

*На правах рукописи*



**Елифанова Екатерина Александровна**

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ  
СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ  
МЕТОДОВ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И  
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Специальность 25.00.08 -  
Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение*

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

**Томск 2019**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

**Научный руководитель:** **Строкова Людмила Александровна**

доктор геолого-минералогических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Середин Валерий Викторович**

доктор геолого-минералогических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Пермский государственный  
национальный исследовательский университет»  
(г. Пермь)

**Мазаева Оксана Анатольевна**

кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН  
Институт земной коры Сибирского отделения  
Российской академии наук (г. Иркутск)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Томский государственный архитектурно-  
строительный университет» (г. Томск)

Защита состоится «27» июня 2019 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.022.01 при ФГБУН Институте земной коры СО  
РАН, по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИНЦ СО РАН  
по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128 и на сайте:  
<http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull178/1818.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью  
организации, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю совета  
Варваре Викторовне Акуловой, Тел. (3952) 42-61-33, e-mail: [akulova@crust.irk.ru](mailto:akulova@crust.irk.ru)

Автореферат разослан «    » мая 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.г.-м.н.



Акулова В.В.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Определяется практической необходимостью создания обоснованной методики оценки технического состояния несущих конструкций строительных объектов, испытывающих деформационные изменения, которая позволила бы с высокой достоверностью прогнозировать и предупреждать появление и развитие аварийных ситуаций. Наиболее эффективным способом для принятия управляющих решений по устранению дефектов и повреждений инженерных сооружений, предотвращению аварийных ситуаций является мониторинг природно-технических систем (ПТС). При ведении мониторинга за инженерными сооружениями важно рассматривать не только наличие самих деформаций, но также выявлять причину их развития при помощи комплексного подхода, который учитывает и инженерно-геологическое обследование для последующего определения напряженно деформированного состояния (НДС) грунтов, а также современные методы наблюдения за деформациями самого сооружения. Поэтому в процессе наблюдения за деформациями различных инженерных сооружений необходимо изучение причинных закономерностей формирования и пространственной изменчивости всех компонентов инженерно-геологических условий. Только на основе этого можно понять основные причины пространственных изменений инженерных сооружений и в последствии принять правильные управленческие решения по сохранению стабильного состояния объекта.

**Степень разработанности темы.** В последние годы опубликованы работы по оценке деформаций строительных конструкций (Середовича В.А., 2009; Ермакова В.А., 2012; Нестеренко Е.А., 2010; Кочневой А.А., 2016; Полищука А.И., 2015; Мирсаяпов И.Т., 2016; Мальцевым А.В., 2016 и др.) с помощью современных цифровых устройств, и предложениями по актуализации расчетных моделей сооружений, однако эти исследования ещё не носят всесторонний и систематический характер, например, касаются одного компонента ПТС – строительной конструкции или грунтового массива.

**Объектом исследования** являются природно-технические системы, испытывающие недопустимые деформации при эксплуатации объекта, требующие капитального ремонта.

**Предметом исследования** является обоснование оптимального комплекса работ по геотехническому мониторингу природно-технических систем для корректировки проектных решений по объекту.

**Цель работы** – разработка методики мониторинга природно-технических систем при сочетании наземного лазерного сканирования (НЛС) для определения деформаций инженерного сооружения и оценки напряженно-деформированного состояния природно-технических систем для установления причин изменения пространственного положения зданий и сооружений.

### **Основные задачи исследований**

1. Провести анализ современных нормативных требований и методов проведения геотехнического мониторинга природно-технических систем.
2. Изучить инженерно-геологические условия площадок размещения исследуемых объектов, имеющих опасные деформации.

3. Разработать методику мониторинга пространственно-координатного положения конструкций с помощью наземного лазерного сканирования объектов различного назначения.

4. Выявить влияние инженерно-геологических условий на напряженно-деформируемое состояние и устойчивость природно-технической системы «основание сооружение».

5. Разработать рекомендации по применению методов наземного лазерного сканирования и конечных элементов по оценке состояния и обеспечению устойчивости природно-технических систем.

**Научная новизна** определяется следующими основными результатами:

1. Разработаны новые способы мониторинга пространственно-координатного положения конструкций с помощью наземного лазерного сканирования объектов различного назначения.

2. Дано научное обоснование методики влияния инженерно-геологических условий на изменение пространственного положения инженерных сооружений.

3. Обоснован оптимальный комплекс работ по геотехническому мониторингу объектов, включающий наземное лазерное сканирование сооружения и оценку напряженно-деформированного (НДС) состояния грунтового массива, позволяющий получить необходимую информацию для принятия управляющих решений по обеспечению надежности объекта.

**Практическая значимость работы.** Результаты работы по оценке деформаций инженерных сооружений при помощи наземного лазерного сканирования и напряженно деформированного состояния природно-технической системы были использованы при реконструкции железнодорожного моста на участке магистрали Абакан-Тайшет между станциями Джебь и Щетинкино в Восточном Саяне (Курагинский район Красноярского края), при капитальном ремонте исторического здания в г. Томске, при оценке деформаций прожекторных мачт на Ванкорском нефтегазовом месторождении, расположенным в Туруханском районе Красноярского края, на водоразделе р. Большая Хета и р. Лодочная.

**Методы исследования:** теория вероятностей и математическая статистика, математическое моделирование методом конечных элементов (МКЭ). При обработке, анализе и интерпретации данных наблюдений использовались программы «MS Excel», «AutoCAD», «CREDO», «Cyclone», «Solid Works», «Plaxis», «OriginPro» и другие.

Исследования проводились на разных сооружениях в разных природно-климатических зонах. В основу данной работы положены результаты многолетних исследований автора, а также фондовые и литературные материалы. Исследования основаны на фактических материалах геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических исследований; данных лабораторных исследований грунтов, данных мониторинга за деформациями конструкций.

**Личный вклад автора.** По материалам наземного лазерного сканирования были созданы цифровые трехмерные модели инженерных сооружений, разработаны и апробированы алгоритмы для учета их деформационных процессов. Разработан технологический регламент для наблюдения за объектами

имеющие опасные деформации, основанный на комплексном подходе, сочетающий в себе наземное лазерное сканирование и метод конечных элементов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2017); X Международная научно-практическая конференция студентов аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2017); Вторая научно-практическая конференция «Пути обеспечения совместной работоспособности инженерного сооружения и специфических грунтов» (Москва, 2017); «Проблемы геологии и освоения недр» XXII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 155-летию со дня рождения академика В.А. Обручева (Томск, 2018); XI Международная научно-практическая конференция студентов аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2018).

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и идея работы, определены основные задачи исследований, описаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** проведен анализ существующей нормативной документации, технической литературы в области геотехнического мониторинга состояния инженерных сооружений. Дано определение понятия природно-технической системы «сооружение – грунтовый массив» и показана важность определений деформаций в рамках этой системы.

**Во второй главе** описаны методы и средства проведения геотехнического мониторинга, определение деформаций и наблюдение за оседанием поверхности при помощи наземного лазерного сканирования, а также метод конечных элементов для оценки напряженно-деформированного состояния природно-технической системы.

**В третьей главе** изучены инженерно-геологические условия исследуемых объектов и оценен их вклад в деформации инженерных сооружений

**В четвертой главе** на основе обобщения опыта производства НЛС различных объектов, результатов исследования разработана и наглядно представлена последовательность выполнения геодезических наблюдений за процессом деформирования инженерных сооружений.

**В пятой главе** представлены результаты проведенных исследований, направленные на оценку напряженно-деформированного состояния грунтового массива.

**В шестой главе** Выполненная апробация цикла геотехнического мониторинга в натуральных условиях на примере исторического здания, железнодорожного моста и прожекторной мачты направлена на проверку

основных технологических процессов разрабатываемой методики, приведены основные результаты и выводы, полученные при исследованиях.

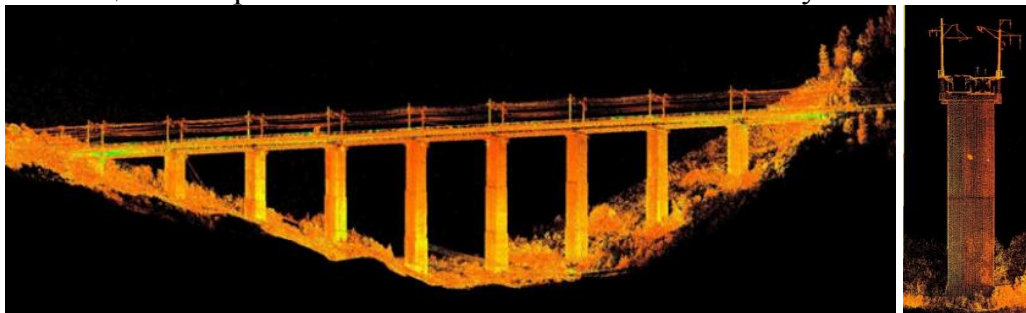
**Благодарности.** Автор выражает огромную благодарность научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук, профессору ОГ ИШПР ТПУ Строковой Людмиле Александровне за научное сопровождение, всестороннюю поддержку, понимание, мотивацию и помощь на всех этапах реализации работы. Особую благодарность автор выражает доктору геолого-минералогических наук, профессору ТГАСУ Ольховатенко Валентину Егоровичу за ценные советы, рекомендации и всестороннюю помощь.

Основные результаты диссертационных исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

**ПЕРВОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ.** Наземное лазерное сканирование (НЛС) фиксирует перемещения инженерных сооружений в 3Д пространстве, что недоступно для традиционных методов наблюдения. Совместный анализ пространственного изменения конструкций и инженерно-геологических условий позволяет обосновать причины возникающих деформаций.

На примере различных инженерных сооружений в настоящем диссертационном исследовании были разработаны и опробованы методики обработки данных наземного лазерного сканирования для выявления достоверного определения деформаций.

**Первый объект.** В рамках государственной программы модернизации железнодорожной инфраструктуры с 2011 г. начались работы по реконструкции виадука на участке магистрали Абакан-Тайшет между станциями Джебь и Щетинкино в Восточном Саяне. Козинский виадук (длиной 355 метров, пролетные строения опираются на бетонные опоры, высота которых достигает 65 метров) был проведен комплекс работ по съемке моста в 2012 г. при непосредственном участии автора. Целью работы являлось получение массива данных, создание комплекса обмерочных чертежей, фиксация крупных дефектов (трещин, смещений, разрушений, повреждений) несущих и ограждающих конструкций, разработка твердотельной трехмерной модели виадука. Наземное лазерное сканирование объекта проводилось Leica Scanstation C10 в светлое время суток и заняло 2 рабочих дня. Съемка проводилась методом тахеометрического хода в два этапа: под мостом по несколько станций на каждый пролет и по мосту. Всего было создано 33 точки установки сканера. На каждой станции измерения выполнялись в течение 5–7 минут.



*Рис. 1. Исходные данные в виде облака точек*

Результатом наземного лазерного сканирования является массив точек (рис. 1), где каждая точка имеет координаты положения в пространстве и интенсивность. Камеральная обработка результатов сканирования заняла 1 неделю и состояла из следующих этапов:

1. Уравнивание в системе координат, определение оценки точности измерений и сшивка в единое облако точек данных, полученных в результате сканирования с каждой станции. Обработка массива точек от «шумов» и элементов, не содержащих в себе сведений об объекте, в программном комплексе Leica Cyclone 8.0. Среднеквадратическая погрешность «сшивки» всех полученных «облаков точек» в единую систему координат составила 4 мм.

2. Детальное трехмерное моделирование объекта в программном комплексе SolidWorks, формирование информационной базы элементов объекта. Каждый элемент: колонны, опоры, пролеты, ограждение и т.д. строились методом точного встраивания в облако точек, благодаря чему были получены точные твердотельные копии реальных объектов. Построенные элементы собирались в общую сборку с жесткой привязкой элементов друг к другу в соответствии с реальным их положением друг относительно друга. В результате получена трехмерная твердотельная модель, которая является точной копией сооружения.

На основе трехмерной модели в автоматическом режиме построены обмерочные чертежи моста с нанесением размеров и дефектов конструкций. Значительные отклонения от проектного положения наблюдались у одной опоры сооружения, для которой нами выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов в декабре 2016 г.

.Совместное рассмотрение пространственного изменения конструкций и инженерно-геологических условий позволило обосновать причины возникающих деформаций, а именно, что они могут быть связаны с ухудшением физико-механических свойств грунтового массива. Следует провести проверку сравнением данных пространственно-координатного положения конструкций, установленном при лазерном сканировании, с результатами моделирования НДС методом конечных элементов.

**Второй объект** - здание Томского областного театра юного зрителя (ТЮЗ) расположено по пер. Нахановича, 4. На площадке был проведен комплекс работ по съемке объекта в 2012 и 2017 годах. Целью работы являлось получение массива данных, создание комплекса обмерочных чертежей, фиксация крупных дефектов (трещин, смещений, разрушений, повреждений) несущих и ограждающих конструкций. Сканирование здания проводилось с 7 станций, данные с которых сшивались в единое облако точек в программном комплексе Cyclone.

Автором исследования была предложена методика обработки полученной информации, которая заключается в следующем: после создания единого облака точек объекта выбиралась условная «нулевая» точка отсчета координат (0, 0, 0) для данного объекта. Условием определения направления осей точки отсчета являлось совпадение оси X и всех начальных («нулевых») пикетов направляющих осей, по которым велись наблюдения. Набор точек направляющей оси проводился через 10 см на высоту 6 м в результате

построения секущей плоскости, перпендикулярной направлению оси. Полученный набор точек экспортировался в программу MS Excel для построения графиков геометрических параметров направляющей оси стены.

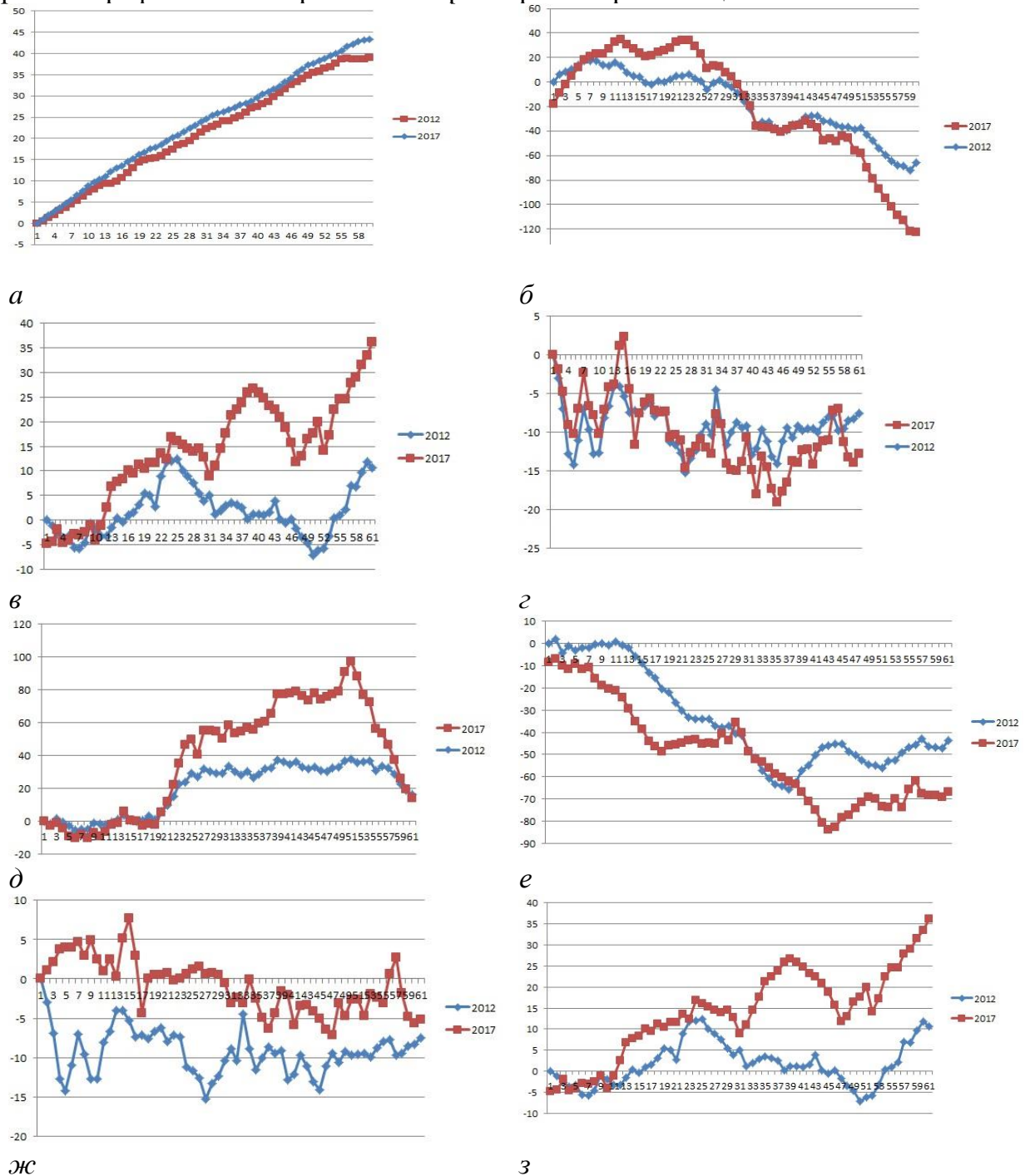


Рис. 2. Отклонения в плане и по вертикали углов: I (а и б); II(в и г); III(д и е); IV (ж и з)

Выполнение деформационного мониторинга сооружения при помощи наземного лазерного сканирования позволяет выявить деформации по заданным плоскостям, что недоступно для традиционных методов наблюдения. Путем сравнения отсканированной модели здания с проектными или условно



эталонными плоскостями можно получить отклонения каждой внешней стены или здания в целом от исходной формы.

В данном исследовании для оценки деформаций здания был применен метод проекций стен на вертикальные плоскости. В программном комплексе Cyclone с помощью компьютерного моделирования в облако точек здания по четырем углам были вписаны условные направляющие, по которым определялись отклонения углов здания в 2012 и 2017 годах (Епифанова, 2017).

На графиках (рис. 2) отчетливо видно два вида деформаций: смещение стен здания относительно друг друга, кроме этого каждая стена обладает собственной кривизной. Максимальные отклонения от вертикали наблюдаются в углах: I – 72 мм и III – 84 мм, в частности, за последние 5 лет 40 и 37 мм соответственно (рис 3.)

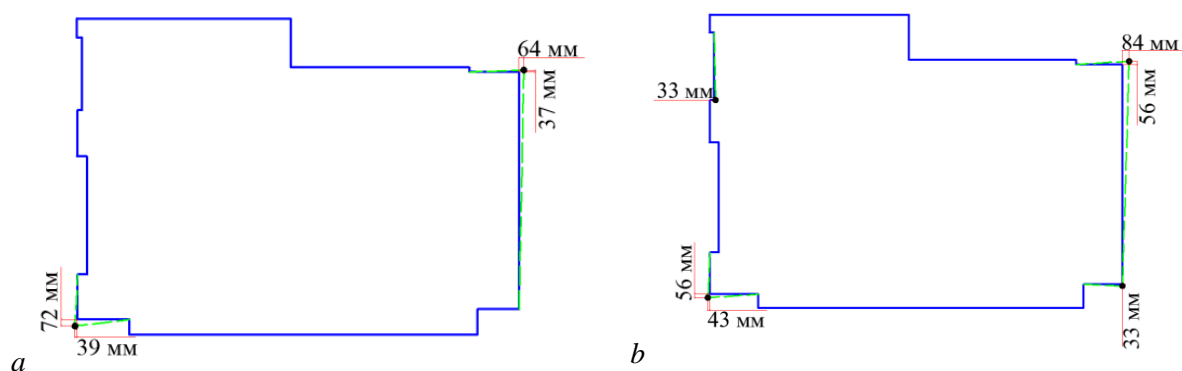


Рис. 3. Максимальные отклонения углов здания: а) 2012 г., б) 2017 г.

На основе трехмерной модели построены обмерочные чертежи здания с нанесением размеров и дефектов конструкций, которая позволила определить направление максимальных деформаций здания, что затруднительно при обычной съемке объекта (рис. 4).



Рис. 4. Трещины фасадов: главного в году: а) 2012, б) 2017 и северного: в) 2012; г) 2017.

Деформации могут быть вызваны неправильным выбором несущего слоя (ленточный фундамент на слабых грунтах был изначально не уместен), появлением пристроек, суффозионными процессами, ползучестью, изменением физико-механических свойств грунтов, положением уровня подземных вод.

**Третий объект.** Для проведения технического контроля была выбрана прожекторная мачта на Ванкорском нефтегазовом месторождении в Туруханском районе Красноярского края (рис. 5).

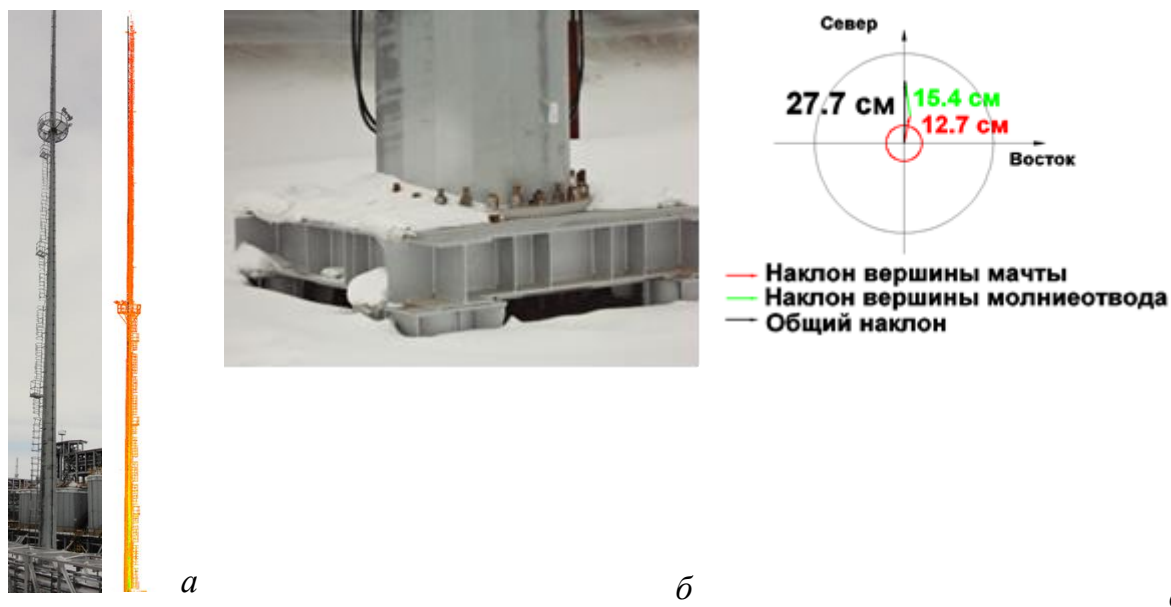


Рис.5. Прожекторная мачта, (а) – фотография и результат лазерного сканирования - облако точек с проектной осью, (б) основание мачты, (в) направление отклонения мачты и молниеотвода

Определение оси мачты проводилось следующим образом. Через каждые 2 метра на стыках секций производились поперечные сечения облака точек мачты. Затем в получившийся разрез вписывался многоугольник, центр которого совпадает с осью мачты. Полученные центры затем соединялись линией, образуя ось мачты. Важно уточнить, что на стыках секций делалось два разреза – нижней и верхней секции, в результате чего были получены корректные оси для каждой секции отдельно.

Полученный набор сечений и ось показывают отклонение осей секций друг от друга не только в местах соединений, но и искажение геометрии мачты по всей длине секции. Дальнейшая обработка результатов и измерение геометрических характеристик мачты производилась с помощью AutoCAD. На основе измерений составлены диаграммы отклонения существующей оси от вертикальной оси мачты в направлениях запад-восток и юг-север и итоговое отклонение. Итоговое отклонение от вертикальной оси составило: для вершины мачты 12,7 см, для вершины молниеотвода 15,4 см. Общее отклонение от вертикальной оси мачты с молниеотводом составило 27,7 см (рис.5в при виде сверху).

Из диаграмм следует, что наклон мачты происходит не только в местах соединения секций, но и по всей длине одной секции.

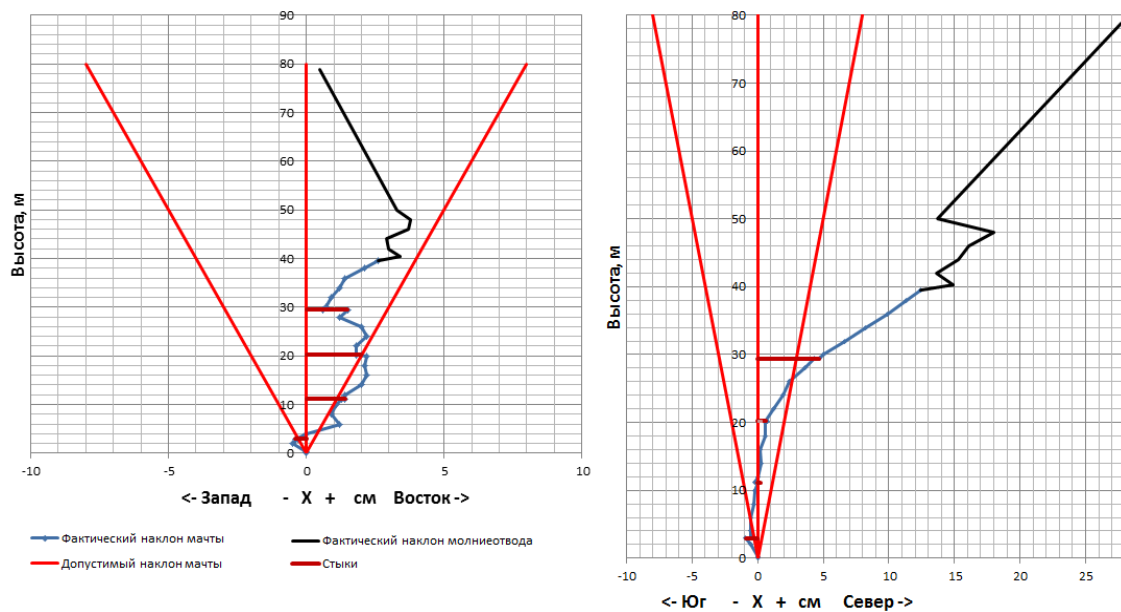


Рис. 6. Отклонение мачты и молниеотвода в направлениях запад-восток и юг-север

Деформации могут быть вызваны неправильным монтажом конструкций, оттаиванием мерзлого грунта, слабой несущей способностью грунтов.

Применение в данной работе методик позволяет оценить деформационные изменения инженерных сооружений различного назначения. Наземное лазерное сканирование дало возможность обнаружить тенденцию развития деформаций инженерных сооружений, что, в свою очередь, может лучшим образом объяснить причину их возникновения.

**ВТОРОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ. Оценка вклада грунтовых условий (изменение физико-механических свойств грунтового массива, уровня грунтовых вод) в деформации инженерных сооружений, с помощью численного моделирования напряженно-деформированного состояния природно-технической системы, является главным фактором для обоснования решений по обеспечению надежности объекта в пространственном положении.**

**Первый объект.** Разработана цифровая модель грунтового основания самой деформируемой опоры сооружения. Поведение грунтового массива смоделировано с помощью упруго-пластической модели с изотропным упрочнением *PLAXIS Hardening Soil*. Расчеты деформаций заключались в моделировании процесса нагружения опоры в ходе эксплуатации и капремонта с помощью опции расчета *Staged construction*. Эта опция позволяет активировать или деактивировать вес, жесткость и прочность выбранных компонентов конечноэлементной модели.

В основной модели определены два расчетных этапа, на первом этапе с нагрузкой 200, на второй -100 кН/м/м. В восьми клонах от основной модели выполнено изменение прочности материала фундамента от 16 до 80 МПа. Ниже представлены вертикальные перемещения грунтового массива (рис. 7). Моделирование показало: 1) при снижении нагрузки деформации прекратятся, так при первоначальной нагрузке (в течении 50 лет), равной 200 кН, максимальные деформации составляют 16 мм, а при снижении веса пролетных

строений до 100 кН максимальные деформации составят только 8 мм; 2) изменение прочности бетона во время эксплуатации опор до ремонта (от 80 до 16 МПа могло сопровождаться деформациями от с 16 до 48 мм, после усиления опор (повышение прочности бетона) деформации уменьшатся с 49 до 28 мм.

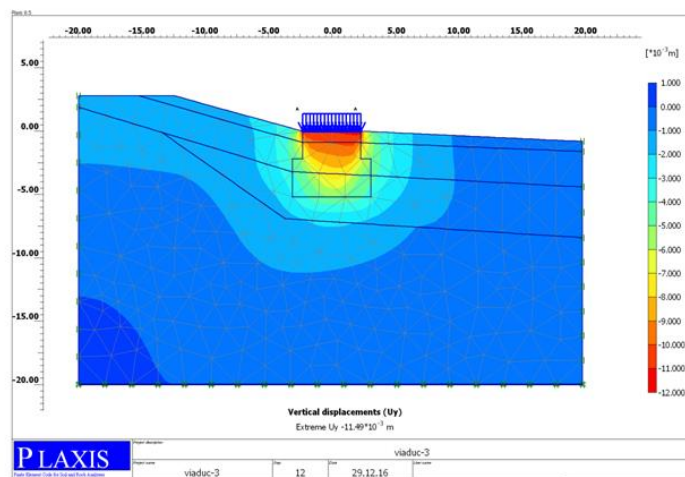


Рис. 7. Вертикальные перемещения грунтового основания при эксплуатации объекта

Доказано, что уменьшение прочности бетона фундамента приводит к значительному увеличению вертикальных напряжений и деформаций. Обеспечение достаточной точности расчетов связано с необходимостью проведения полноценных лабораторных и полевых исследований для определения механических свойств грунтов. Значения вертикальных перемещений, предсказанные в ходе упруго-пластического моделирования показывает небольшое отклонение от данных полевых работ. Тот факт, что реальное значение меньше расчетного, можно объяснить переуплотнением грунтового массива в ходе его формирования.

**Второй объект.** С целью оценить вклад грунтовых условий в деформации здания ТЮЗа автором выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов в ноябре 2017 г. (рис. 8) Здание моделировалось жесткой плитой, опертой на междузловые анкеры. Удельный вес плиты представлял собой нагрузку от целого здания с нормальной жесткостью 60 МН/м, изгибной жесткостью 5 МНм<sup>2</sup>/м. Данные по материалам фундаментов присвоены междузловым анкерам. Механические свойства анкеров следующие: нормальная жесткость 20 МН, максимальные усилия сжатию/растяжению  $1 \cdot 10^{15}$  кН, шаг расстановки анкеров 1 м. При задании начальных условий сгенерированы давление воды и начальные напряжения.

Для материала фундаментов использовалась упругая модель (Plaxis). Были использованы следующие параметры: удельный вес - 25 кН/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона 0,25. Для оценки поведения минеральных грунтов использована упругопластическая модель с изотропным упрочнением *Hardening Soil Model* (Plaxis). Расчеты заключались в определении вертикальных и горизонтальных перемещений грунтового основания от массы надфундаментной части. Моделирование процесса нагружения опоры осуществлялось с помощью опции

расчета Staged construction. Эта опция позволяет активировать или деактивировать вес, жесткость и прочность выбранных компонентов конечно-элементной модели. Выполнено сравнение результатов моделирования с пространственно-координатным положением конструкций, установленном при лазерном сканировании.

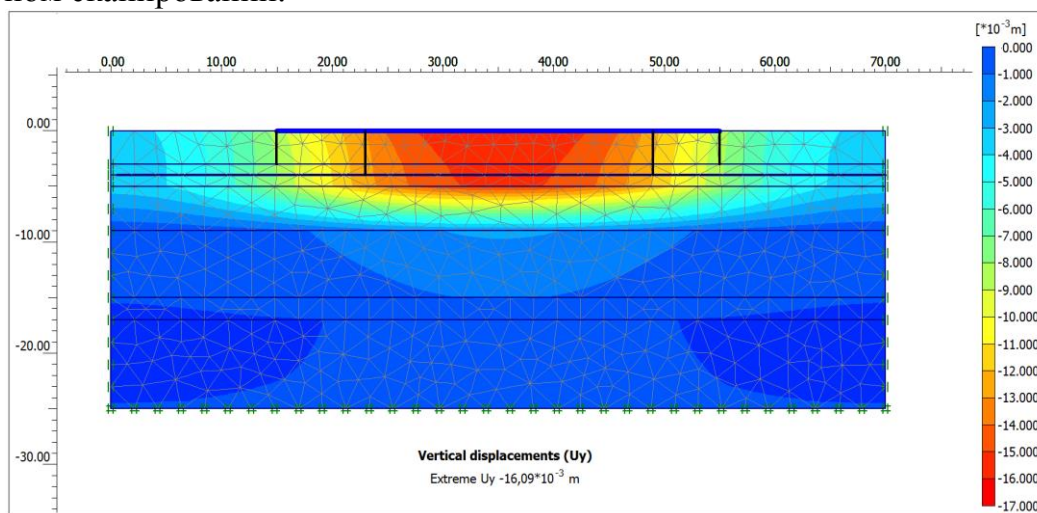


Рис.8. Сетка конечных элементов

Деформации наземной части здания, исторического здания, расположенного по пер. Нахановича 4 в г. Томске, являются неравномерными, поэтому, недопустимо связывать их с только уплотнением грунтов основания. Кроме того, деформации продолжают и после выполнения капитального ремонта здания 2012 г., когда трещины и деформации были спрятаны за косметическим слоем и к настоящему времени раскрылись вновь.

Неравномерность деформаций, на наш взгляд, можно объяснить тремя факторами. Во-первых, ключевую роль в неравномерности осадок здания играет геоморфологические особенности участка. Совместное рассмотрение ориентировки здания и деформаций, полученных при помощи наземного лазерного сканирования в 2012 и 2017 гг., свидетельствуют о том, что наземная конструкция деформируется по диагонали, параллельно направлению бровки первой надпойменной террасы, вдоль реки Томь. Вероятно, такое расположение можно объяснить суффозионными и эрозионными процессами внутри грунтового массива при изменении уровней подземных и поверхностных вод в р. Томи и Ушайки.

Во-вторых, неравномерность деформаций, и это подтвердило моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива, связана с разной глубиной опирания основного здания и пристроек. По результатам лазерного сканирования объекта в 2012 и 2017 гг. установлено, что сгущение деформаций наблюдается в зоне сочленения основного здания и пристроек с западной и восточной сторон здания. Максимальные расчетные значения вертикальных перемещений грунтового массива составили 12,71 мм, горизонтальных – 1,72 мм. Расчетные значения вертикальных перемещений грунтового массива основного здания без пристроек составили 11,49 мм, горизонтальных – 1,71 мм. Поэтому концентрация деформаций в зоне

сочленения пристроек и основного здания связана с пристройками, разной глубиной заложения их фундаментов.

В-третьих, продолжающиеся во времени деформации, вероятно связаны с ползучестью органо-минеральных грунтов мощностью до 2 м, вскрытых тремя скважинами в непосредственной близости от здания. Моделирование ползучести грунта проводилось заданием дополнительных параметров для слоя, залегающего на глубине 3-5 м (модифицированный коэффициент компрессии  $\lambda^*=0,105$ , модифицированный коэффициент набухания  $\kappa^*=0,015$ , модифицированный коэффициент ползучести  $\mu^*=0,004$ ), собранных по литературным источникам из-за отсутствия данных по геологии участка в сфере взаимодействия. Приращения вертикальных и горизонтальных перемещений с учетом ползучести органо-минерального грунта составили соответственно +3,38 и +0,17 мм в год.

Трехмерная модель позволила определить направление максимальных деформаций по диагонали здания, это совпало с геоморфологической границей, что не позволило бы сделать обычная съемка объекта. Грубая (при отсутствии изысканий) оценка вклада в деформации инженерно-геологических условий, позволила установить, что они составляют только  $\frac{1}{3}$  от наблюдаемых. Выполнение полноценного обследования грунтового основания перед реконструкцией позволило бы избежать развития трещин после окончания капитального ремонта сооружения 2012 г.

**Третий объект.** В расчетах прожекторной мачты использовалась упруго-пластическая модель Plaxis Mohr-Coulomb. Ростверк моделировался жесткой плитой, опертой на межузловые анкеры. Вес мачты передавался на фундамент при помощи опции Distributed static load A-A (2885кг/м<sup>2</sup>).

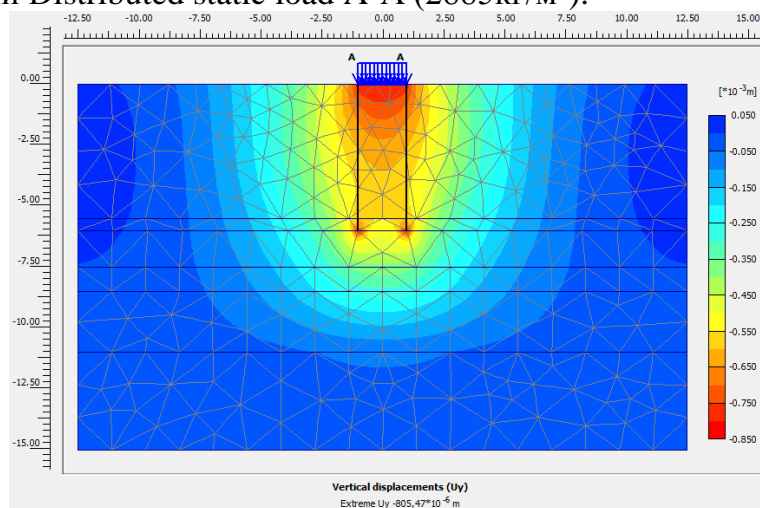


Рис. 9. Конечно-элементная сетка и изополя вертикальных перемещений

Моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового основания прожекторной мачты на Ванкорском нефтегазоконденсатном месторождении позволило оценить вклад грунтовых условий в деформациях мачты. Расчеты вертикальных перемещений грунтового основания мачты составили 0,8 мм (рис. 9), горизонтальные перемещения – 0,14 мм. Предположение, что деформации мачты могут быть обусловлены специфическими характеристиками грунтового основания: высокой

сжимаемостью грунтов сезонно-талого слоя, ползучестью многолетнемерзлых пород в длительной перспективе и изменениями механических свойств грунтов при изменении их температурного режима, не подтвердилось. Вклад грунтовых условий оказался минимальным. Фундамент устроен правильно с учетом особенностей грунтов этой климатической зоны. Деформации мачты с молниеотводом на 94% обусловлены строительными свойствами надземной части конструкции.

Оценка вклада грунтовых условий при помощи численного моделирования НДС позволила ответить на главный вопрос – каковы причины возникновения деформаций исследуемых объектов и обосновать мероприятия по обеспечению их безопасности.

**ТРЕТЬЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ** Геотехнический мониторинг ответственных сооружений рекомендуется проводить с использованием комплексного подхода, основанном на сочетании двух методов: а) постоянном обновлении результатов инструментальных измерений и б) моделировании напряженно-деформированного состояния грунтового массива во взаимодействии с инженерным сооружением на базе метода конечных элементов с учетом: этапа строительства, наличия специфических грунтов, геологических процессов; изменений состояния и физико-механических свойств грунтов, уровня подземных вод.

Поскольку инженерные сооружения в результате их проектных и конструктивных качеств, а также непрерывного воздействия природных и техногенных факторов испытывают различного рода деформации, наиболее оперативным способом предупреждения чрезвычайных ситуаций особенно для сложных, большепролетных, высотных и других ответственных инженерных сооружений должно быть постоянное наблюдение за их техническим состоянием с помощью комплексного подхода основанном на численном моделировании напряженно-деформированного состояния природно-технической системы и постоянном обновлении результатов инструментальных измерений ее пространственного положения. Разработанная методика позволяет определять актуальное техническое состояние инженерного сооружения на каждом периодическом этапе мониторинга. Данная методика представлена в сжатом виде в таблице 1 и на рисунках 10,11. Разработанная в данной работе комплексная методика оценки деформаций при помощи наземного лазерного сканирования и определения напряженно-деформированного состояния грунтового массива в рамках геотехнического мониторинга была практически применена на трех объектах: железнодорожный мост Красноярской железной дороги, историческое здание в г. Томске, прожекторные мачты на Ванкорском нефтегазовом месторождении. Работы по геотехническому мониторингу вышеупомянутых инженерных сооружений с применением непосредственно разработанной методики выполнялись лично автором настоящей работы.

Ключевым итогом практического применения разработанной методики является возможность достоверной численной оценки актуального состояния инженерного сооружения и фиксирования перемещения его в пространстве на основании комплексного подхода анализа НДС грунтового массива и лазерного сканирования.



Рис. 10. Общая схема комплексного подхода определения деформаций методом конечных элементов и наземным лазерным сканированием

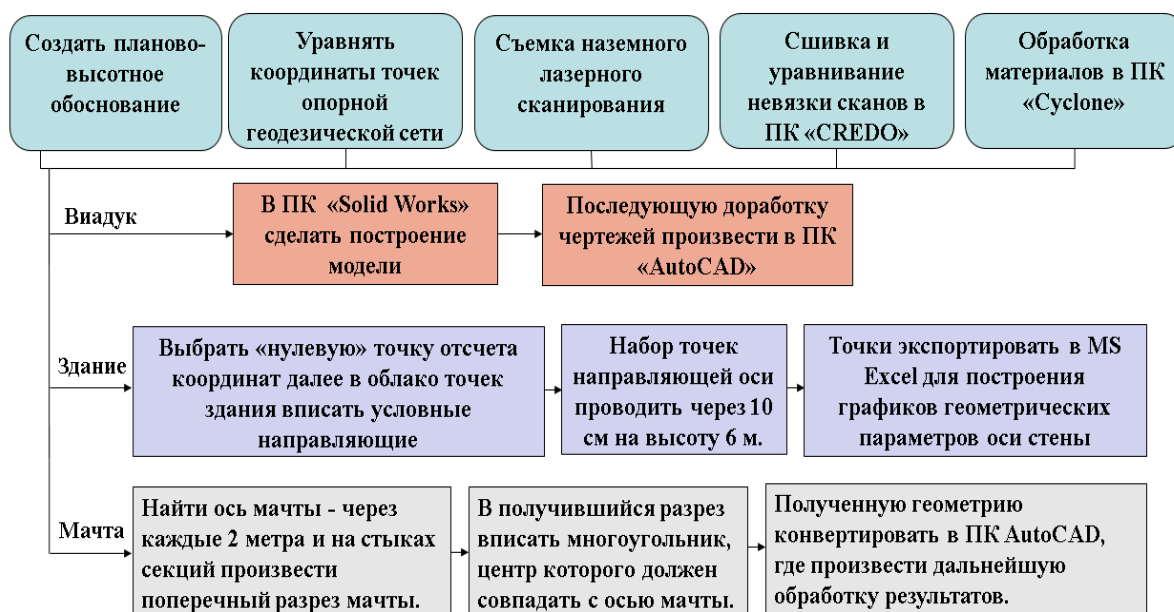


Рис. 11. Общая схема определения деформаций различных сооружений наземным лазерным сканированием



Таблица 1. Методика определения деформаций природно-технической системы при комплексировании методов НЛС и конечных элементов

Инженерное сооружение	Технология наземного лазерного сканирования	МКЭ
Железнодорожный мост	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Создать планово-высотное обоснование</li> <li>2. Вычислить и урвать координаты точек опорной геодезической сети</li> <li>3. Выполнить съемку наземного лазерного сканирования конструкции моста и прилегающей территории методом трехштативной тахеометрической съемки, в среднем качестве, среднее время сканирования 7 минут на станции. Расстояние от сканера до отражаемого объекта не превышает 300 м: - при съемке рельефа 200 м; - при съемке конструкций моста 100 м.</li> <li>4. По материалам сканирования (облаков точек) выполняется сшивка и уравнивание невязки сканов.</li> <li>5. Обработка материалов полевых измерений выполняется в программном комплексе «Cyclone», последующая доработка чертежей произведена в графическом редакторе AutoCAD</li> <li>6. Обработка тахеометрических измерений производится в программном комплексе «CREDO»</li> <li>7. В программном комплексе «Solid Works» выполнялось построение детализации отдельных конструктивов, узлов, и сборка в единую модель.</li> </ol>	<p>Для оценки поведения грунта использовать сложные (advanced soil constitutive models) модели типа Hoek-Brown, Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall), или упругопластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model (Plaxis), которая использовалась в работе. Эта модель учитывает несовпадение модуля упругости ветвей разгрузки и повторного нагружения, наблюдаемое при лабораторных испытаниях. Модель точно описывает поведение грунта при экскавации грунта, при устройстве подпорных стен и проходке туннелей, сопровождающейся уменьшением среднего эффективного напряжения и одновременно мобилизацией сопротивления пород сдвигу.</p>
Гражданское здание	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Создать планово-высотное обоснование</li> <li>2. Вычислить и урвать координаты точек опорной геодезической сети</li> <li>3. Выполнить съемку наземного лазерного сканирования здания методом трехштативной тахеометрической съемки, в высоком качестве, среднее время сканирования 20 минут на станции.</li> <li>4. По материалам сканирования (облаков точек) выполняется сшивка и уравнивание невязки сканов.</li> <li>5. Обработка материалов полевых измерений выполняется в программном комплексе «Cyclone»: выбирается «нулевая» точка отсчета координат (0, 0, 0) далее в облако точек здания по четырем углам были вписаны условные направляющие, по которым определялись отклонения углов здания, набор точек направляющей оси проводились через 10 см на высоту 6 м.</li> <li>6. Полученный набор точек экспортировался в программу MS Excel для построения графиков геометрических параметров направляющей оси стены.</li> </ol>	<p>Для оценки поведения грунта использовать упругопластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model</p> <p>Оценка деформаций ползучести органо-минерального грунта можно использовать Sekiguchi-Ohta, Cam-Clay models или Soft Soil Creep Model, которая использовалась в данной работе. Результаты численного моделирования и лабораторных испытаний показали, что модель Soft Soil Creep достаточно точно моделирует процессы фильтрационной и вторичной консолидации.</p>

Инженерное сооружение	Технология наземного лазерного сканирования	МКЭ
Прожекторная мачта	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Создать <span style="float: right;">планово-высотное обоснование</span></li> <li>2. Вычислить и урвать координаты точек опорной геодезической сети</li> <li>3. Выполнить съемку наземного лазерного сканирования мачты методом трехштативной тахеометрической съемки, в высоком качестве, среднее время сканирования 20 минут на станции.</li> <li>4. По материалам сканирования (облаков точек) выполняется шивка и уравнивание невязки сканов.</li> <li>5. Обработка материалов полевых измерений выполняется в программном комплексе «Cuslope»: для нахождения оси мачты - через каждые 2 метра и на стыках секций производился поперечный разрез мачты. Затем в получившийся разрез вписывался многоугольник, центр которого должен совпадать с осью мачты. Полученные центры затем соединялись линией, образуя ось мачты. На стыках секций делалось два разреза – нижней и верхней секции, в результате чего были получены корректные оси для каждой секции отдельно.</li> <li>6. Полученная геометрия конвертировалась затем в формат, поддерживаемый программой AutoCAD, где происходила дальнейшая обработка результатов и измерение геометрических характеристик мачты.</li> </ol>	<p>Для оценки поведения грунта использовать сложные (advanced soil constitutive models) модели, Soft Soil Creep model (SSC), модель обычно подходит для всех почв, но она не учитывает</p> <p>вязкие эффекты, т. е. ползучесть и релаксацию напряжений. Фактически, на всех почвах наблюдается некоторая ползучесть и первичное сжатие, таким образом, сопровождается определенным количеством вторичного сжатия. Например, упруго-пластическая модель Plaxis Mohr-Coulomb. Эта модель использовалась в расчете мачт, она представляет собой приближение «первого порядка» поведения почвы или породы. Рекомендуется использовать эту модель для первого анализа проблемы.</p>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный в диссертационной работе анализ показал существующие пробелы в действующих методиках регистрации влияния деформаций грунтового массива на исправное состояние инженерных сооружений и отсутствие полноценной нормативной базы в области геотехнического мониторинга объектов строительного назначения, делающей возможным предупреждение возникновения аварийных ситуаций.
2. Главными отличительными чертами деформационных процессов оснований инженерных сооружений оказываются их пространственный и неравномерный характер в связи с чем происходят пространственные деформации всего объекта наблюдения, это нужно принимать во внимание для полной, объективной картины их воздействия на исправное техническое состояние.
3. Разработана комплексная методика оценки воздействия неравномерных деформаций оснований на исправное состояние инженерных сооружений, содержащая мониторинг пространственных перемещений массива точек инженерного сооружения с использованием наземного лазерного сканирования,

а также оценка изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового основания в процессе зафиксированных результатов в ходе геотехнического мониторинга.

4. На основании исследуемых объектов можно сделать следующий вывод: при конвертации результатов лазерного сканирования, в итоговую модель, созданный массив точек инженерного сооружения, каждая точка которого имеет свои координаты в пространстве, они, в свою очередь совпадают с узлами модели для оценки НДС, а изменение их в пространстве и есть предмет контроля геотехнического мониторинга.

5. Проведенные исследования позволили получить следующие результаты. Численная характеристика состояния перемещения основания, на примере Козинского виадука, определявшаяся при помощи полученных в процессе геотехнического мониторинга изменений инженерного сооружения, для чего было проведено сравнение первоначальной модели, построенной на основе проектной документации и первоначальных инженерных обследований, и итоговой модели, обновленной в процессе мониторинга при участии наземного лазерного сканирования, составил 43 мм.

6. На основании проведенного исследования исторического здания разработана расшифровка данных наземного лазерного сканирования при которой можно не только фиксировать перемещение в пространстве конструктивных элементов инженерного сооружения, но определить тенденцию всего изменения положения массива точек в целом.

7. Разработанные методологические основы мониторинга обработки результатов лазерного сканирования и оценки НДС грунтового массива, на примере прожекторной мачты позволили, в полной мере, ответить на вопрос, в результате чего произошли деформации, превышающие нормативные.

8. Полученные результаты исследований комплексного определения деформаций при помощи наземного лазерного сканирования и оценки НДС грунтового массива в результате геотехнического мониторинга дают возможность определить необходимость осуществления текущих ремонтных работ по поддержанию или реконструкции исправного состояния инженерного сооружения до мгновения, когда возникнет аварийная ситуация, это в свою очередь способствует уменьшению трудовых затрат и стоимости работ в целом.

9. Результаты диссертационного исследования были применены в практической деятельности в результате комплексных инженерных изысканий в процессе мониторинга мостовых сооружений на перегоне Джебь - Щетинкино Красноярской железной дороги, исторического здания в котором располагается театр юного зрителя в г. Томске, прожекторных мачт на Ванкорском нефтегазовом месторождении, которое расположено в Туруханском районе Красноярского края.

10. Технологический регламент требует дальнейшего опробования на других объектах, а впоследствии может быть использован для совершенствования нормативной базы геотехнического мониторинга.

**Список основных публикаций по теме диссертации в изданиях,  
рекомендованных ВАК:**

1. Строкова Л.А., **Епифанова Е.А.**, Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С.125–139
2. **Епифанова Е.А.**, Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – №5. – С.27–41.
3. **Епифанова Е.А.**, Строкова Л.А. Анализ деформаций прожекторной мачты при помощи наземного лазерного сканирования и метода конечных элементов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – №5 (принята к печати).

**В других изданиях:**

4. **Епифанова Е.А.** «Наземное лазерное сканирование как метод оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива на примере Козинского виадука в восточном Саяне» Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. Том I. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – С. 457.
5. **Епифанова Е.А.** «Оценка напряженно-деформированного состояния грунтового массива с учетом наземного лазерного сканирования (НЛС) на примере железнодорожного виадука» / Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам X Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых): в 2 т. / отв. ред. Р. Р. Гильмутдинов; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – Т.2. – С.91-93.
6. **Епифанова Е.А.** «Метод оценки НДС грунтового массива при реконструкции железнодорожного моста с учетом данных наземного лазерного сканирования»/ Вторая научно-практ. конф. «Пути обеспечения совместной работоспособности инженерного сооружения и специфических грунтов» Московский гос. университет путей сообщения Императора Николая II Институт пути, строительства и сооружений Кафедра «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты». – Москва, 2017. – С. 85-90.
7. **Епифанова Е.А.** «Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью НЛС и МКЭ» Проблемы геологии и освоения недр: XXII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 155-летию со дня рождения академика В.А. Обручева. 2018. – С. 490-492.
8. **Епифанова Е.А.** «Оценка деформаций с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании НЛС и МКЭ» Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам XI Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых): в 3 т. / отв. ред. Р. Р. Гильмутдинов; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2018. – Т.3. – С. 17-21.