 \rangle \\ \langle Dir4 \rangle & \langle GP4 \rangle \\ \langle Dir5 \rangle & \langle GP5 \rangle \\ \langle Dir6 \rangle & \langle GP6 \rangle \end{pmatrix} \quad Coord = \begin{pmatrix} \langle X_{Ref4} \rangle & \langle Y_{Ref4} \rangle \\ \langle X_{Ref19} \rangle & \langle Y_{Ref19} \rangle \\ \langle X_{Ref20} \rangle & \langle Y_{Ref20} \rangle \\ \langle X_{Ref1} \rangle & \langle Y_{Ref1} \rangle \\ \langle X_{Ref2} \rangle & \langle Y_{Ref2} \rangle \\ \langle X_{Ref3} \rangle & \langle Y_{Ref3} \rangle \end{pmatrix}$$

Исходные данные

$$\rho := 206265$$

$$\zeta := \frac{180}{\pi} = 57.295780$$

$$\mu_0 := 1$$

$$\sigma_s := 0.0006 \quad ppm := 1$$

$$\sigma_\alpha := 0.5$$

$$n := 2 \cdot \Pi \quad t := 3 \quad r := n - t$$

$$Raw := \begin{pmatrix} 0.000000 & 96.1668 \\ 85.518158 & 89.5217 \\ 123.350150 & 91.0678 \\ 186.819302 & 165.8451 \\ 231.101870 & 129.5641 \\ 323.811059 & 60.6909 \end{pmatrix} \quad Coord := \begin{pmatrix} 167921.3426 & 2437720.3600 \\ 167800.1112 & 2437685.4362 \\ 167756.5614 & 2437724.5892 \\ 167702.6400 & 2437863.8658 \\ 167814.8224 & 2437894.5332 \\ 167897.4033 & 2437774.5584 \end{pmatrix}$$

Начальная ориентация (Initial Orientation) $Or_0 := 118.954155031638$

Расстояние между первыми двумя исходными точками:

$$L_{1,2} := \sqrt{(Coord_{2,1} - Coord_{1,1})^2 + (Coord_{2,2} - Coord_{1,2})^2}$$

Азимут первой линии визирования (I-P)

$$\alpha := \text{asin} \left[Raw_{2,2} \cdot \frac{\sin \left[\left(\frac{\pi}{180} Raw \right)_{2,1} \right]}{L_{1,2}} \right] = 0.785828$$

$$Az_{1,2} := \text{angle}(\text{Coord}_{2,2} - \text{Coord}_{1,2}, \text{Coord}_{2,1} - \text{Coord}_{1,1}) \quad Az_{1,2} \cdot \zeta = 253.929603$$

$$Az_{1,P} := Az_{1,2} + \alpha = 5.217735 \quad Az_{1,P} \cdot \zeta = 298.954210$$

Приближенные координаты точки P:

$$X_P := \text{Coord}_{1,1} + (\text{Raw}_{1,2} \cdot \sin(Az_{1,P})) = 167837.196$$

$$Y_P := \text{Coord}_{1,2} + (\text{Raw}_{1,2} \cdot \cos(Az_{1,P})) = 24377766.9154$$

Расчетные расстояния (S) и азимуты (G) на основе первоначально рассчитанных координат (приближенные координаты точки P):

$i := 1..n$

$$S_i := \sqrt{(X_P - \text{Coord}_{i,1})^2 + (Y_P - \text{Coord}_{i,2})^2}$$

$$S = \begin{pmatrix} 96.166800 \\ 89.521697 \\ 91.068327 \\ 165.845418 \\ 129.564238 \\ 60.690498 \end{pmatrix}$$

$$G_i := \text{angle}(\text{Coord}_{i,2} - Y_P, \text{Coord}_{i,1} - X_P) \cdot \zeta$$

$$G = \begin{pmatrix} 118.95421 \\ 204.47239 \\ 242.30443 \\ 305.77355 \\ 350.05613 \\ 82.76526 \end{pmatrix}$$

Матрица B строится следующим образом:

$$M_{i,1} := \text{if}(G_{i,1} - Or_0 > -0.0005, G_{i,1} - Or_0, G_{i,1} - Or_0 + 360)$$

$$M_{i,2} := \frac{-(\text{Coord}_{i,2} - Y_P) \cdot \zeta}{(S_{i,1})^2}$$

$$M_{i,3} := \frac{(\text{Coord}_{i,1} - X_P) \cdot \zeta}{(S_{i,1})^2}$$

$$M_{i,4} := \frac{-(\text{Coord}_{i,1} - X_P)}{(S_{i,1})}$$

$$M_{i,5} := \frac{-(\text{Coord}_{i,2} - Y_P)}{(S_{i,1})}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0.000054 & 0.288431 & 0.521325 & -0.875007 & 0.484110 \\ 85.518238 & 0.582522 & -0.265132 & 0.414255 & 0.910161 \\ 123.350273 & 0.292413 & -0.557069 & 0.885430 & 0.464774 \\ 186.819395 & -0.201960 & -0.280297 & 0.811334 & -0.584583 \\ 231.101973 & -0.435576 & -0.076364 & 0.172683 & -0.984977 \\ 323.811103 & -0.118891 & 0.936549 & -0.992039 & -0.125935 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} B_{S_{i,1}} &:= 0 \\ B_{S_{i,2}} &:= M_{i,4} \\ B_{S_{i,3}} &:= M_{i,5} \end{aligned} \Rightarrow B_S = \begin{pmatrix} 0.000000 & -0.875007 & 0.484110 \\ 0.000000 & 0.414255 & 0.910161 \\ 0.000000 & 0.885430 & 0.464774 \\ 0.000000 & 0.811334 & -0.584583 \\ 0.000000 & 0.172683 & -0.984977 \\ 0.000000 & -0.992039 & -0.125935 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} B_{Dir_{i,1}} &:= -1 \\ B_{Dir_{i,2}} &:= M_{i,2} \\ B_{Dir_{i,3}} &:= M_{i,3} \end{aligned} \Rightarrow B_{Dir} = \begin{pmatrix} -1.000000 & 0.288431 & 0.521325 \\ -1.000000 & 0.582522 & -0.265132 \\ -1.000000 & 0.292413 & -0.557069 \\ -1.000000 & -0.201960 & -0.280297 \\ -1.000000 & -0.435576 & -0.076364 \\ -1.000000 & -0.118891 & 0.936549 \end{pmatrix}$$

$$B := \text{stack}(B_S, B_{Dir}) \Rightarrow B = \begin{pmatrix} 0.000000 & -0.875007 & 0.484110 \\ 0.000000 & 0.414255 & 0.910161 \\ 0.000000 & 0.885430 & 0.464774 \\ 0.000000 & 0.811334 & -0.584583 \\ 0.000000 & 0.172683 & -0.984977 \\ 0.000000 & -0.992039 & -0.125935 \\ -1.000000 & 0.288431 & 0.521325 \\ -1.000000 & 0.582522 & -0.265132 \\ -1.000000 & 0.292413 & -0.557069 \\ -1.000000 & -0.201960 & -0.280297 \\ -1.000000 & -0.435576 & -0.076364 \\ -1.000000 & -0.118891 & 0.936549 \end{pmatrix}$$

Вектор W (матрица-столбцом) разности измеренных и расчетных величин будет следующим:

$$W_{S_i} := Raw_{i,2} - S_{i,1}$$

$$W_S = \begin{pmatrix} -0.000000 \\ 0.000003 \\ -0.000527 \\ -0.000318 \\ -0.000138 \\ 0.000402 \end{pmatrix}$$

$$W_{Dir_i} := Raw_{i,1} - M_{i,1}$$

$$W_{Dir} = \begin{pmatrix} -0.000054 \\ -0.000080 \\ -0.000123 \\ -0.000093 \\ -0.000103 \\ -0.000044 \end{pmatrix}$$

$$W := stack(W_S, W_{Dir}) \Rightarrow W = \begin{pmatrix} -0.000000 \\ 0.000003 \\ -0.000527 \\ -0.000318 \\ -0.000138 \\ 0.000402 \\ -0.000054 \\ -0.000080 \\ -0.000123 \\ -0.000093 \\ -0.000103 \\ -0.000044 \end{pmatrix}$$

Весовая матрица (P) будет иметь вид:

$$j := (\Pi + 1)..(2 \cdot \Pi)$$

$$weight_i := \frac{\mu_0^2}{\left[\sigma_s + \left(ppm \cdot \frac{Raw_{i,2}}{10^6} \right) \right]^2}$$

$$weight_j := \frac{\mu_0^2}{\left(\frac{\sigma_a}{3600} \right)^2}$$

$$P := diag(weight)$$

$$P = \begin{pmatrix} 2063352.287918 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 2103314.050988 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 2093913.247943 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1704975.426503 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1878767.718327 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 2290885.322633 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 5184000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 5184000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 5184000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 5184000.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 5184000.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 5184000.000000 \end{pmatrix}$$

Матрица нормированных коэффициентов параметрических уравнений: $U := B^T . P W$

Обратная матрица: $Q := (B^T . P . B)^{-1} \Rightarrow Q = \begin{pmatrix} 3.364491 \times 10^{-9} & 1.699044 \times 10^{-9} & 7.362266 \times 10^{-10} \\ 1.699044 \times 10^{-9} & 2.310710 \times 10^{-8} & 2.835246 \times 10^{-9} \\ 7.362266 \times 10^{-10} & 2.835246 \times 10^{-9} & 1.169693 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$

Матрица коррекции для приближенных координат: $\beta := Q U \Rightarrow \beta = \begin{pmatrix} 0.000082 \\ -0.000038 \\ 0.000040 \end{pmatrix}$

Расчетные координаты, которые будут использоваться в следующей итерации:

$$Or := Or_0 + \beta_{1,1} \Rightarrow Or = 118.954237391014$$

$$X_{P_0} := X_P + \beta_{2,1} \Rightarrow X_{P_0} = 167837.195949$$

$$Y_{P_0} := Y_P + \beta_{3,1} \Rightarrow Y_{P_0} = 2437766.915395$$

Надо повторить процесс, чтобы β стала минимальной.

Приближенные координаты точки P (Итерация №1):

$$Or := Or_0 + \beta_{1,1} \Rightarrow Or = 118.954237391014$$

$$X_{P_0} := X_P + \beta_{2,1} \Rightarrow X_{P_0} = 167837.195949$$

$$Y_{P_0} := Y_P + \beta_{3,1} \Rightarrow Y_{P_0} = 2437766.915395$$

Расчетные расстояния (S) и азимуты (G) на основе первоначально рассчитанных координат (приближенные координаты точки P):

$i := 1..П$

$$S_i := \sqrt{(X_P - Coord_{i,1})^2 + (Y_P - Coord_{i,2})^2} \quad S = \begin{pmatrix} 96.166853 \\ 89.521717 \\ 91.068311 \\ 165.845363 \\ 129.564192 \\ 60.690532 \end{pmatrix}$$

$$G_i := \text{angle}(Coord_{i,2} - Y_P, Coord_{i,1} - X_P). \zeta \quad G = \begin{pmatrix} 118.95422 \\ 204.47236 \\ 242.30439 \\ 305.77355 \\ 350.05614 \\ 82.7653 \end{pmatrix}$$

Матрица B строится следующим образом:

$$M_{i,1} := \text{if}(G_{i,1} - Or_0 > -0.0005, G_{i,1} - Or_0, G_{i,1} - Or_0 + 360)$$

$$M_{i,2} := \frac{-(Coord_{i,2} - Y_P). \zeta}{(S_{i,1})^2}$$

$$M_{i,3} := \frac{(Coord_{i,1} - X_P). \zeta}{(S_{i,1})^2}$$

$$M_{i,4} := \frac{-(Coord_{i,1} - X_P)}{(S_{i,1})}$$

$$M_{i,5} := \frac{-(Coord_{i,2} - Y_P)}{(S_{i,1})}$$

$$M = \begin{pmatrix} -0.000018 & 0.288431 & 0.521325 & -0.875007 & 0.484111 \\ 85.518122 & 0.582522 & -0.265131 & 0.414254 & 0.910161 \\ 123.350158 & 0.292413 & -0.557069 & 0.885429 & 0.464774 \\ 186.819310 & -0.201960 & -0.280297 & 0.811334 & -0.584583 \\ 231.101904 & -0.435576 & -0.076364 & 0.172683 & -0.984977 \\ 323.811063 & -0.118890 & 0.936548 & -0.992039 & -0.125934 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} B_{S_{i,1}} &:= 0 \\ B_{S_{i,2}} &:= M_{i,4} \\ B_{S_{i,3}} &:= M_{i,5} \end{aligned} \Rightarrow B_S = \begin{pmatrix} 0.000000 & -0.875007 & 0.484111 \\ 0.000000 & 0.414254 & 0.910161 \\ 0.000000 & 0.885429 & 0.464774 \\ 0.000000 & 0.811334 & -0.584583 \\ 0.000000 & 0.172683 & -0.984977 \\ 0.000000 & -0.992039 & -0.125934 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} B_{Dir_{i,1}} &:= -1 \\ B_{Dir_{i,2}} &:= M_{i,2} \\ B_{Dir_{i,3}} &:= M_{i,3} \end{aligned} \Rightarrow B_{Dir} = \begin{pmatrix} -1.000000 & 0.288431 & 0.521325 \\ -1.000000 & 0.582522 & -0.265131 \\ -1.000000 & 0.292413 & -0.557069 \\ -1.000000 & -0.201960 & -0.280297 \\ -1.000000 & -0.435576 & -0.076364 \\ -1.000000 & -0.118890 & 0.936548 \end{pmatrix}$$

$$B := \text{stack}(B_S, B_{Dir}) \Rightarrow B = \begin{pmatrix} 0.000000 & -0.875007 & 0.484111 \\ 0.000000 & 0.414254 & 0.910161 \\ 0.000000 & 0.885429 & 0.464774 \\ 0.000000 & 0.811334 & -0.584583 \\ 0.000000 & 0.172683 & -0.984977 \\ 0.000000 & -0.992039 & -0.125934 \\ -1.000000 & 0.288431 & 0.521325 \\ -1.000000 & 0.582522 & -0.265131 \\ -1.000000 & 0.292413 & -0.557069 \\ -1.000000 & -0.201960 & -0.280297 \\ -1.000000 & -0.435576 & -0.076364 \\ -1.000000 & -0.118890 & 0.936548 \end{pmatrix}$$

Вектор W (матрица-столбцом) разности измеренных и расчетных величин будет следующим:

$$W_{S_i} := Raw_{i,2} - S_{i,1}$$

$$W_S = \begin{pmatrix} -0.000053 \\ -0.000017 \\ -0.000511 \\ -0.000263 \\ -0.000092 \\ 0.000368 \end{pmatrix}$$

$$W_{Dir_i} := Raw_{i,1} - M_{i,1}$$

$$W_{Dir} = \begin{pmatrix} 0.000018 \\ 0.000036 \\ -0.000008 \\ -0.000008 \\ -0.000034 \\ -0.000004 \end{pmatrix}$$

$$W := stack(W_S, W_{Dir}) \Rightarrow W = \begin{pmatrix} -0.000053 \\ -0.000017 \\ -0.000511 \\ -0.000263 \\ -0.000092 \\ 0.000368 \\ 0.000018 \\ 0.000036 \\ -0.000008 \\ -0.000008 \\ -0.000034 \\ -0.000004 \end{pmatrix}$$

Весовая матрица (P) будет иметь вид:

$$j := (\Pi + 1)..(2 \cdot \Pi)$$

$$weight_i := \frac{\mu_0^2}{\left[\sigma_s + \left(ppm \cdot \frac{Raw_{i,2}}{10^6} \right) \right]^2}$$

$$weight_j := \frac{\mu_0^2}{\left(\frac{\sigma_a}{3600} \right)^2}$$

$$P := diag(weight)$$

$$P = \begin{pmatrix} 2063352.287918 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 2103314.050988 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 2093913.247943 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1704975.426503 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 1878767.718327 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 2290885.322633 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 51840000.000000 \end{pmatrix}$$

Матрица нормированных коэффициентов параметрических уравнений: $U := B^T . P W$

Обратная матрица: $Q := (B^T . P . B)^{-1} \Rightarrow Q = \begin{pmatrix} 3.364492 \times 10^{-9} & 1.699047 \times 10^{-9} & 7.362262 \times 10^{-10} \\ 1.699047 \times 10^{-9} & 2.310709 \times 10^{-8} & 2.835239 \times 10^{-9} \\ 7.362262 \times 10^{-10} & 2.835239 \times 10^{-9} & 1.169693 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$

Матрица коррекции для приближенных координат: $\beta := Q U \Rightarrow \beta = \begin{pmatrix} -0.000000 \\ 0.000000 \\ 0.000000 \end{pmatrix}$

Расчетные и подтвержденные координаты:

$$Or := Or_0 + \beta_{1,1} \Rightarrow Or = 118.954237391012$$

$$X_{P_0} := X_P + \beta_{2,1} \Rightarrow X_{P_0} = 167837.195949$$

$$Y_{P_0} := Y_P + \beta_{3,1} \Rightarrow Y_{P_0} = 2437766.915395$$

Остаточная матрица: $V := B . \beta - W$

Априорные СКП:

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mu_0^2 = 1 \\ m_x = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0.000152\mathbf{M} \\ m_y = 0.000108\mathbf{M} \\ m_{xy} = 0.000187\mathbf{M} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0.15\mathbf{MM} \\ m_y = 0.11\mathbf{MM} \\ m_{xy} = 0.19\mathbf{MM} \end{array} \right\}$$

Апостериорные СКП:

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T \cdot P \cdot V}{n - t}}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mu = 0,357 \\ m_x = \mu \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_y = \mu \cdot \sqrt{Q_{3,3}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0.000054\mathbf{M} \\ m_y = 0.000039\mathbf{M} \\ m_{xy} = 0.000067\mathbf{M} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} m_x = 0.05\mathbf{MM} \\ m_y = 0.04\mathbf{MM} \\ m_{xy} = 0.07\mathbf{MM} \end{array} \right\}$$

209					
210			a priori	<i>a priori</i>	
211	A	m_x	0.00022		
212		m_y	0.00039	$m_{xy(m)}$	0.00045 2D
213	B	m_x	0.00025		
214		m_y	0.00037	$m_{xy(m)}$	0.00044 2D
215	C	m_x	0.00027		
216		m_y	0.00034	$m_{xy(m)}$	0.00043 2D
217	D	m_x	0.00023		
218		m_y	0.00041	$m_{xy(m)}$	0.00047 2D
219	E	m_x	0.00025		
220		m_y	0.00039	$m_{xy(m)}$	0.00046 2D
221	F	m_x	0.00027		
222		m_y	0.00037	$m_{xy(m)}$	0.00046 2D

224			a postriori	<i>a postriori</i>	
225	A	m_x	0.00009		
226		m_y	0.00016	$m_{xy(m)}$	0.00018 2D
227	B	m_x	0.00010		
228		m_y	0.00015	$m_{xy(m)}$	0.00018 2D
229	C	m_x	0.00011		
230		m_y	0.00014	$m_{xy(m)}$	0.00017 2D
231	D	m_x	0.00009		
232		m_y	0.00016	$m_{xy(m)}$	0.00019 2D
233	E	m_x	0.00010		
234		m_y	0.00016	$m_{xy(m)}$	0.00019 2D
235	F	m_x	0.00011		
236		m_y	0.00015	$m_{xy(m)}$	0.00018 2D