

**ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ**



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**УТВЕРЖДАЮ**

  
\_\_\_\_\_  
**Руководитель ОПОП ВО  
Профессор М.Г. Мустафин**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО  
ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ  
МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ИНЖЕНЕРНЫХ И ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

<b>Уровень высшего образования:</b>	Подготовка кадров высшей квалификации
<b>Направление подготовки:</b>	21.06.02 Геодезия
<b>Направленность (профиль):</b>	Геодезия
<b>Форма обучения:</b>	очная
<b>Нормативный срок обучения:</b>	3 года
<b>Составитель:</b>	д.т.н. проф. М.Г. Мустафин

Санкт-Петербург

## МОНИТОРИНГ 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

16 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 подрботки 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).

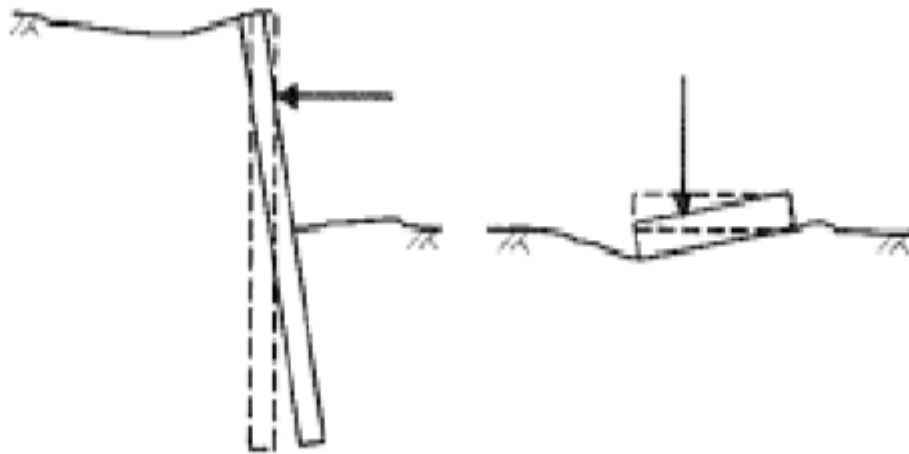


Рисунок 1.5 – Схема к обеспечению стабильности исходного пункта [161]

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. (а) (б)

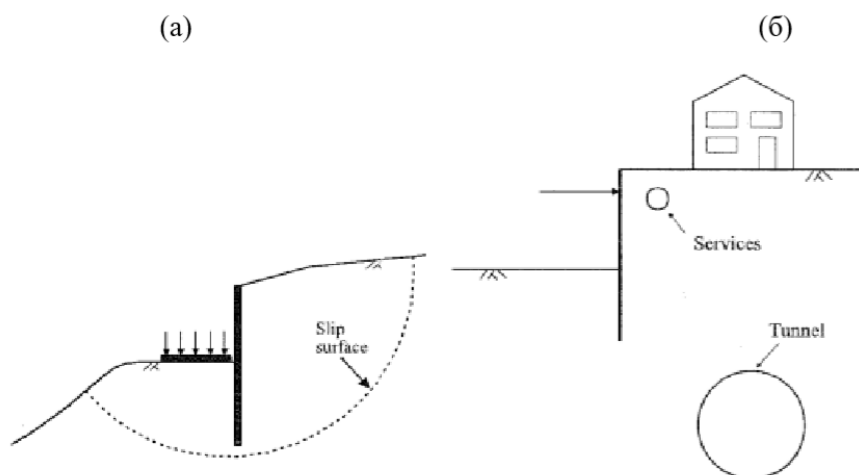


Рисунок 1.6 – Схема к оценке деформаций подпорной стены (а) и здания у откоса (б) [148]

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 хищусен конструкциях зданий и сооружений, таких как фундаменты конструкций, которые обычно считаются

20 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,

21 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 07166-97 «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 большему 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  $= 4 \cdot 10^{-3}$  и растяжению  $= 2 \cdot 10^{-3}$ . Многие факторы влияют на определение размера этой зоны (мула сдвижения). 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 содержат 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.  $\leq 1$  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 линейноугловых 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 устойчивое (стабильное) 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.  $v = h_j - h_l$  (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].

28 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 ( $\pm 2$  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 ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$ ), 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  $\Delta h$ ) 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 – отчеты 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 ( $\alpha$ ) 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.

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

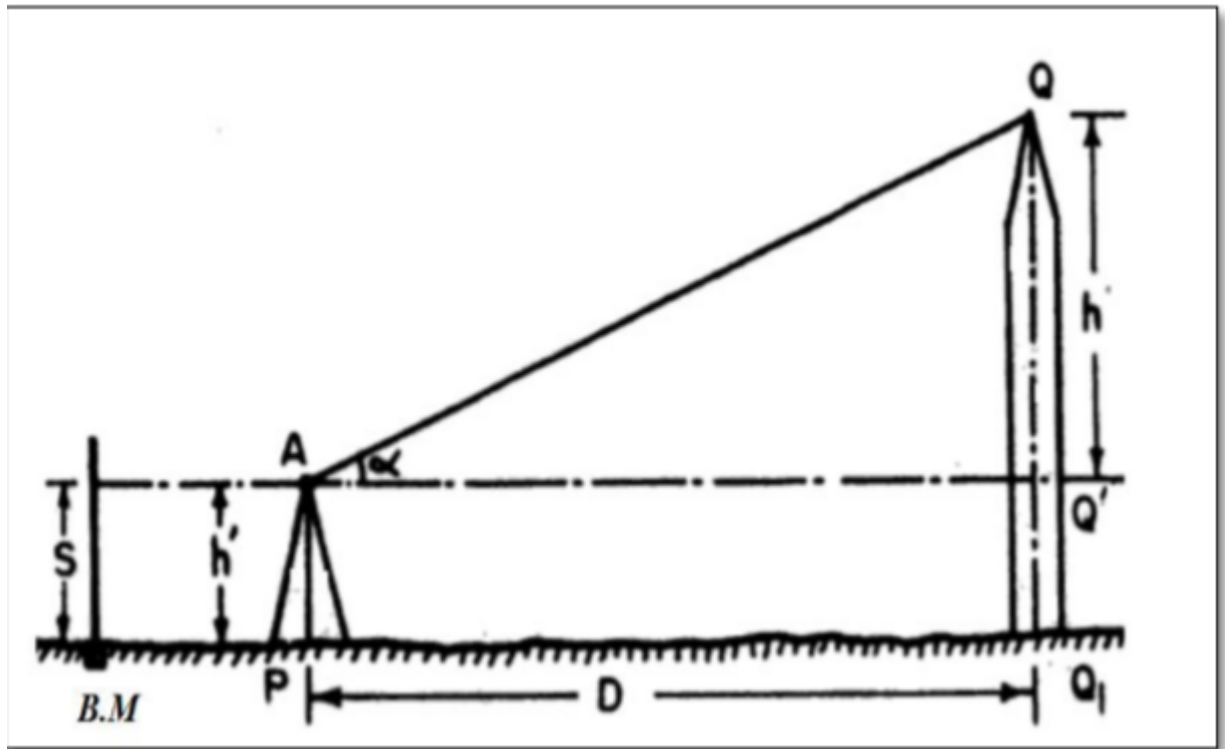


Рисунок 1.9 – Схема тригонометрического нивелирования

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 изменения поверхности радиотелескопа Хобарта по причине изменения угла антенны. Внедряя концепцию гиперрезервации, им удалось достичь достаточную точность в своих измерениях [112]. Позже в 2014 году Serminaro 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]. Эрл 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 оборудования 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].

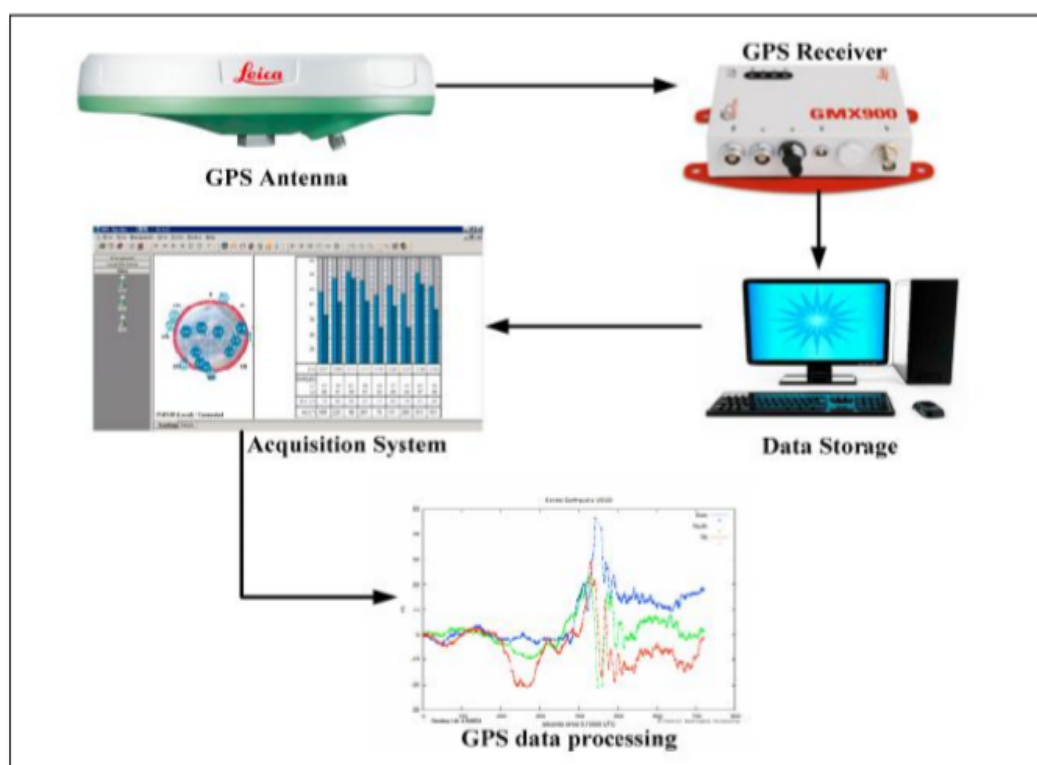


Рисунок 1.13 – Принципиальная схема системы мониторинга с использованием ГНСС-технологии [97]

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, V. 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 вероятно 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 конечноэлементного 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.

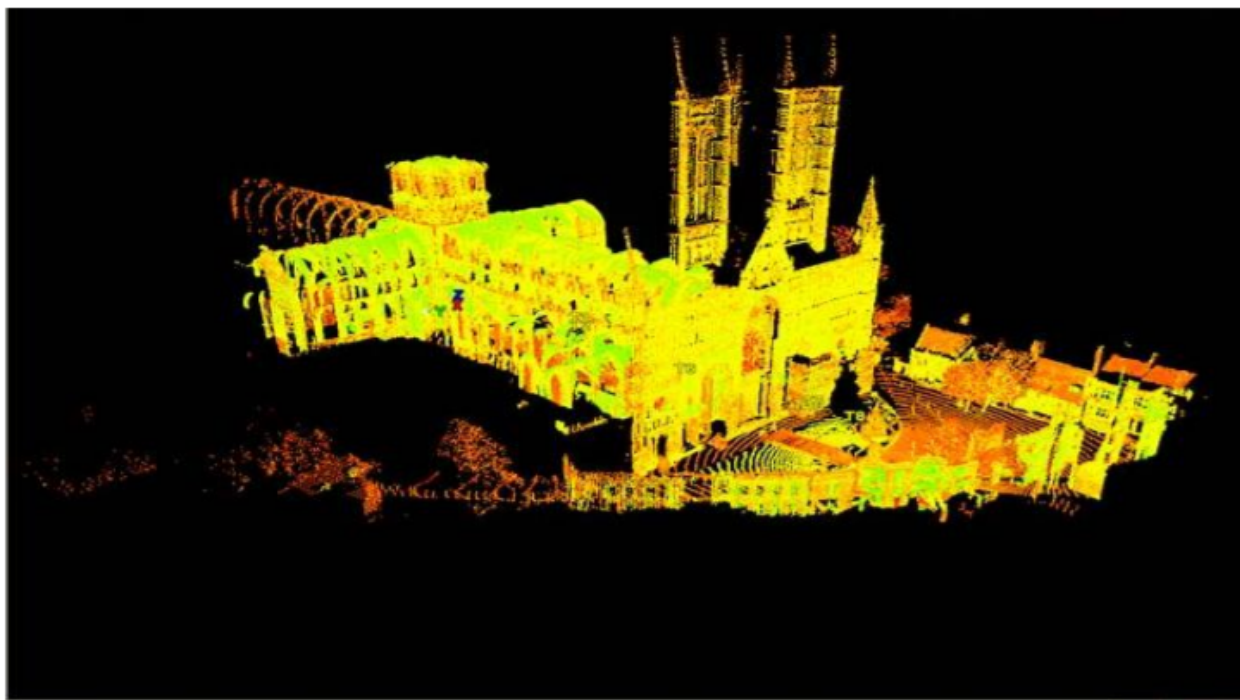


Рисунок 1.14 – 3D-модель, созданная из миллионов облаков точек для архивации и мониторинга деформации замка [119]

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 24часовой 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).

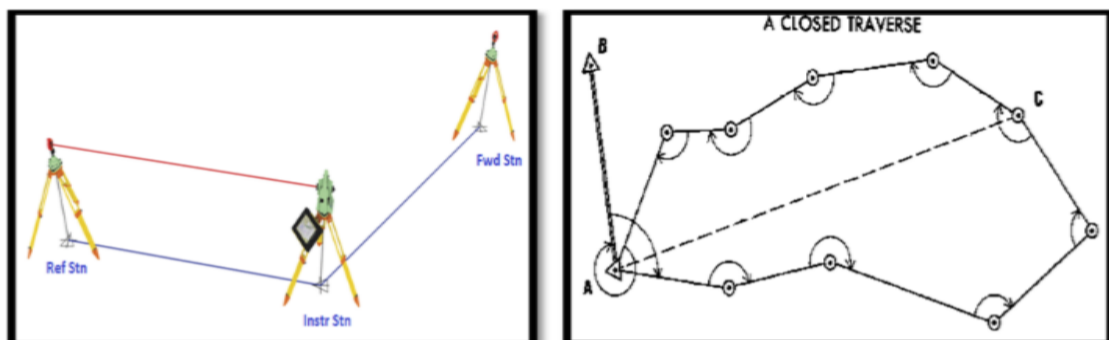


Рисунок 1.15 – Схематизация методики измерений при мониторинге деформаций с использованием электронного тахеометра Недостатки: а. Много установок и измерений с разных точек означает больше ошибок. б. Деформационные марки постоянно измеряются под разными углами и расстояниями, что также приводит к дополнительным 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 проведения дополнительных исследований.

## 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. Брынь, 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 аэрофотосъемка. – 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.: Стандартиформ. – 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: Стандартиформ. – 2014. – 18 с.

21. ГОСТ Р 53778 - 2010 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. - М.: Стандартиформ. – 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.: Стандартиформ. – 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 // СанктПетербургский 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 сдвигами 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)-03010-02. 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-mountwaverley-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. Кожаев, Ж.Т. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии / Ж.Т. Кожаев, 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: 10.22389/0016-7126-2020-9584-9-18

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: 10.22389/0016-7126-2017-9257-23-30.

57. Маркузе, Ю.И. Основы уравнильных 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 уравнильных 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 уравнильных 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 научноинформационного центра «Знание» по материалам II Международной научнопрактической 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](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](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 вышей 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 геологомаркшейдерского 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 AutoCorrelation 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, New York, 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 LongSpan 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. Rüeiger, J. M. Propagation of Electromagnetic Waves Through the Atmosphere. In *Electronic Distance Measurement* // Springer, Berlin, Heidelberg. – 1990. – pp. 48-72.

144. Rüeiger, J.M. EDM monitoring surveys using a local scale parameter model / J.M. Rüeiger, 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. Rieger, J.M. Monitoring of an open cut mine with a surveying robot / J.M. Rieger, G. Alanko and T.J. Snow // Australian Surveyor. –1994. – Vol. 39. – №4. – pp. 252-266.

146. Rieger, 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](http://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](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=2ahUKEwjwuvypx7v0AhUTohoKHa4FBo4Q4lYoAHoECAEQEA&biw=1349&bih=657](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=2ahUKEwjwuvypx7v0AhUTohoKHa4FBo4Q4lYoAHoECAEQEA&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), (CDROM). – 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.