

УДК 624.131

## ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ ИСТОРИЧЕСКОГО ЗДАНИЯ В ТОМСКЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА, ОСНОВАННОГО НА СОЧЕТАНИИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Епифанова Екатерина Александровна<sup>1</sup>,  
epifanova@tpu.ru

Строкова Людмила Александровна<sup>1</sup>,  
sla@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** темы обусловлена необходимостью совершенствования подходов к оценке и прогнозу деформаций при сохранении исторических зданий. Решение этой задачи сопряжено с многими неопределенностями, такими как недостаток исходных данных по геологии и проектным решениям объекта, ограничения при отборе образцов строительных материалов и грунтов для более точного определения их нынешних физико-механических свойств, слабая разработанность теоретических положений по выполнению работ. В статье освещено изучение инженерно-геологических условий территории при реконструкции Томского театра юного зрителя. Особенности реконструкции сооружения связаны с непрекращающимися деформациями основания, сложностью режима подземных вод, нарушением природного сложения грунтового массива и физико-механических свойств. Это потребовало актуализации расчетной модели для оценки напряженно-деформированного состояния грунтового основания.

**Целью** исследования является численная оценка напряженно-деформированного состояния грунтового основания исторического сооружения и роли лазерного сканирования в получении данных по деформациям объекта.

**Объект исследования:** локальная литотехническая система взаимодействия «основания–грунт» в пределах исторической застройки территории г. Томска, по пер. Нахановича, 4.

**Методика исследования.** Исходными данными для моделирования поведения грунтового массива послужили региональные геологические материалы, а также полевые данные, полученные в разные годы. Выполнено рекогносцировочное обследование участка. Для характеристики напряженно-деформированного состояния грунтового массива использовался программный комплекс на базе метода конечных элементов. Для оценки деформаций и построения точной трехмерной модели объекта наблюдения использовалась технология лазерного сканирования. Сканирование объекта проводилось лазерным 3D сканером Leica Scanstation C10, планово-высотное обоснование и привязка пунктов обоснования к местной системе координат с использованием электронного тахеометра LEICA TS15 и GNSS приемника LEICA GS10, обработка массива точек проводилась в программном комплексе Leica Cyclone 8.0, трехмерное моделирование объекта было осуществлено в программном комплексе SolidWorks.

**Результаты.** Оценены инженерно-геологические условия участка изысканий. Создана цифровая расчетная модель. Выполнено сравнение результатов моделирования с пространственно-координатным положением конструкций, установленном при лазерном сканировании. Совместное рассмотрение геологического разреза и систем трещин, полученных при помощи наземного лазерного сканирования в 2012 и 2017 гг., свидетельствует о том, что наземная конструкция деформируется по диагонали вдоль реки Томь. Концентрация трещин связана с пристройками с западной и восточной сторон здания. Деформации в зоне сочленения разновременных построек максимальны, т. к. пристройки опираются на фундамент с меньшей глубиной заложения. Продолжающиеся во времени деформации, вероятно, связаны с ползучестью органоминеральных грунтов мощностью до 2 м, вскрытых в непосредственной близости от здания.

### Ключевые слова:

Грунт, лазерное сканирование, моделирование, деформации, механические свойства, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов (МКЭ), культурное наследие.

### Введение

Инженерно-геологическими исследованиями исторических объектов, в т. ч. архитектурных памятников и ансамблей в России с 1970-х гг., занимается широкий круг исследователей: Г.С. Белова, М.В. Бондарев, О.Е. Вязкова, Р.Э. Дашко, И.А. Дёмкин, В.В. Дмитриев, О.В. Домарёв, Л.В. Заботкина, А.А. Никифоров, В.Л. Невечеря, В.М. Кувшинников, А.Г. Купцов, Л.В. Курделова, В.Е. Ольховатенко, Е.М. Пашкин, В.О. Подборская, В.В. Пономарёв, Е.И. Романова, С.Н. Чернышёв, А.Г. Шашкин и другие [1–3]. Результатами этих исследований явилось установление особенностей взаимодействия исторических объектов с окружающей средой, комплексирования методов при изучении состава, состояния, физико-механических свойств компонентов литотех-

нической системы. К сожалению, анализ имеющихся исследований позволяет констатировать слабую разработанность правовых и методических основ инженерно-геологических исследований таких объектов.

Здание (ТЮЗ) расположено по пер. Нахановича, 4 (бывший переулок Ямской до 20.05.1920 г., рис. 1). Площадка непосредственно примыкает к защитной дамбе г. Томска, находится на правом берегу р. Томь южнее устья р. Ушайки (рис. 1).

История объекта началась в 1912 г. На Конной площади, вблизи извозчицкой биржи, где велась торговля лошадьми, открылся крупнейший в Томске театр-синемаграф «Новый». Первым владельцем здания был известный томский купец А.Ф. Громов [4]. Проект здания выполнил архитектор Андрей Лангер в стиле модерн.



Рис. 1. Переулок Ямской в начале прошлого века

Fig. 1. Yamskoy lane at the beginning of the last century



Рис. 2. Местоположение объекта

Fig. 2. Object location

Первоначальный объем включал в себя помещения самого кинозала и вестибюля. До 1926 г. здание эксплуатировалось без надлежащего ремонта, что привело к ветхому аварийному состоянию. В 1930 г. полуразрушенный кинотеатр был восстановлен, и с середины 30-х гг. здание используется как театр, в 1937 г. к основному зданию сделали пристройку сцены с восточной стороны. В 1950-х гг. была проведена реконструкция те-

атра, в результате которой был изменён внешний вид здания. Были выполнены пристройки с северной и западной сторон, утрачены башни главного фасада с купольным завершением, а также лепнина на фасадах и в интерьере. Схема плана по периодам строительства здания показана на рис. 3.

Сегодня здание ТЮЗа представляет собой трехэтажное кирпичное оштукатуренное здание, переменной этажности: трехэтажное в основной ча-



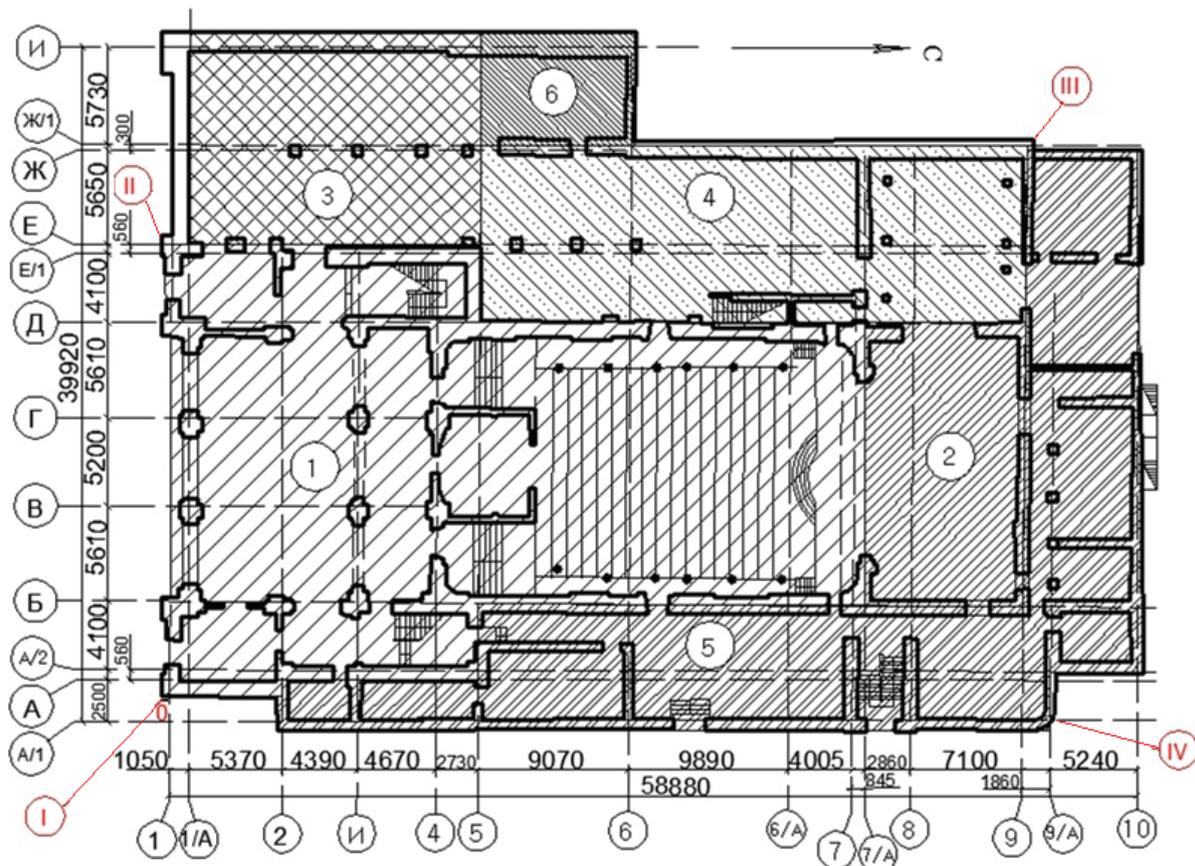
**Рис. 3.** Первоначальный вид здания

**Fig. 3.** Original appearance of the building

сти здания с двухсветным пространством в вестибюле и зрительном зале, двухэтажное с западного и восточного фасадов; без подвала, прямоугольное в плане, размером 58,85×40,71 м. Имеется техническое подполье. Планировочная схема здания выполнена с четко выраженной типологией размещения помещений для театра. Основное планировочное ядро – зрительный зал и сцена. Зрительный зал имеет балконы. Главные входы в здание ориентированы на пер. Нахановича. Основными помещениями 1-го этажа являются: вестибюль, зрительный зал и двухсветное фойе с витражами. Основными помещениями, разместившимися на втором этаже, стали: открытая галерея с буфетом и входами на балкон зрительного зала, а также малая сцена. На третьем этаже – репетиционный зал и входы на балкон. В объеме здания находятся три основных лестничных клетки открытого типа. В 2007 г. начался последний капитальный ремонт всего сооружения без изменения границ, планировки и высотности. Проектная документация разработана в 2002 г. НПЦ «Вогтехпроект». В последующие годы (2009–2011 гг.) документация была дополнена и откорректирована ООО «Генстройпроект». Проект по переоснащению сцены большого зала, систем свето- и звукооснащения разработан в 2011 г. ООО «Система». Сложилось так, что ремонтно-реставрационные работы здания ТЮЗа выполнялись в несколько этапов: на первом этапе (2004–2010 гг.) были отремонтирова-

ны инженерные сети: отопление, водопровод и канализация, отремонтирована кровля и помещения, предназначенные для работы театральной труппы. На втором этапе (2011–2012 гг.) отремонтированы помещения вестибюля и малой сцены, выполнено полное техническое переоснащение сцены большого и малого залов, восстановлена лепнина в большом зале, отремонтировано главное фойе театра.

Конструктивная схема здания смешанная, выполнена с несущими внутренними и наружными стенами как продольными, так и поперечными. В отдельных помещениях имеются столбы. Фундаменты здания преимущественно ленточные, мелкого заложения, бутовые и бетонные. Перекрытия деревянные, металлодеревянные и железобетонные. Крыша чердачная, скатная, разноразноуровневая, сложная в плане, с покрытием из оцинкованной кровельной стали. При реконструкции объекта проектировщики не занимались вопросами укрепления фундаментов и основания сооружения, поэтому специальные инженерно-геологические и геотехнические исследования не проводились, и такие вопросы, как геометрические размеры фундамента, механические свойства горных пород в сфере взаимодействия, остались не изученными. Подобные вызовы часто встречаются при реконструкции именно исторических сооружений, по сравнению с современными зданиями.



**Рис. 4.** Схема плана по периодам строительства: 1 – постройка 1912 г. – бывший кинотеатр «Новый», выполненный по проекту архитектора А. Лангера; 2 – граница постройки 1937 г. – пристраивается сцена; здание функционирует как театр; 3–6 – границы постройки после реконструкций 50-х гг. (точные даты не установлены); I–IV – углы здания, взятые для расчета деформаций

**Fig. 4.** Scheme plan for construction periods: 1 is the building in 1912 – the former cinema «Novy», made by architect A. Langer; 2 is the border of the construction in 1937 – the stage was added, the building functions as a theater; 3–6 are the boundaries of the building after renovations of 1950-s (exact dates are not determined); I–IV are the corners of the building, taken for deformation analysis

#### Изученность инженерно-геологических условий района

В начале прошлого века для возведения зданий в Томске специальные геологические исследования для расчетов фундаментов практически не проводились. Не было вплоть до 50-х гг. XX в. и специальных изыскательских организаций в городе, способных дать квалифицированные заключения о геологических условиях строительства для обоснования типов фундаментов и их расчетов [5]. В 30–50-е гг. сотрудники Томского политехнического университета (кафедры гидрогеологии и инженерной геологии (ГИГ) и методики разведки) проводили разведочные работы – бурение скважин, проходку шурфов. По результатам проведения работ сотрудниками кафедры ГИГ – В.А. Нуднером, Ф.П. Нифонтовым, С.А. Левиным, а позже Г.А. Сулакшиной, Л.А. Рождественской, выдавались заключения о несущей способности и деформируемости пород для выбора типа фундаментов зданий и их расчетов, а также разработки мероприятий, требуемых для обоснования инженерной

подготовки территорий застройки. В 1966 г. в кандидатской диссертации Л.А. Рождественской впервые детально охарактеризованы инженерно-геологические условия г. Томска, выполнена типизация геологической среды с целью выбора типов фундаментов сооружений, составлены инженерно-геологическая и геоморфологическая карты города масштаба 1:10000 и сформулированы методические рекомендации по инженерно-геологическим исследованиям городских территорий для наземной застройки. Инженерно-геологическая карта была передана в отдел архитектуры Томского горисполкома для составления генерального плана застройки и реконструкции города, а также в проектные организации города: ТомГЭП, Томгипротранс, ТомскГИСИЗ, ТИСИ, и использована в практической работе.

На прилегающей к объекту территории начиная с 1960-х гг. выполнялись инженерно-геологические и гидрогеологические работы, большей частью связанные с защитой территории города от затопления [6].

В 1966 г. Институт «Гипрокоммунстрой» (г. Москва) подготовил «Заключение об инженерно-геологических условиях строительства набережной на р. Томи и р. Ушайки в г. Томске».

Этот участок входил также в площадь комплексных инженерно-геологических и гидрогеологических съемок М 1:200000 (Нелюбинская партия ТКГРЭ, 1973–1975 гг.) и М 1:50000 (Рыбаловская партия ТКГРЭ, 1978–1983 гг.).

В 1978–1981 гг. Институтом «Томскгипроводхоз» выполнена работа «Оценка последствий русловой добычи песчано-гравийной смеси на уровень режим грунтовых вод поймы реки Томи и экологический ущерб на сельскохозяйственное производство». Результатом этой работы явилось установление бесспорного факта площадного снижения уровня грунтовых вод пойменных отложений реки Томи и снижения уровня реки Томи в черте города Томска в связи с добычей песчано-гравийной смеси из русла реки.

В 1989 г. Томский трест инженерно-строительных изысканий «ТомскТИСИЗ» подготовил «Отчет о комплексных инженерных изысканиях для строительства набережной на р. Томи от устья р. Ушайки по ул. Береговой в г. Томске» (Стадия: рабочий проект)

В 1994–1996 гг. Институтом проблем коммунального хозяйства районов Сибири, Севера и Дальнего востока выполнена тематическая работа «Оценка техногенных условий подтопления территорий Московского тракта, мкр. Черемошники г. Томска и разработка схемы защитных инженерно-технических мероприятий». В данной работе обобщены все имеющиеся материалы прошлых лет по инженерной геологии и гидрогеологии с составлением карт: почвенной, растительности, геолого-литологической и гидрогеологической М 1:10000.

В 2003 г. ОАО «Томскводпроект» выполнило изыскания «Реконструкция ограждающей дамбы г. Томска Томской области». Рабочий проект. Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования.

В 2005 г. ОАО «Сибречпроект» выполнило изыскания по теме «Расширение моста и восстановление набережной реки Ушайки в г. Томске (2 этап). Рабочая документация. Отчет по инженерным изысканиям, выполненным в 2003 году».

В 2015 г. ОАО «Томгипротранс» выполнило изыскания по теме «Защита территорий г. Томска на правом берегу р. Томи от коммунального моста до устья р. Ушайки от негативного воздействия вод», в рамках государственной программы «Воспроизводство и использование природных ресурсов Томской области в 2013–2020 годах».

В перечисленных материалах обобщаются имеющийся материал по инженерной геологии и гидрогеологии, включая физико-механические, фильтрационные и емкостные свойства грунтов района. При этом следует отметить, что некоторые материалы требуют корректировки.

## Характеристика инженерно-геологических условий района

Рельеф и климатические характеристики

В геоморфологическом отношении район представляет террасированную озерно-аллювиальную равнину. По климатическому районированию г. Томск, согласно СНиП 23–01–99\* для строительства, относится к подрайону – IV, в зоне с резко континентальным климатом, с продолжительной суровой зимой и коротким, но теплым летом. В течение года наблюдаются значительные колебания температуры воздуха. Среднегодовая температура воздуха минус 0,5 °С. Самый холодный месяц – январь, со среднемесячной температурой воздуха –19,1 °С, самый теплый месяц – июль, со среднемесячной температурой +18,3 °С. Количество осадков за холодный период (ноябрь–март) – 185 мм, за теплый период (апрель–октябрь) – 406 мм. Суточный максимум осадков в теплый период составляет 76 мм. Преобладающее направление ветра – южное [6]. Среднее число дней со снежным покровом – 178. Средняя дата появления снежного покрова – 15 октября, средняя дата образования устойчивого снежного покрова – 27 октября, средняя дата разрушения устойчивого снежного покрова – 18 апреля, средняя дата схода снежного покрова – 30 апреля. Среднее число дней с метелью в год составляет 46.

Гидрография и гидрология

Главной водной артерией г. Томска является река Тошь с ее притоками – Басандайкой, Ушайкой, М. Киргизкой, Керепеть. Река Тошь – правый приток реки Оби – относится к категории больших рек. Длина реки 840 км. Ширина до 400 м. Глубина реки составляет 2...8 м. Реки извилисты, с малыми уклонами. Режим рек равнинного типа, с характерным весенне-летним половодьем, которое начинается в конце апреля, и редкими паводками в летне-осенний период. Питание рек в основном осуществляется за счет дождевых и снеговых осадков (около 50 % водосбора) и подземных вод. Появление первых ледяных образований наблюдается в октябре (средняя дата приходится на 19 октября). При раннем похолодании они могут наблюдаться в первой декаде октября, при позднем наступлении зимы – в первых числах ноября. Средняя дата наступления ледостава приходится на 1 ноября. Средняя продолжительность ледостава – 170 дней, а всех ледовых явлений – 190 дней. Средняя дата вскрытия приходится на 20 апреля. Средняя дата окончания ледовых явлений приходится на 23 апреля, наиболее ранняя – на 12 апреля, наиболее поздняя – на 3 мая. Период реки, свободной ото льда, длится 167...204 дня.

Геологическое строение

В тектоническом отношении территория изысканий находится в пределах Кольвань-Томской складчатой зоны. Согласно *Карте инженерно-гео-*

логического районирования Томского Приобья масштаба 1:500000, составленной Л.А. Строковой (1996), на данной территории выделяют две крупные инженерно-геологические области, различающиеся по направленности и характеру неотектонических движений, рельефу, строению и мощности четвертичных отложений: А – область долины р. Оби и ее крупных притоков – рек Томи и Шегарки; Б – Обь-Иртышская область [7]. В пределах областей по различиям в возрасте и генезисе геоморфологических типов выделены подобласти. Подобласти обособляют территории с принципиально различной дренированностью, гидродинамической характеристикой грунтовых вод и типом их режима, морфометрическими характеристиками мезорельефа, разновидностью и интенсивностью современных геологических процессов, характером почвенного покрова.

Территория участка, согласно Карте инженерно-геологического районирования Томского Приобья, входит в область А, внутри которой выделены четыре подобласти: три надпойменных и пойменная террасы.

Третья надпойменная терраса р. Томи развита локально, с абсолютными отметками 97...119 м. Густота расчленения составляет 0,6...1,25 км/км<sup>2</sup>, глубина расчленения 20...60 м/км<sup>2</sup>. Уклоны поверхности более 6°. Терраса хорошо выражена в рельефе. От прилегающих к ней водоразделов и более низких террас она большей частью отделена пологим уступом.

У р. Томи вторая надпойменная терраса высотой 8...13 м и шириной 0,5...8 км по левобережью встречается почти повсеместно, по правобережью сохранилась фрагментарно. Геологический разрез террасы обычно представлен переслаиванием суглинков, супесей, подстилаемых песками разной зернистости.

Первая надпойменная терраса сохранилась лишь отдельными фрагментами. Относительная высота террасы 10...12 м. Изучаемый объект расположен на первой надпойменной террасе р. Томи.

Правобережная пойменная терраса р. Томи на участке ограждающей дамбы имеет ширину от 0,6 до 3,5 км. Общая высота прирусловой террасы составляет 78,5...81 м при отметках меженного уровня воды р. Томи 67,7 м. Мощность отложений пойменной террасы колеблется от 12...15 до 20...26 м, при этом уменьшение мощности происходит по направлению от русла к тыловой части террасы. Пойменные отложения подстилаются глинистыми сланцами палеозойского фундамента с абсолютными отметками их кровли 64,0...67,5 м. В литологическом отношении отложения поймы представлены преимущественно трехслойной толщей. Верхний слой практически повсеместно представлен техногенными грунтами площадной отсыпки мощностью от 0,6...1,0 до 7...8 м при средней мощности 2...3 м. Средний слой сложен глинистыми грунтами, мощность которых колеблется от 2...4 до 10 м при средней мощности 6...7 м. Нижний слой

представлен гравийно-галечниковым грунтом с преимущественно песчаным заполнителем. Мощность слоя от 2 м (в южной части) до 11...17 м [7].

#### Гидрогеологические условия

Террасовый комплекс играет важную аккумуляющую и регулирующую роль в поверхностном стоке реки Томи. Гидрогеологические условия на рассматриваемой территории характеризуются распространением здесь единого четвертично-палеозойского водоносного комплекса. Песчано-гравийные отложения пойменной террасы залегают на глинистых сланцах нижнего карбона без глинистого разделяющего слоя. При этом имеющиеся материалы (Ключевская партия ТКГРЭ, А.Ф. Саблин, 1980–1988 гг.) свидетельствуют о том, что водопроводимость палеозойского водоносного горизонта здесь не превышает 5 м<sup>2</sup>/сут. Коэффициент фильтрации глинистых сланцев при средней мощности трещиноватой зоны 25...30 м составляет 0,16...0,2 м/сут, т. е. глинистые сланцы для четвертичного водоносного горизонта пойменной террасы являются водоупором [6].

На участке ограждающей дамбы водовмещающими грунтами являются гравийно-галечниковые отложения. Пески и супеси здесь развиты лишь на отдельных участках и представлены небольшими маломощными линзами. Водоносный горизонт двухслойный с верхним суглинистым слоем мощностью до 3...5 м. Суглинки практически повсеместно обводнены, при этом статические уровни грунтовых вод суглинков совпадают с пьезометрическим (статическим) уровнем грунтовых вод гравийно-галечниковых отложений, образуя напорно-безнапорный горизонт подземных вод пойменной террасы.

Следует отметить, что длительная выборка гравийно-песчаной смеси из русла реки у г. Томска оказала заметное влияние на уровенный режим. Так, отметка максимального паводкового уровня 1 % обеспеченности в расчетном створе города Томск (пристань) до 1962 г. составляла 80,71 м, а за период с 1962 по 2003 гг. стала 78,01 м, т. е. величина снижения максимального паводкового уровня составляет 2,7 м. Аналогическая ситуация наблюдается также со среднегодовыми, минимальными, среднемаксимальными уровнями.

#### Геологические и инженерно-геологические процессы

Изучению основных закономерностей развития геологических процессов и различных аспектов их проявления на территории г. Томска посвящены работы А.А. Земцова (1970, 1972, 1976), Н.С. Евсевой (1980, 1990), Т.Я. Емельяновой (1999), С.Б. Ершовой (1973, 1977), В.А. Льготина (1990), З.И. Ястремской (1980) и многих других.

В пределах города широким развитием пользуются различные неблагоприятные процессы и явления. К их числу относятся: суффозия, оползни, овраги, речная эрозия, заболачивание, морозное пучение, подтопление и другие [5, 7].

Суффозионные процессы отмечаются на участках сосредоточенной разгрузки подземных вод в пределах долин р. Томи и Ушайки. В рельефе они выражены в виде суффозионных цирков с сосредоточенным выходом подземных вод.

Оползни имеют широкое развитие на территории г. Томска. Они приурочены к береговым склонам р. Томи и Ушайки. Основными причинами оползней являются: высота и крутизна склонов (36...40°) их обводненность, подрезка, нагрузка, динамическое воздействие транспорта и др.

Речная эрозия наиболее активно проявляется в паводковый период.

Морозное пучение проявляется на переувлажненных участках с близким залеганием подземных вод и наличием пылевато-глинистых грунтов. Возникающие при глубоком сезонном промерзании нормальные и касательные силы морозного пучения способствуют деформации фундаментов и несущих конструкций сооружений.

Свойства горных пород

Характеристика свойств грунтов основания приводится по данным изысканий 2014 г. Участок сложен техногенными, аллювиальными, элювиальными и скальными грунтами. Изучена толща грунтов до глубины 21,0 м.

По результатам полевых, лабораторных работ и последующей камеральной обработки в разрезе обследуемого участка выделено 5 инженерно-геологических элементов. Классификация грунтов принята по ГОСТ 25100–2011 г.

*Техногенные грунты (t)* представлены гравийными грунтами (ИГЭ-1), влажными, с песчаным заполнителем до 40 %, содержание фракции менее 2 мм колеблется от 12,3 до 49,3 % при среднем значении 32,2 %, удельное сцепление 3 кПа; угол внутреннего трения 36°; модуль деформации 43 МПа [6].

Скважинами 10 и 11, находящимися в 5 м на юго-запад и 7 м на северо-запад от здания, пробуренными в 1966 г. Институтом «Гипрокоммунстрой» в основании техногенных грунтов, вскрыт слой навоза с плохо перегнившей соломой, древесной, супесью, сильно влажный, мощностью 1,3 и 1,7 м соответственно. Биогенные отложения – сильноразложившийся навоз – мощностью до 2 м вскрыты также скважиной 8867, находящейся в 10 м на запад от здания, пробуренной в 1989 г. «ТомскГИСИзом». Наличие этого слоя связано с историей участка в XVIII–XIX вв., это была Конная площадь, где велась торговля лошадьми и размещалась извозчицья биржа.

*Аллювиальные грунты (a)*: представлены глинистыми грунтами текучепластичной консистенции с содержанием органических веществ (ИГЭ-2) и гравийными грунтами (ИГЭ-3).

ИГЭ-2 – суглинок аллювиальный текучепластичной консистенции с примесью органических веществ – имеет ограниченное распространение, залегает с поверхности, мощность слоя колеблется

от 1,5 до 6,0 м, характеризуется естественной влажностью от 27,9 до 51,0 % при среднем значении 40,7 %, плотность грунта естественного сложения от 1,79 до 2,06 г/см<sup>3</sup>, при среднем значении 1,87 г/см<sup>3</sup>, значение коэффициента пористости в пределах 0,97...1,0, при среднем значении 1,0. Содержание органического вещества от 0,03 до 0,095 д.е. при среднем значении 0,066 д.е., удельное сцепление 14 кПа; угол внутреннего трения 15°; модуль деформации 2,4 МПа. По степени морозной пучинистости грунты относятся к чрезмернопучинистым.

ИГЭ-3. Гравийный грунт аллювиальный водонасыщенный с супесчаным заполнителем, характеризуется естественной влажностью от 23,5 до 33,2 % при среднем значении 27,7 %, содержание фракции менее 2 мм изменяется от 3,7 до 49,9 % при среднем значении 30,6 %, удельное сцепление 3 кПа; угол внутреннего трения 36°; модуль деформации 46 МПа.

*Элювиальные грунты (e)*: представлены тонко- и мелкообломочной зоной выветривания (ИГЭ-4). По ГОСТ 25100–2011 суглинок элювиальный легкий песчаный полутвердой консистенции, имеет повсеместное распространение, пройденная мощность от 3 до 13 м. Характеризуется естественной влажностью от 17,0 до 31,3 % при среднем значении 22,2 %, плотностью грунта естественного сложения от 1,81 до 2,14 г/см<sup>3</sup>, при среднем значении 1,99 г/см<sup>3</sup>, значением коэффициента пористости в пределах 0,50...0,95, при среднем значении 0,63 д.е., удельное сцепление 30 кПа; угол внутреннего трения 23°; модуль деформации 17,6 МПа.

*Скальные грунты*: представлены глинистыми сланцами (ИГЭ-5) малопрочными, сильновыветрелыми, сильнотрещиноватыми, неразмягчаемыми. Они залегают в основании разреза, с поверхности перекрыты значительной мощностью аллювиальных и элювиальных отложений. Плотность грунта естественного сложения изменяется от 2,08 до 2,82 г/см<sup>3</sup>, при среднем значении 2,31 г/см<sup>3</sup>, предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии колеблется от 5,2 до 14,8 МПа, при среднем значении 9,9 МПа, коэффициент выветрелости изменяется от 0,48 до 0,79, при среднем значении 0,69 [6].

#### Лазерное сканирование объекта

Одним из инновационных методов контроля деформаций зданий и сооружений является метод наземного лазерного сканирования. Данный вид съемки является трехмерным отображением реального положения объекта в момент осуществления съемочных работ, что позволяет решать следующие прикладные задачи: определение большинства геометрических характеристик технологических элементов и конструкций (расстояний, размеров, высот, объемов и т. п.); выполнение профилей, разрезов, сечений; различных планов объекта; проведение проектно-изыскательских ра-

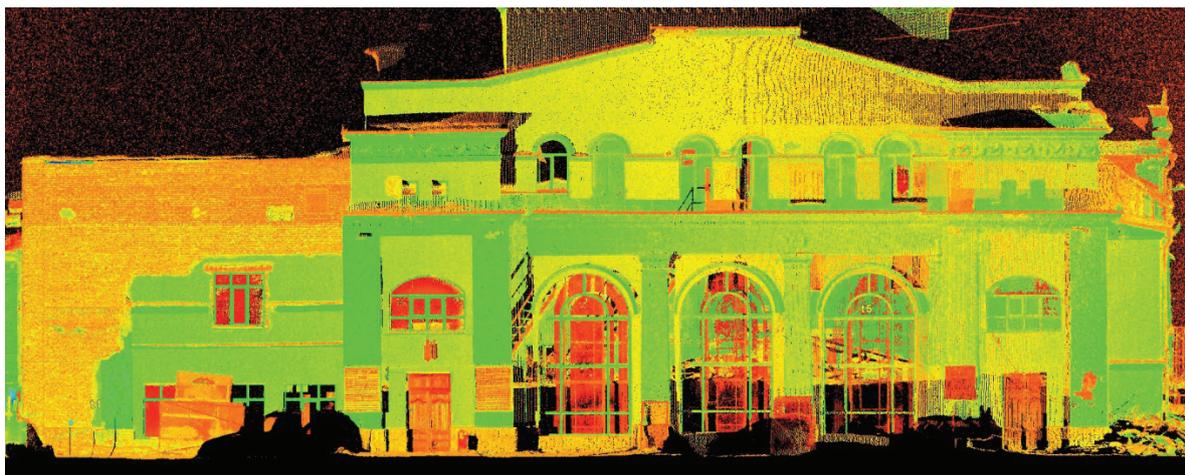


Рис. 5. Исходные данные в виде облака точек

Fig. 5. Original data in the form of a point cloud

бот; мониторинг технологического оборудования и состояния объектов; анализ и прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций [8–16].

«Центром лазерных технологий» ТПУ был проведен комплекс работ по съемке объекта в 2012 и 2017 гг. Целью работы являлось получение массива данных, создание комплекса обмерочных чертежей, фиксация крупных дефектов (трещин, смещений, разрушений, повреждений) несущих и ограждающих конструкций. Наземное лазерное сканирование объекта проводилось Leica Scanstation C10. Данный сканер позволяет снимать до 50 тысяч точек в секунду на расстоянии до 300 м с максимальной погрешностью до 2 мм на 50 м.

Сканирование здания проводилось с семи станций, данные с которых сшивались в единое облако точек в программном комплексе Cyclone. Взаимное перекрытие облаков точек позволило с высокой точностью сшить данные сканирования. Также на каждой точке стояния лазерного сканера проводилась фотофиксация для дальнейшего создания сферических панорам, а также «раскрашивания» облака точек в реальные цвета.

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 («нуле-

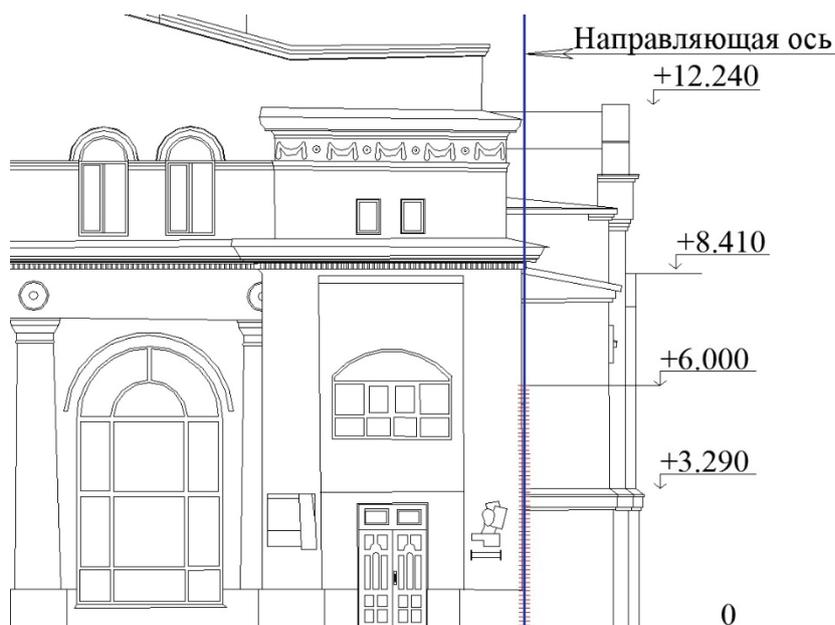


Рис. 6. Направляющая ось и схема точек

Fig. 6. Guide axis and points

вых») 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.

Выполнение деформационного мониторинга сооружения при помощи наземного лазерного скани-

рования 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 ком-

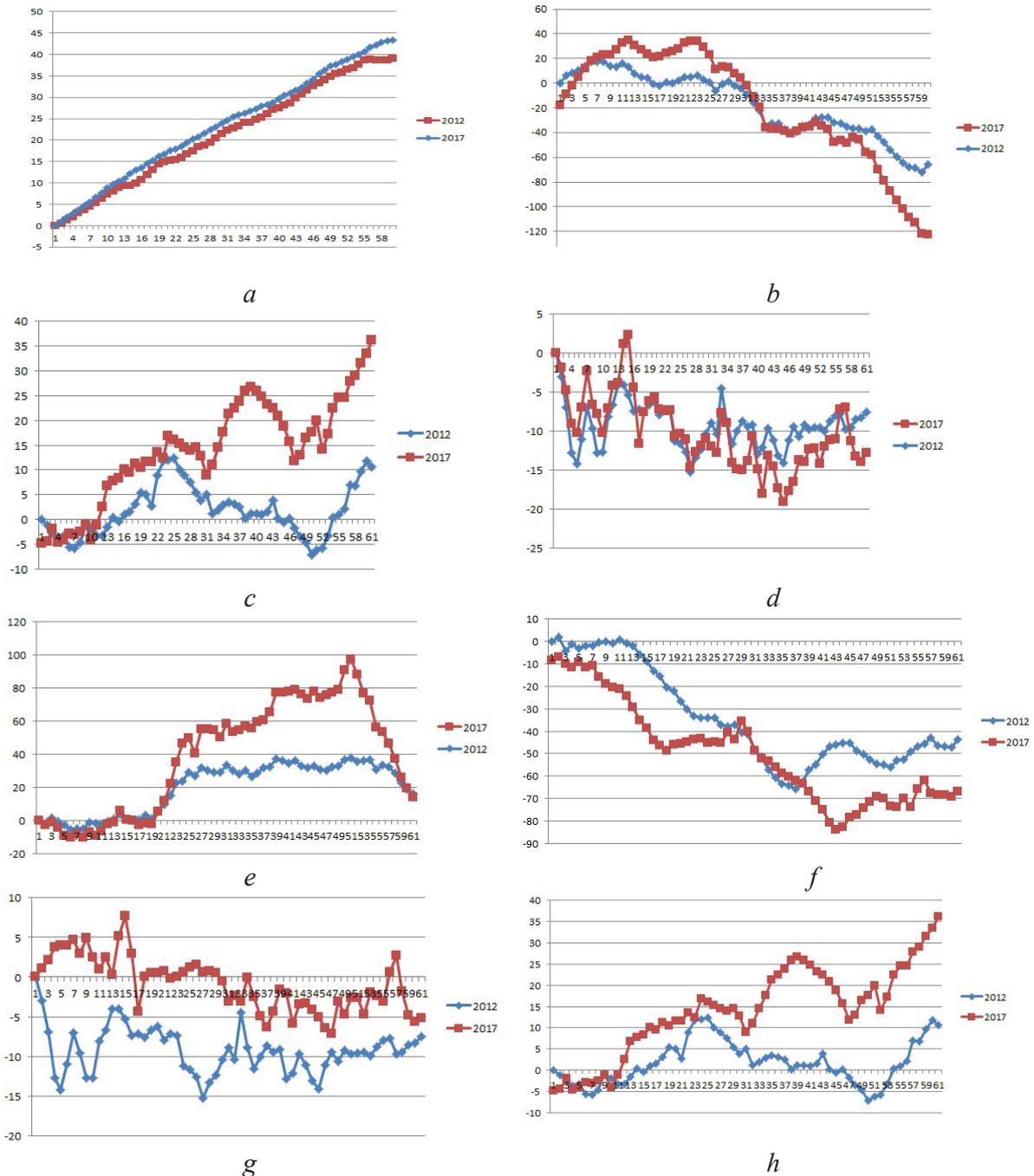


Рис. 7. Отклонения в плане и по вертикали углов: I (a и b); II (c и d); III (e и f); IV (g и h)

Fig. 7. Plan and vertical deviations of the angles: I (a, b); II (c, d); III (e, f); IV (g, h)

плексе Суслоне 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 гг. (Е.А. Епифанова, 2017).

На графиках 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.

На основе трехмерной модели построены обмерочные чертежи здания с нанесением размеров и дефектов конструкций (рис. 9).

С целью оценить вклад грунтовых условий в деформации наземной части конструкции выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов в ноябре 2017 г.

#### Анализ напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов

В данном исследовании использован программный комплекс PLAXIS (2006). PLAXIS – комплекс, разработанный нидерландскими геотехниками R. de Borst, P.A. Vermeer (1984), успешно показал себя при решении многих геотехнических задач [17].

Грунтовой массив (длиной 70 м, мощностью 25 м) представлен в виде 2D – модели на рис. 10. После построения геометрической модели и задания свойств грунта PLAXIS автоматически сгенерирована сетка конечных элементов из 986 неправильных треугольных 15-узловых элементов. При расчете конечного элемента смещения рассчитываются по узлам, напряжения – в 11832 интегральных точках Гаусса (или точках напряжения). Вертикальная нагрузка от веса наземной части здания принята 90 кН/м/м.

Для материала фундаментов использовалась упругая модель (PLAXIS). Были использованы

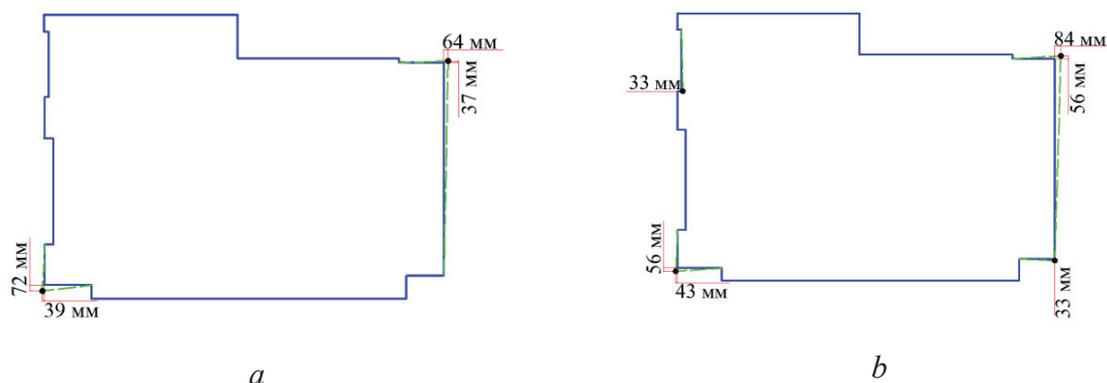


Рис. 8. Отклонения углов здания от вертикали: а) 2012 г., б) 2017 г.

Fig. 8. Deviations of the building angles from the vertical: a) 2012, b) 2017



Рис. 9. Трещины фасадов: главного: а) 2012 г.; б) 2017 г.; северного: с) 2012 г.; д) 2017 г.

Fig. 9. Cracks in the main elevation: a) 2012, b) 2017; and north elevation of the building: c) 2012; d) 2017

следующие параметры: удельный вес –  $25 \text{ кН/м}^3$ , коэффициент Пуассона 0,25. Для оценки поведения минеральных грунтов использована *упруго-пластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model (PLAXIS)* [17]. Модель учитывает несовпадение модуля упругости ветвей разгрузки и повторного нагружения, наблюдаемое при лабораторных испытаниях. Модель точно описывает поведение грунта при его экскавации, при устройстве подпорных стен и проходке туннелей, сопровождающейся уменьшением среднего эффективного напряжения и одновременно мобилизацией сопротивления пород сдвигу. Ограничения модели: неспособность учесть явления анизотропии прочности и жесткости, ползучести и длительной прочности, непригодность для моделирования динамических процессов [18, 19].

Оценка деформаций ползучести органоминерального грунта (встреченного в 1966, 1988 гг. в скважинах 10, 11, 8867 на глубине порядка 3–5 м, не изученного в отношении его физико-механических свойств) проводилась с использованием *Soft Soil Creep Model* [17, 20]. Результаты численного моделирования и лабораторных испытаний [21, 22] показали, что модель *Soft Soil Creep* достаточно точно моделирует процессы фильтрационной и вторичной консолидации.

Здание моделировалось жесткой плитой, опертой на межузловые анкеры. Удельный вес плиты представлял собой нагрузку от целого здания с нормальной жесткостью  $60 \text{ МН/м}$ , изгибной жесткостью  $5 \text{ МНм}^2/\text{м}$ . Данные по материалам фундаментов присвоены межузловым анкерам. Механические свойства анкеров следующие: нормальная жесткость  $20 \text{ МН}$ , максимальные усилия при сжатии/растяжении  $1 \cdot 10^{15} \text{ кН}$ , шаг расстановки анкеров 1 м. При задании начальных условий сге-

нерировано давление воды и начальные напряжения.

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.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Деформации наземной части здания являются неравномерными, поэтому недопустимо связывать их только с уплотнением грунтов основания. Кроме того, деформации продолжаются и после выполнения капитального ремонта здания 2012 г., когда трещины и деформации были спрятаны за косметическим слоем, а 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., свидетельствует 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 изме-

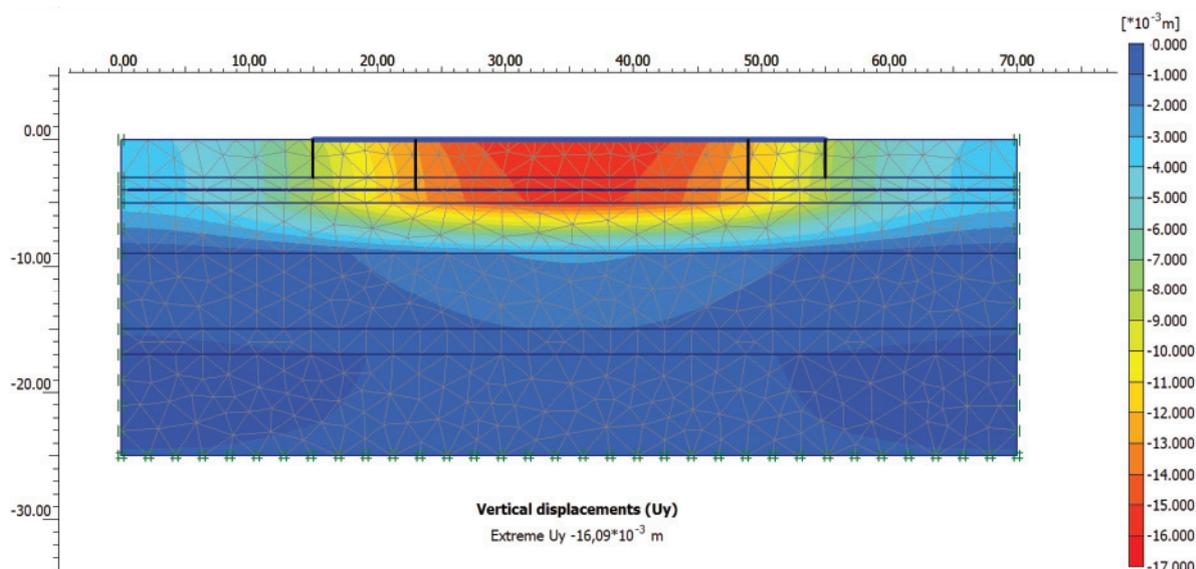


Рис. 10. Сетка конечных элементов

Fig. 10. Finite element mesh

нении 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 органоминеральных 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. Приращение вертикальных и горизонтальных перемещений с учетом ползучести органоминерального грунта составили соответственно +3,38 и +0,17 мм в год.

#### Выводы

Сохранение исторических объектов является сложной задачей для инженеров, т. к. часто отсутствуют исходные данные по геологии, проектным решениям, имеются ограничения при отборе образцов строительных материалов и грунтов для более точного определения их физико-механических свойств. Кроме того, анализ литературы по данной тематике [23–27] показывает, что как в нашей стране, так и за рубежом в настоящее время базис инженерно-геологических исследований исторических объектов только формируется в области теории, методов, нормативно-правового обеспечения этой деятельности.

Представлены две основные темы, имеющие интерес для данного исследования: (1) значимость методов лазерного сканирования для получения правильных данных по деформациям конструкции и (2) влияние геологических факторов на размещение деформаций в наземной части сооружения.

Применение наземных лазерно-сканирующих систем дало возможность произвести тотальную съемку объекта с высокой степенью плотности съемочных точек, построить векторные обмерные чертежи, точно определить деформации наземной конструкции. Совместное рассмотрение геологического разреза и систем трещин, полученных при помощи наземного лазерного сканирования в 2012 и 2017 гг., свидетельствует о том, что наземная конструкция деформируется по диагонали, параллельно направлению бровки первой надпойменной террасы, вдоль реки Томь. Трехмерная модель позволила определить направление максимальных деформаций здания, что затруднительно при обычной съемке объекта.

Разработана цифровая модель грунтового основания. Поведение грунтового массива смоделировано с помощью двух моделей: упругопластической модели с изотропным упрочнением *PLAXIS Hardening Soil* и *Soft Soil Creep Model*. Рассчитаны деформации грунтового основания. Выполнено сравнение результатов моделирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива с пространственно-координатным положением конструкций, установленным при лазерном сканировании. Грубая (при отсутствии характеристик геологического разреза сферы взаимодействия) оценка вклада в деформации грунтовых условий позволила установить, что они составляют треть от наблюдаемых. Концентрация трещин связана с пристройками с западной и восточной сторон здания. Деформации в зоне сочленения разновременных построек максимальны, кроме того, пристройки опираются на фундамент с меньшей глубиной заложения. Продолжающиеся во времени деформации, вероятно, связаны с ползучестью органоминеральных грунтов мощностью до 2 м, вскрытых скважинами в непосредственной близости от здания.

Показано преимущество комплексирования методов по оценке геометрии объекта и МКЭ для описания напряженно-деформированного состояния объекта. Полноценное обследование грунтового основания перед реконструкцией позволило бы избежать развития трещин после капитального ремонта сооружения 2012 г. Результаты указывают на важность рассмотрения триады: наземная конструкция – фундамент – основание, как единой системы. Предложенный подход обнаружения геометрических дефектов при помощи наземного лазерного сканирования и применение полученных данных в расчетной модели может быть использован при реставрации других исторических объектов.

*Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности (средства ВИУ).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкин Е.М. Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры. – СПб.: ПИ «Георекострукция», 2013. – 333 с.
2. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, П.В. Котюков, А.В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 1. – С. 1–47.
3. Ольховатенко В.Е., Лазарев В.М., Филимонова И.С. Геологические проблемы застройки территории г. Томска и мероприятия по её инженерной защите // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 1. – С. 141–150.
4. Бойко В.П. Купечество Западной Сибири в конце XVIII–XIX в. Очерки социальной, отраслевой и ментальной истории: монография / под. ред. В.П. Зиновьева. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. – 308 с.
5. Geotechnical properties of gullying in Tomsk Oblast / A.V. Leonova, K.M. Lomakina, S.A. Dmitrieva, A.V. Baranova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
6. Технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям: «Защита территорий г. Томска на правом берегу р. Томи от коммунального моста до устья р. Ушайки от негативного воздействия вод», в рамках государственной программы «Воспроизводство и использование природных ресурсов Томской области в 2013–2020 годах». – Томск: Томгипротранс, 2015. – Ч. 1. – Т. 2. – 100 с.
7. Строкова Л.А. Инженерно-геологическое районирование территории Томского Приобья по степени устойчивости геологической среды к техногенной нагрузке: дис... канд. наук. – Томск, 1997. – 200 с.
8. 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.
9. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys / D.D. Lichti, J. Franke, W. Cannel, K.D. Wheeler // J. Spat. Sci. – 2005. – V. 50. – № 1. – P. 75–89.
10. Рылский И.А., Малеванная М.С. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. – 2014. – № 8. – С. 38–48.
11. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.
12. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: a case study from the Lake District, England / M. Gallay, Ch.D. Lloyd, J. McKinley, L. Barry // Comput. and Geosci. – 2013. – V. 51. – P. 216–227.
13. Комиссаров А.В., Широкова Т.А., Комиссаров Д.В. Общий подход к изучению погрешностей наземной лазерной съемки, вызванных метрологическими свойствами объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
14. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures / H. Yang, M. Omidalizarandi, X. Xu, I.I. Neumann // Composite Structures. – 2016. – V. 149. – P. 93–105.
15. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring / R. Vežočník, T. Ambrožič, O. Sterle, G. Bilban, N. Pfeifer, B. Stopar // Sensors. – 2009. – № 9. – P. 9873–9895.
16. Применение наземного лазерного сканирования и трехмерного информационного моделирования для неразрушающего контроля / А.Н. Яковлев, Е.В. Токмаков, О.В. Павлов, В.Г. Ли, А.Н. Искрин, Т.Г. Коржнева // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 12. – Ч. 2. – С. 72–75.
17. Plaxis. Material Models Manual. – Delft: TU Delft, 2016. – 216 p.
18. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
19. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.
20. Vermeer P.A., Neher H.P. A soft soil model that account for creep // Beyond 2000 in computational geotechnics. – Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema, 1999. – P. 249–261.
21. Офрихтер В.Г., Офрихтер Я.В. Прогноз напряженно-деформированного состояния твердых бытовых отходов с использованием модели слабого грунта // Вестник МГСУ. – 2014. – № 9. – С. 82–92.
22. Васенин В.А., Астафьева Е.Д. Учет реологических свойств грунтов при расчете осадок зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2012. – № 1. – С. 1–21.
23. Lichti D.D. A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2008. – V. 63 (2). – P. 169–180.
24. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanning-based updating of a finite element model for structural health monitoring // IEEE Sensor. – 2016. – V. 7. – P. 2100–2104.
25. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings / G. Vacca, F. Mistretta, F. Stochino, A. Dessi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2016. – V. 41. – Iss. B5. – P. 453–460.
26. Sternberg H. Deformation measurements at historical buildings with terrestrial laserscanners // IAPRS. – Dresden 25–27 September 2006. – V. 36. – P. 5. – P. 303–308.
27. Yardim Y., Mustafaraj E. Effects of soil settlement and deformed geometry on a historical structure // Natural hazards and Earth System Sciences. – 2015. – V. 15. – P. 1051–1059.

Поступила 18.12.2017 г.

## Информация об авторах

**Епифанова Е.А.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Строкова Л.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

## EVALUATION OF DEFORMATION OF THE HISTORIC BUILDING IN TOMSK BY THE INTEGRATED APPROACH BASED ON TERRESTRIAL LASER SCANNER AND FINITE ELEMENT MODELING

Ekaterina A. Epifanova<sup>1</sup>,

epifanovaea@tpu.ru

Lyudmila A. Strokovaya<sup>1</sup>,

sla@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*The topic is relevant due to the necessity to improve approaches to estimation and prediction of deformations of historical constructions. The article deals with the study of engineering-geological conditions of the area during reconstruction of the building. It is necessary to introduce new technologies, such as laser scanning technology for construction of an accurate three-dimensional model of the object, finite element method for prediction of soil behaviour.*

**This study aims** to assess the effects of soil settlement on a structure's stress-strain state and the value of laser scanning techniques on structure analysis in obtaining correct data of deformation.

**Object.** The interaction of soil, foundations and structure of the Tomsk Youth Theatre or «Teatr Yunogo zritelya» is considered in conditions of dense development on the territory of Tomsk city.

**Methods.** The initial data for simulation the behaviour of the soil massif were obtained through regional geological works and field study in different years. A reconnaissance survey of the site was completed. A program complex based on finite element model was used to forecast the stress-strain state of soils. Laser scanning technology allow an accurate definition of deformations lying on every side of the structure and make an accurate three-dimensional model of the object. The terrestrial laser scanning objects held by 3D laser scanner Leica Scanstation C10; horizontal, vertical justification and binding study points to a local coordinate system using Total Station LEICA TS15 and GNSS receiver LEICA GS10; handling an cloud of points held in the software package Leica Cyclone 8.0; three-dimensional object modeling was carried out in the software package SolidWorks.

**The results.** The authors have estimated the engineering geological conditions of a research site and developed a digital design model. The forecast of stress-strain state of the soils in reconstruction of the building is made. The soil profile and general crack formation together with terrestrial laser scanning measurement indicate that the structure is deformed diagonally along the river Tom. The concentration of cracks is associated with the western and eastern annexes to the building, which are supported by strip foundations lying at lower depth than the main building. The continued deformations are probably associated with creep of soft organic soils with a thickness of up to two meters.

### Key words:

Soil, terrestrial laser scanning (TLS), modeling, deformation, mechanical behavior, stress-strain state, finite element model (FEM), cultural heritage.

*The research was carried out within the Competitiveness enhancement Program at National Research Tomsk Polytechnic University (VIU fund).*

### REFERENCES

1. Pashkin E.M. *Inzhenerno-geologicheskaya diagnostika deformatsiy pamyatnikov arkhitektury* [Engineering-geological diagnostics of deformations of architectural monuments]. St-Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2013. 333 p.
2. Dashko R.E., Aleksandrova O.Yu., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. Features of engineering-geological conditions of Saint-Petersburg city. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo*, 2011, vol. 1, pp. 1–47. In Rus.
3. Olkhovatenko V.E., Lazarev V.M., Filimonova I.S. Geoenvironmental problems of building on Tomsk territory and actions for its engineering protection. *Vestnik of TSUAB*, 2012, no. 1, pp. 141–150. In Rus.
4. Boyko V.P. *Kupechestvo Zapadnoy Sibiri v kontse XVIII–XIX v. Ocherki sotsialnoy, otraslevoyy i mentalnoy istorii* [Merchants of Western Siberia in the late XVIII–XIX century: essays on the social, industrial and mental history]. Tomsk, Tomsk State Architectural Building University Publ. house, 2009. 308 p.
5. Leonova A.V., Lomakina K.M., Dmitrieva S.A., Baranova A.V. Geotechnical properties of gullyng in Tomsk Oblast. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
6. *Tekhnicheskyy otchet po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam: Zashchita territoriy g. Tomsk na pravom beregu r. Tomi ot kommunalnogo mosta do ustya r. Ushayki ot negativnogo vozdeystviya vod, v ramkakh gosudarstvennoy programmy «Vosproizvodstvo i ispolzovanie prirodnnykh resursov Tomskoy oblasti v 2013–2020 godakh»* [Technical report on engineering-geological surveys: Protection of the territories of Tomsk on the right bank of the river Tom from the municipal bridge to the mouth of the river Ushayka from adverse impact of waters, in the framework of the state program «Reproduction and use of natural resources of Tomsk region in 2013–2020 years»]. Tomsk, Tomgiprotrans Publ., 2015. Vol. 1, B. 2, 100 p.
7. Strokovaya L.A. *Inzhenerno-geologicheskoe rayonirovanie territorii Tomskogo Priobya po stepeni ustoychivosti geologicheskoy sredy k tekhnogennoy nagruzke*. Dis. Kand. nauk [Engineering-geological zoning of territory of the Tomsk Ob region on the degree of stability of the geological environment to anthropogenic load. Cand. Diss.]. Tomsk, 1997. 200 p.
8. Strokovaya L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.

9. Lichti D.D., Franke J., Cannel W., Wheeler K.D. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys. *J. Spat. Sci.*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 75–89.
10. Rylsky I.A., Malevannaya M.S. Nazemnye lazernye metody – novye podkhody k informatsionnomu obespecheniyu geograficheskikh issledovaniy [Terrestrial laser methods – new approaches to information support of geographical research]. *Geodeziya i kartografiya*, 2014, vol. 8, pp. 38–48.
11. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, vol. 33, 6 p.
12. Gallay M., Lloyd Ch.D., McKinley J., Barry L. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: A case study from the Lake District, England. *Comput. and Geosci.*, 2013, vol. 51, pp. 216–227.
13. Komissarov A.V., Shirokova T.A., Komissarov D.V. General approach to the study of errors of terrestrial laser shooting caused by metrological properties of objects. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 2013, no. 1, pp. 36–42. In Rus.
14. Yang H., Omidiazarandi M., Xu X., Neumann I.I. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures. *Composite Structures*, 2016, vol. 149, pp. 93–105.
15. Vežočník R., Ambrožič T., Sterle O., Bilban G., Pfeifer N., Stopar B. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors*, 2009, no. 9, pp. 9873–9895.
16. Yakovlev A.N., Tokmakov E.V., Pavlov O.V., Li V.G., Iskrin A.N., Korzhneva T.G. Application of terrestrial laser scanning and three-dimensional information modeling for non-destructive testing. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 12 (2), pp. 72–75. In Rus.
17. *Plaxis. Material Models Manual*. Delft, TU Delft, 2016. 216 p.
18. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
19. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 6 p.
20. Vermeer P.A., Neher H.P. A soft soil model that account for creep. *Beyond 2000 in computational geotechnics*. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema, 1999. pp. 249–261.
21. Ofrikhter V.G., Ofrikhter Ya.V. Prediction of stress-strain state of municipal solid waste with application of soft soil creep model. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2014, no. 9, pp. 82–92. In Rus.
22. Vasenin V.A., Astafyeva E.D. Accounting rheological properties of soils in calculation of building sediment. *J. Construction of Unique Buildings and Structures*, 2012, no. 1, pp. 1–21. In Rus.
23. Lichti D.D. A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, vol. 63, no. 2, 169–180.
24. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanning-based updating of a finite element model for structural health monitoring. *IEEE Sensor*, 2016, no. 7, pp. 2100–2104.
25. Vacca G., Mistretta F., Stochino, F., Dessi A. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, vol. 41, Iss. B5, pp. 453–460.
26. Sternberg H. Deformation measurements at historical buildings with terrestrial laserscanners. *IAPRS. Dresden 25–27 September 2006*, Vol. 36, P. 5, pp. 303–308.
27. Yardim Y., Mustafaraj E. Effects of soil settlement and deformed geometry on a historical structure. *Natural hazards and Earth System Sciences*, 2015, vol. 15, pp. 1051–1059.

*Received: 18 December 2017.*

#### Information about the authors

**Ekaterina A. Epifanova**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Lyudmila A. Strokova**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.