ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге

Е.М.Волохов[1], **В.К.Кожухарова**[1]✉, **С.Н.Зеленцов**[1], **Д.З.Мукминова**[1], **А.А.Исаев**[2]

[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *СПб ГКУ «Дирекция транспортного строительства», Санкт-Петербург, Россия*

Как цитировать эту статью: Волохов Е.М., Кожухарова В.К., Зеленцов С.Н., Мукминова Д.З., Исаев А.А. Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 16-29. EDN SCXHFA

Аннотация

В сложившейся маркшейдерской практике при оценке вредного влияния подземного строительства на земную поверхность и подрабатываемые объекты традиционно рассматривают геотехническую систему подземное сооружение – породный массив, которая не включает в себя саму наземную инфраструктуру. Такой подход может приводить к искаженным оценкам уровней нагрузок, воздействий и потенциальных деформаций как для зданий, так и для земной поверхности. С целью определения влияния здания и оценки взаимодействия элементов геотехнической системы тоннель – массив – здание в исследовании рассматривается анализ подработки здания исторической сцены Мариинского театра комплексом выработок станции Санкт-Петербургского метрополитена «Театральная». Применяется численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе PLAXIS 3D, геотехническая модель калибруется в соответствии с данными натурных маркшейдерско-геодезических измерений. На моделях показано, что при подработке зданий их неоднородная структура, вес и пространственная жесткость существенно влияют на распределение деформаций в основании сооружения, что подтверждается локализацией трещин в несущих конструкциях, возникших после начала ведения горных работ. При оценке и прогнозе деформаций численными методами не всегда достаточно моделировать систему массив – тоннель, так как это может привести к завышенным прогнозным значениям деформаций земной поверхности, заниженным значениям оседаний и некорректной оценке вредного влияния на подрабатываемый объект. Сделан вывод, что только комплексный подход с использованием моделирования, натурных измерений и данных обследований способен обеспечить правильный анализ взаимодействия породного массива, подземных сооружений и наземных объектов инфраструктуры сложной пространственной геометрии и позволить надежно оценить вредное влияние на подрабатываемый объект с привязкой к конструктивным повреждениям. Это способствует принятию адекватных и своевременных мер охраны для зданий и сооружений.

Ключевые слова

охрана зданий и сооружений; подземное строительство; мульда сдвижения; осадки зданий; существующая застройка; сдвижение земной поверхности; повреждение зданий и сооружений; критерии повреждения зданий; PLAXIS 3D; Мариинский театр

Поступила: 12.03.2024 ***Принята: 07.11.2024*** ***Онлайн: 03.09.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

Введение

Охрана зданий и сооружений при подземном строительстве в условиях мегаполиса требует комплексного подхода, особенно когда это касается исторических центров городов. Мероприятия по защите сооружений исторической застройки требуют специального маркшейдерско-геодезического обеспечения [1, 2]. Маркшейдерско-геодезический мониторинг позволяет улучшить контроль за деформациями земной поверхности и подрабатываемых объектов [3, 4]. Чтобы воспроизвести всю картину деформирования грунтового массива и наземной инфраструктуры с учетом важных геотехнических факторов необходимо использовать методы физического и численного моделирования [5, 6]. Для оценки возможных повреждений зданий и сооружений современные численные 3D-модели должны включать не только геометрию подземного сооружения, этапность ведения горных работ и геологическое строение породного массива, но и учитывать нелинейное

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

поведение грунтов и наличие здания на земной поверхности. Такие модели позволяют рассматривать задачу оценки потенциального повреждения зданий в результате подработки комплексно в виде системы тоннель – грунт – здание [7] или тоннель – массив – здание. Условно эти модели можно назвать сопряженными.

Сопряженные модели необходимы для анализа взаимодействия подрабатываемой земной поверхности и здания, при строительстве подземных сооружений, а также при подземной разработке месторождений [8, 9]. Если рассматривать задачу с позиции оценки повреждений подрабатываемой конструкции, то необходимо применять различные структурные модели, учитывающие нелинейное поведение каменной кладки, бетона и других материалов, которыми представлены основные несущие элементы здания [10, 11]. В случае, когда целью является определение деформаций земной поверхности в основании здания, часто в качестве подрабатываемой конструкции используют эквивалентное тело с равномерно распределенной нагрузкой [12, 13], но такой подход не может учесть неравномерность нагрузки от несущих конструкций. Существуют исследования, в которых представлены подробные модели как грунтового массива, так и наземного сооружения [14, 15], но такие исследования все еще не распространены из-за связанных с ними сложностей описания свойств неоднородных конструкций и взаимодействия на контактах сред, а также высоких электронно-вычислительных затрат [15]. Поэтому при решении таких задач необходимо соблюдать баланс между сложностью модели и достоверностью результатов моделирования.

В данной работе была рассмотрена сопряженная расчетная схема для модели породного массива, подземного комплекса выработок станции метро «Театральная» и подрабатываемого здания исторической сцены Мариинского театра в Санкт-Петербурге. Подобный анализ позволяет определить, как наличие здания влияет на развитие деформаций земной поверхности. Данное исследование призвано приблизить решение проблемы взаимодействия породного массива (грунта основания) и здания при его подработке, поможет обосновать использование сопряженных моделей при подземном строительстве, в целях контроля сдвижений и деформаций земной поверхности в основании зданий во время ведения горных работ.

Объект исследования

Строительство станции метро «Театральная» в историческом центре Санкт-Петербурга. Лахтинско-Правобережная линия метро является самым коротким и незагруженным транспортным маршрутом Санкт-Перербурга. В 2016 г. для повышения транспортной доступности к центральной части Василеостровского и Адмиралтейского районов было начато строительство нового участка Лахтинско-Правобережной линии за станцией «Спасская». Организовано строительство двух новых станций глубокого заложения – «Театральная» (объект данного исследования) и «Горный институт» (открыта 27 декабря 2024 г.) [16]. В пусковой участок длиной 3,65 км, помимо двух станций, входят четыре вентиляционных шахты, комплекс перегонных и вспомогательных выработок.

Значительная часть центра Адмиралтейского района представлена объектами исторической застройки [17], поэтому при сооружении станции метро «Театральная» в зону влияния строительства комплекса подземных выработок попало множество зданий и сооружений, включая и объекты культурного наследия. Историческая сцена Мариинского театра имеет статус объекта культурного наследия федерального значения. Здание театра находится в непосредственной близости от горных выработок станции, вследствие чего вредное влияние, оказанное на него подземным строительством, было весьма существенным по сравнению с другими объектами, попавшими в зону подработки.

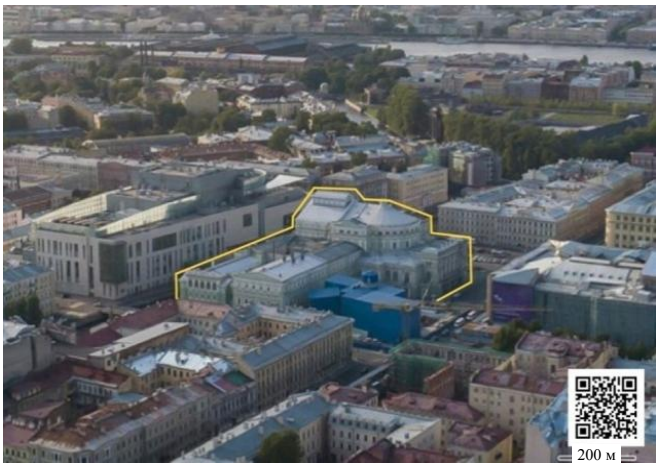
Здание Государственного академического театра (рис.1, *а*) построено в 1860 г. по проекту архитектора А.К.Кавоса на месте конного театра-цирка, сгоревшего в 1849 г. [18]. В последующие годы XIX в. здание театра неоднократно достраивалось и реконструировалось под руководством архитекторов В.А.Шретера и Н.Л.Бенуа [19]. В 1968-1970 гг. к исторической части театра была построена балетная пристройка, выполнена реконструкция сцены и смонтирована новая вентиляция.

С геометрической точки зрения здание исторической сцены Мариинского театра представляет собой сложную строительную конструкцию, развитую в плане, в которой можно условно выделить три основных блока – два пятиэтажных флигеля (северный и южный) и центральное девятиэтажное здание со сценической и зрительной частью. Конструктивные схемы блоков различны

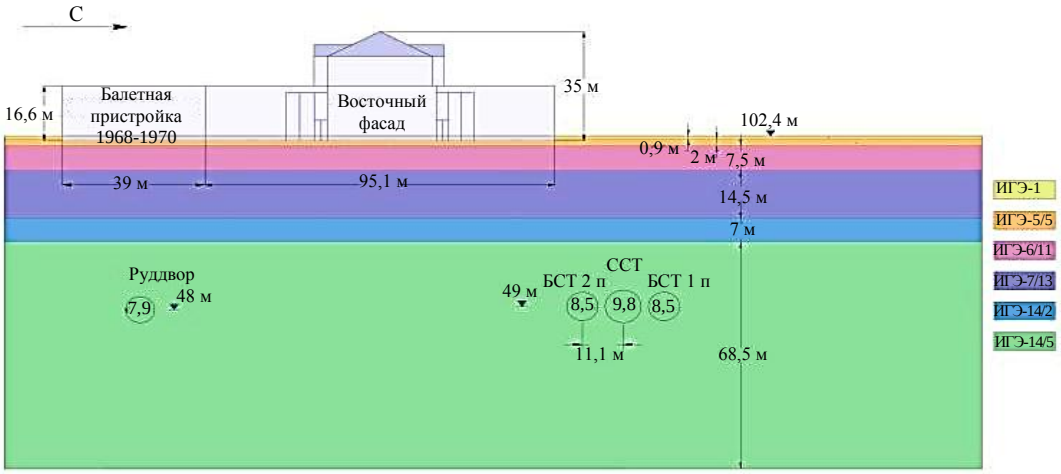
Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Е.М.Волохов, В.К.Кожухарова, С.Н.Зеленцов, Д.З.Мукминова, А.А.Исаев, 2025

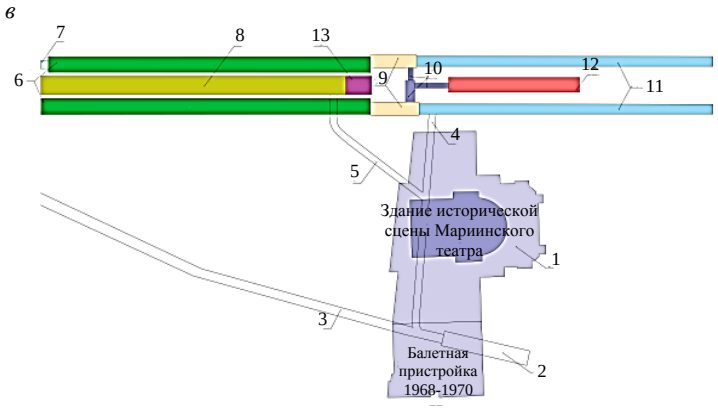
а



б



в



г

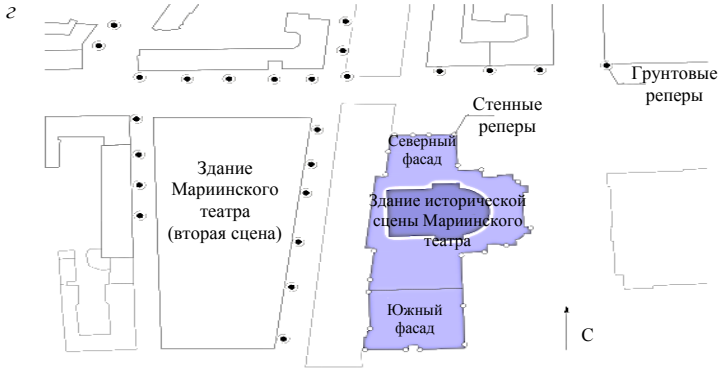


Рис.1. Участок строительства станционного комплекса «Театральная»:
а – вид на Новую сцену и историческое здание Мариинского театра (Yandex Maps);
б – геологическое строение района строительства станции метро «Театральная»;
в – расположение выработок относительно здания исторической сцены Мариинского театра;
г – схема расположения наблюдательной станции вблизи театра

1 – здание театра; 2 – руддвор; 3 – венттоннель НВУ (нижний вентиляционный узел); 4 – подходная выработка № 1; 5 – подходная выработка № 2; 6 – боковые станционные тоннели 1-го и 2-го путей; 7 – пилот-тоннель бокового станционного тоннеля 1-го пути; 8 – средний станционный тоннель; 9 – камеры сдвижки 1-го и 2-го путей; 10 – людские и кабельные ходки; 11 – перегонные тоннели 1-го и 2-го путей; 12 – тягово-понизительная подстанция (ТПП); 13 – натяжная камера

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и несимметричны, а их пространственная жесткость и устойчивость обеспечиваются за счет системы продольных и поперечных стен, а также деревянных и бетонных перекрытий. Каменная кладка стен, построенных до XX в., выполнена из красного глиняного полнотелого кирпича на известковом растворе, новые стены послевоенной постройки – на цементном растворе. Толщина стен варьируется от 530 до 1150 мм. Фундаменты имеют ленточную конструкцию и выполнены из отесанных блоков известняка, в основании – деревянные лежни, высота фундамента меняется от 1,35 до 1,70 м. Постоянные перестройки и реконструкции театра привели к тому, что здание имеет сложную и нерегулярную внутреннюю структуру и геометрию.

В статье основное внимание уделяется анализу деформаций в центральной и северной частях здания, так как именно они получили наибольшие деформации в процессе ведения горных работ при строительстве станции «Театральная».

Геологическое строение участка строительства и взаимное положение выработок и здания исторической сцены Мариинского театра. Строительство станции метро «Театральная» осуществляется на глубине около 50 м, в толще верхнекотлинских протерозойских глин, характеризующихся высокой степенью литификации [20]. Расстояние от верхнего свода станционного тоннеля до контакта протерозойских глин (ИГЭ-14/5) с дислоцированными плотными глинами составляет примерно 12-13 м. Мощность дислоцированных глин около 7 м (ИГЭ-14/2). Мощность четвертичных отложений примерно 25 м. Снизу вверх четвертичные отложения представлены суглинками с гравием и включениями коренной глины полутвердой консистенции (ИГЭ-7/13) мощностью 14,5 м, суглинками слоистыми текучепластичной консистенции (ИГЭ-6/11) – 7,5 м, водоносными мелкими песками с растительными остатками (ИГЭ-5/5) – 2 м, насыпным слоем из песков и супесей с растительными остатками и строительным мусором (ИГЭ-1) – 0,9 м (рис.1, *б*).

На рис.1, *в* представлена схема основных выработок подземного комплекса станции «Театральная», влияние которых на земную поверхность и здание театра 1 было самым ощутимым. Строительство станции «Театральная» было начато с сооружения вертикального ствола, руддвора 2 и венттоннеля НВУ 3 диаметрами 7,9 и 5,63 м, затем были пройдены подходные выработки 4 и 5. Практически все вспомогательные выработки пройдены непосредственно под зданием театра, что определило первичные условия развития оседаний стен и реперов, заложенных в цоколе здания на южной и западной стороне. Кроме того, на степень подработки и уровень повреждения театра повлияли сооружения, находящиеся вблизи Театральной площади, – камеры сдвижки 9 диаметром 7,9 м, камера ТПП 12, перегонные тоннели 1-го и 2-го путей 11 и другие вспомогательные выработки.

В построенный комплекс станционных выработок входят средний станционный тоннель (ССТ) диаметром 9,8 м, два боковых станционных тоннеля диаметром 8,5 м (БСТ 1-го пути и БСТ 2-го пути) и крупная натяжная камера, являющаяся продолжением ССТ. За счет большого сечения выработок и близкого расположения друг к другу их проходка в зоне восточного торца станции должна была оказывать существенное влияние на земную поверхность и повышать уровень повреждений здания театра.

На сегодняшний день строительство подземного комплекса станции метро «Театральная» завершено, его влияние на земную поверхность оценено, существенного прироста деформаций в дальнейшем не ожидается. Расчетная оценка деформаций и влияния подработки ранее осуществлялась без учета самих подрабатываемых зданий. Поэтому целесообразно оценить влияние таких крупных строений, как здание исторической сцены, на развитие деформаций земной поверхности и самих зданий при ведении горных работ под ними. Это должно расширить представления о механизмах работы системы тоннель – массив – здание, когда необходимо оценить большой вес здания, неравномерность его распределения по поверхности и неоднородную жесткость основных несущих элементов.

Материалы и методы

Система мониторинга вблизи здания Мариинского театра. При анализе деформирования здания Мариинского театра были использованы данные, полученные при маркшейдерско-геодезическом мониторинге грунтовых и стенных реперов наблюдательной станции. Часть наблюдательной станции, с помощью которой контролировался процесс сдвижения и деформирования здания театра, включает в себя 23 стенных репера. Стенные реперы расположены по периметру здания и заложены на уровне фундамента, грунтовые реперы расположены на значительном

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

расстоянии от Мариинского театра вблизи других зданий, что впоследствии не позволило по натурным данным корректно оценить сдвижения и деформации земной поверхности под зданием театра (рис.1, *г*). Измерения производились методами геометрического нивелирования II-III класса.

Численный анализ. Для выполнения анализа взаимодействия земной поверхности и здания Мариинского театра, определения влияния здания на процессы деформирования основания были построены численные модели в программном комплексе PLAXIS 3D, который позволяет моделировать поэтапный процесс строительства подземного комплекса выработок и последовательное деформирование массива с наземной инфраструктурой. Уровень детализации конечно-элементных моделей был снижен до учета основных конструктивных элементов: совокупности колец обделки для тоннеля и основных стен, перекрытий и элементов фундамента для здания.

При моделировании породного массива предполагалось, что слои пород (грунтов) залегают горизонтально, а их мощность выдержана по площади. Наличие грунтовых вод при моделировании участка строительства не учитывалось из-за низкого влияния гидродинамических процессов во вмещающих глинистых породах и ограниченности инженерно-геологических данных.

Обосновано использование модели упрочняющегося грунта Hardening Soil как более точно описывающей поведение протерозойских глин Санкт-Петербурга [21, 22]. Для задания упрочняющейся модели, помимо общеизвестных параметров, характеризующих прочностные свойства (сцепление *c*), угол внутреннего трения φ, угол дилатансии ψ, использовалось описание жесткости грунта через три модуля деформации: E_{50} – секущий модуль деформации при напряжении, половина от разрушающего, E_{ur} – модуль деформации при разгрузке/повторном нагружении, E_{oed} – одометрический модуль деформации (из компрессионных испытаний), а также коэффициент Пуассона ν [21].

Особенностью применяемой модели грунта является наличие гиперболической зависимости между продольными деформациями ε_1 и девиатором напряжений *q* [23]. Физико-механические свойства четвертичных грунтов и протерозойских глин, которые были использованы для численного моделирования, представлены в табл.1.

Таблица 1

Параметры инженерно-геологических элементов

Слой ИГЭ	γ_{sat}, кН/м^3	*m*, м	E_{50}, МПа	E_{oed}, МПа	E_{ur}, МПа	*c*, кПа	φ, град	ψ, град	ν
1	20	0,9	10	10	30	5	10	0	0,3
5/5	19,5	2	15	15	45	1	32	0	0,36
6/11	19,2	7,5	7,5	7,5	22,5	16	15	0	0,35
7/13	21	14,5	16	16	48	38	23	0	0,35
14/1	21,5	7	50	50	150	50	21	0	0,35
14/2	21,8	68,5	100	100	300	130	23	0	0,35

Процесс строительства комплекса подземных выработок был поэтапно смоделирован с учетом фактического продвижения фронта горных работ. Крепь выработки моделировалась с помощью двумерных элементов (оболочек) с линейно-упругими свойствами, имитирующих поведение тюбинговой обделки. Эквивалентная толщина этих элементов задавалась в зависимости от типа и параметров обделки. Наличие пригруза забоя и временной крепи в призабойной части при моделировании не учитывались. Для моделирования поведения массива в приконтурной зоне подземного сооружения применялся режим заданных смещений контура выработки (surface contraction), параметры калибровались по данным натурных наблюдений на участках с установившимся режимом деформаций.

В расчетах приняты механические характеристики материалов обделок подземных сооружений (табл.2). Монолитные обделки подземных сооружений выполняются из бетона класса по прочности на сжатие В15, армированного металлическими арками, сборная обделка подземных сооружений метрополитена – из бетона класса по прочности на сжатие В40.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Параметры бетона для упругой модели

Параметр модели	Величина параметра модели	
	B15	B40
Коэффициент Пуассона ν	0,2	0,2
Модуль общих деформаций E_{ref} , МПа	4130	9479
Объемный вес γ, кН/м^3	25	25
Толщина, м	0,35	0,35

Для моделирования здания при определении взаимодействия системы тоннель – массив – здание можно использовать два подхода: упрощенный, с созданием эквивалентного объемного/плоского элемента и приложенной распределенной нагрузкой, имитирующей вес здания [24, 25], или детальный, с построением конструктивной модели основных элементов здания [26, 27]. В последнем случае фундамент и надстройка моделируются с высокой геометрической точностью. Моделирование влияния здания по упрощенной схеме не учитывает существенную неравномерность распределения нагрузки от несущих конструкций на основание и неоднородную конструктивную жесткость здания, а повышение сложности модели и трудоемкости расчетов не критичны, поэтому был реализован второй подход. Здание Мариинского театра моделировалось без пристройки 1970 г., поскольку максимальные деформации и повреждения получила основная (старая) часть строения 1860 г., которую и требовалось изучить. Выработки подземного комплекса, сильно удаленные от места анализа (старой части строения), для упрощения были исключены из модели.

При моделировании внешних и внутренних стен, а также перекрытий здания были использованы двухмерные плоские элементы с линейно-упругими свойствами. Из-за особенностей совместной механической работы грунтов основания и фундамента для фундамента было обосновано использование объемных элементов. Отсутствие необходимости детального изучения механизма работы бутового фундамента, демпфирующего действия лежней и других факторов в исследовании макроэффектов от работы здания при его подработке позволили обосновать применение для такого фундамента линейно-упругой модели.

Параметры физико-механических свойств элементов конструкции здания Мариинского театра, установленные в соответствии с данными полевых измерений прочности каменной кладки в основных несущих элементах и требованиями СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции», представлены в табл.3.

Таблица 3

Параметры элементов модели здания театра

Параметр модели	Величина параметра упругой модели			
	Внешние стены	Внутренние стены	Перекрытия	Фундамент
Коэффициент Пуассона ν	0,15	0,15	0,2	0,2
Модуль общих деформаций E_{ref}, МПа	1480	1480	1500	1700
Объемный вес γ, кН/м^3	18,5	18,5	19,0	20,0
Толщина, м	0,8	0,8	0,4	1,4

Граничные условия в модели стандартны – по вертикальным границам запрещены горизонтальные смещения, нижняя граница модели закреплена в любом направлении. Расчетная схема модели представлена на рис.2.

Модель позволяла рассматривать постадийную схему проходки выработок подземного комплекса и влияния на подрабатываемы объекты. Обеспечение общей количественной достоверности сдвижений и деформаций на поверхности

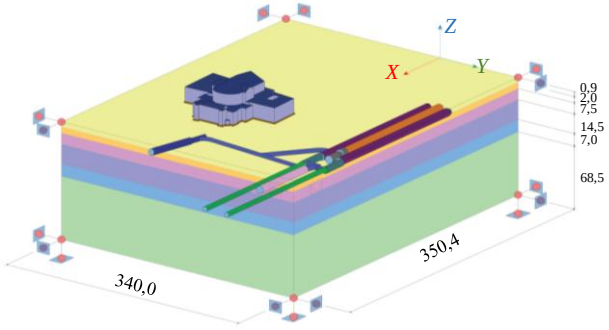


Рис.2. Расчетная схема сопряженной модели

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

обеспечивалось верификацией на базе реальных данных по оседаниям в районе строительства и калибровкой численных моделей через параметр surface contraction условной потери объема при проходке выработок. Детализация механизмов изменения НДС пород при цикличной эректорной проходке станционных тоннелей не рассматривалась (в соответствии с принципом Сен-Венана) из-за большого расстояния от забоев выработок до фундамента здания.

Оценка работы системы тоннель – массив – здание с помощью численного моделирования осуществлялась через сравнительный анализ деформаций и сдвижений земной поверхности при наличии и при отсутствии здания в модели, расчеты рассмотрены на этап завершения строительства подземного комплекса выработок.

Обсуждение результатов

Анализ сдвижений земной поверхности в зоне подработки. Для анализа сдвижений и деформаций земной поверхности были использованы данные оседаний грунтовых реперов в продольных и поперечных профилях мульды сдвижения (рис.3) на момент завершения строительства основных выработок станционного комплекса. На графике (рис.3, *а*, *б*) значению $X = 0$ соответствует положение оси среднего станционного тоннеля (оси станции). На рис.3, *в* изображен продольный профиль мульды, значению $X = 0$ соответствует начальному пикету станционного комплекса. Соответствие численного моделирования натурным данным (разница между натурными данными и численным моделированием не более 15 %) можно видеть в левой части мульды сдвижения со стороны здания Мариинского театра, здесь отклонения в оседаниях связаны, главным образом, с влиянием зданий. В то же время можно наблюдать существенные отклонения по оседаниям грунтовых реперов в правой части мульды. Это обусловлено тем, что для некоторых зданий над станционным комплексом (на противоположной стороне от театра) проектом было предусмотрено компенсационное нагнетание в грунтовый массив под здания по манжетной технологии (рис.3, *в*). При моделировании станционного комплекса нагнетание под сооружения, попавшие в зону подработки, не учитывалось.

Анализ взаимодействия земной поверхности и подрабатываемого здания. Анализ влияния здания включал сравнение результатов расчета аналогичных моделей со зданием и без него. На рис.4 *а*, *б* показаны сдвижения поверхности и смещения реперов в цоколе Мариинского театра, которые были вызваны строительством выработок станционного комплекса на момент окончания строительства основных тоннелей. Представленные профили оседаний фундамента и земной поверхности в месте расположения фундамента, полученные с помощью численного моделирования, соответствуют двум вариантам расчета – со зданием и без здания. По графикам можно видеть, что профиль оседания фундамента (модель со зданием) получается более сглаженным в сравнении с профилем оседаний земной поверхности (модель без здания) за счет влияния жесткости комплекса

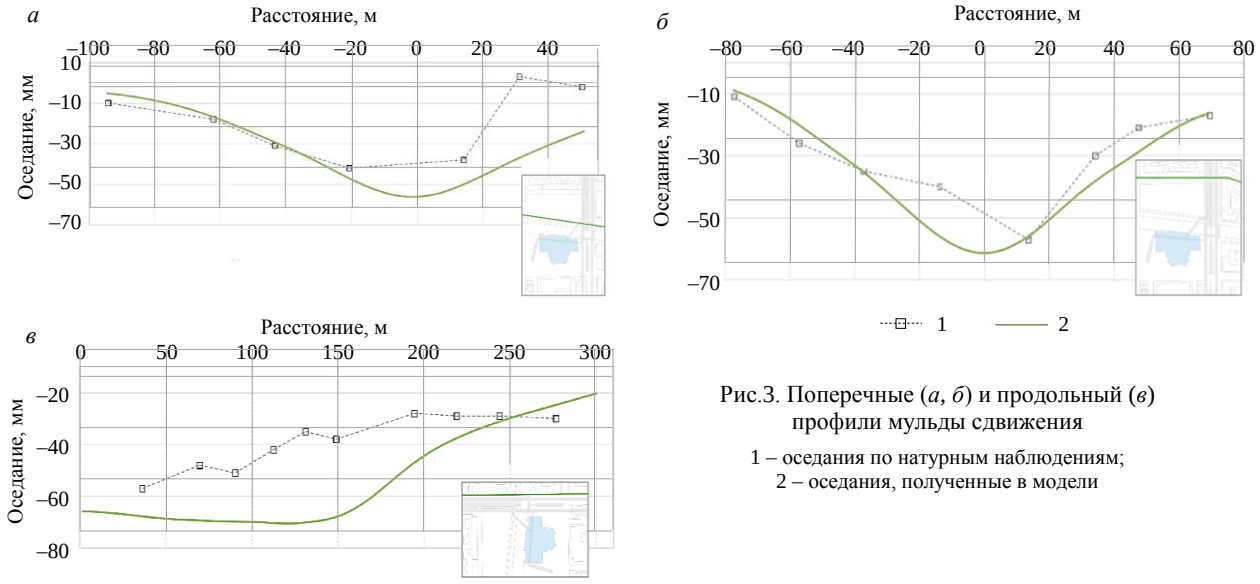


Рис.3. Поперечные (*а*, *б*) и продольный (*в*) профили мульды сдвижения

1 – оседания по натурным наблюдениям;
2 – оседания, полученные в модели

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

несущих элементов здания и точнее описывает оседания в цоколе театра. Можно отметить ощутимое увеличение максимальных оседаний, что очевидно определяется влиянием веса здания.

Аналогичную ситуацию можно наблюдать на северном фасаде здания (рис.4, *б*). За счет геометрии по северному фасаду (длина и высота здания здесь соизмеримы), пространственной жесткости и положения здания в мульде, сдвижения в основании театра монотонны и по данным моделирования и по натурным данным, преобладают деформации наклона. Необходимо отметить, что модель со зданием как в первом (рис.4, *а*), так и во втором (рис.4, *б*) случаях показывает отчетливое влияние здания на деформации земной поверхности, когда деформации в районе реперов в цоколе театра получаются заниженными. Такое несоответствие данных моделирования натурным данным может быть обусловлено рядом допущений, которые были приняты при моделировании конструкций здания, в результате чего наблюдаются эффекты завышения в расчетах реальной пространственной жесткости здания.

На примере западного фасада (рис.4, *в*) можно видеть, что при учете здания театра в модели деформации наклона и кривизны в фундаменте на отдельных участках уменьшаются до 40 % (наклон) и 75 % (кривизна) по сравнению с уровнями деформаций в моделях со свободной подрабатываемой земной поверхностью.

В дальнейшем анализе взаимодействия здания и земной поверхности рассмотрены распределения деформаций грунта в основании театра по всей площади. Результаты расчета деформаций земной поверхности представлены в виде изолиний и профилей распределения сдвижений и деформаций (сечений мульд сдвижений). Развитие деформаций было проанализировано на момент завершения строительства комплекса подземных выработок.

На рис.5 представлены распределения оседаний земной поверхности в изолиниях, как с учетом здания, так и без него. Сечения 1-1, 2-2 и 3-3 совпадают с продольными осями здания театра.

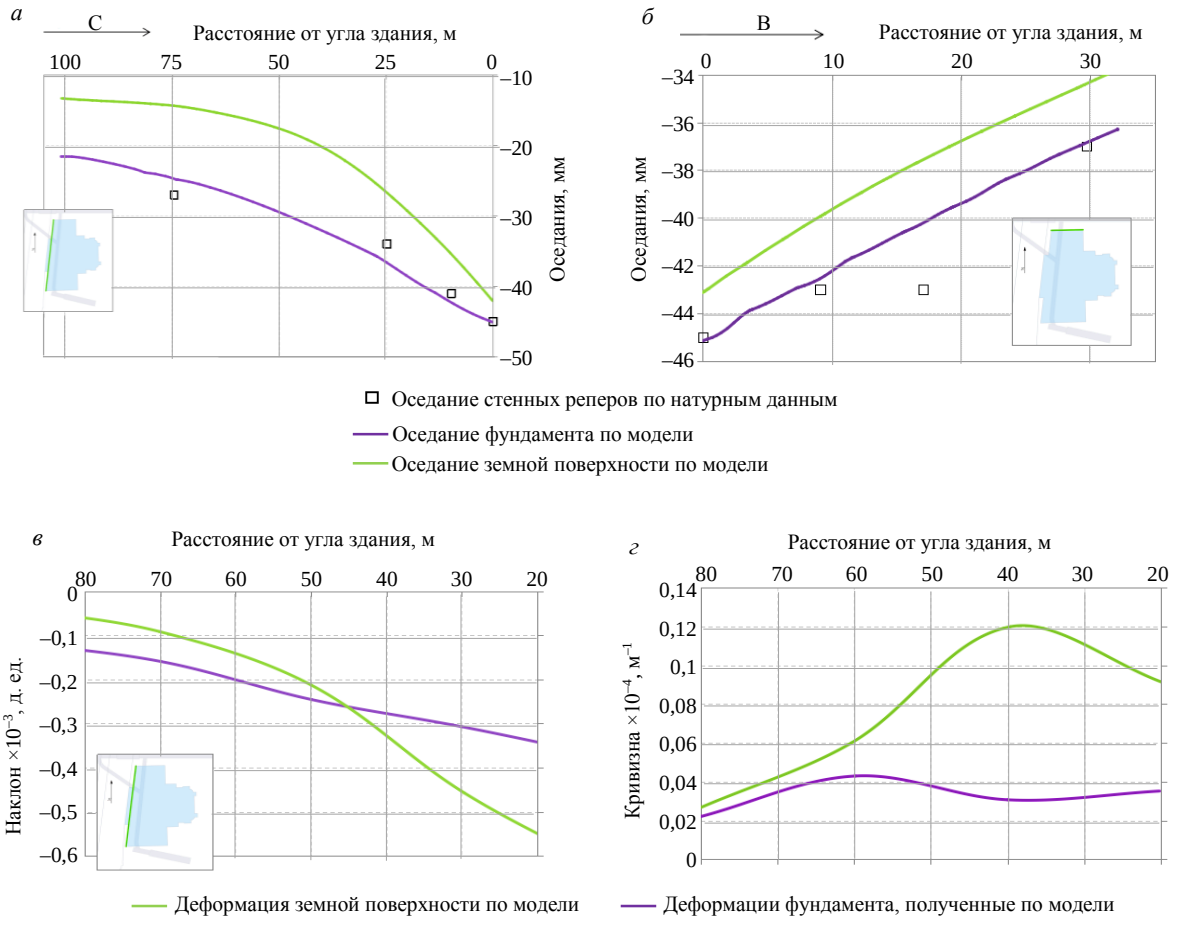


Рис.4. Распределение сдвижений (*а*, *б*) и деформаций (*в*, *г*) земной поверхности и фундамента театра:
а – оседания по западному фасаду здания; *б* – оседания по северному фасаду здания;
в – деформации наклонов; *г* – деформация кривизны по западному фасаду здания

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

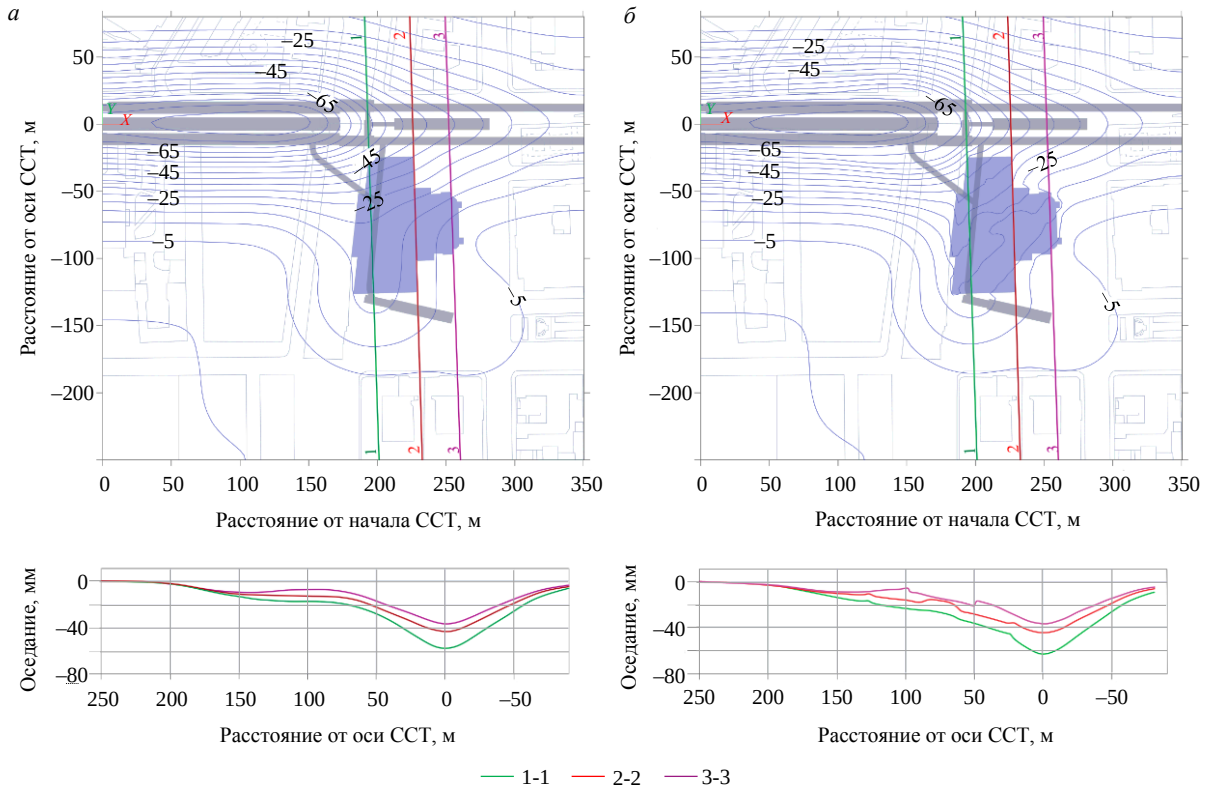


Рис.5. Контуры распределения оседаний и поперечные профили мульды сдвижения без учета здания (*а*), с учетом здания (*б*) (июль 2022 г., БСТ 2 п.)

Анализируя рис.5, можно отметить большое различие между профилями мульды сдвижения, построенными без здания и со зданием. Хорошо видно, как вес и жесткость здания приводят к изменению сечения мульды сдвижения. В пределах здания наблюдается увеличение абсолютных величин вертикальных сдвижений (оседаний) на 1-3 мм. Такая разница может рассматриваться в некоторых случаях как существенная. Так, если оперировать значениями предельных осадок в соответствии с СП 22.13330.2016 (для памятников культуры они равны 10 и 5 мм для I и II категории технического состояния соответственно) в прогнозной оценке деформации земной поверхности, такое различие в значениях может повлиять на вывод об опасности деформаций и принятие решений по разработке мер охраны подрабатываемого объекта. Кроме эффекта увеличения оседаний под зданием, отчетливо прослеживается и эффект их выравнивания (мульда в пределах здания выполаживается), деформации кривизны снижаются. Данный эффект объясняется конструктивной пространственной жесткостью здания, влияние которой на процесс сдвижения соизмерим с влиянием деформаций от проходки тоннелей. Напрямую с этим эффектом связан и ожидаемый эффект скачкообразного изменения оседания и резкого возрастания деформаций кривизны в приповерхностной зоне породного массива по контуру здания.

Анализ распределения деформаций наклонов земной поверхности представлен на рис.6, *а* – без учета влияния здания; рис.6, *б* – при наличии влияния здания. За счет резкого изменение интенсивности развития оседаний по контуру здания в этом месте увеличиваются и наклоны (неравномерные оседания), а также кривизна земной поверхности, что может негативно сказаться на состоянии подземных коммуникаций и других сооружений на данных участках (рис.6, *в*, *г*). Отчетливо прослеживается тенденция к уменьшению наклонов в северном и южном флигеле непосредственно под зданием, это связано с влиянием пространственной жесткости здания. При этом в зрительной части здания, наоборот, фиксируются повышенные значения наклонов.

Для большей наглядности представлены распределения деформации наклонов и кривизны в сечении 2-2 (рис.6, *в*, *г*). На рис.6, *в* видно, что под северным и южным фасадом здания значения деформации наклонов практически стабильны на своих уровнях, что естественно приводит к минимизации значений деформации кривизны в этих зонах.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Е.М.Волохов, В.К.Кожухарова, С.Н.Зеленцов, Д.З.Мукминова, А.А.Исаев, 2025

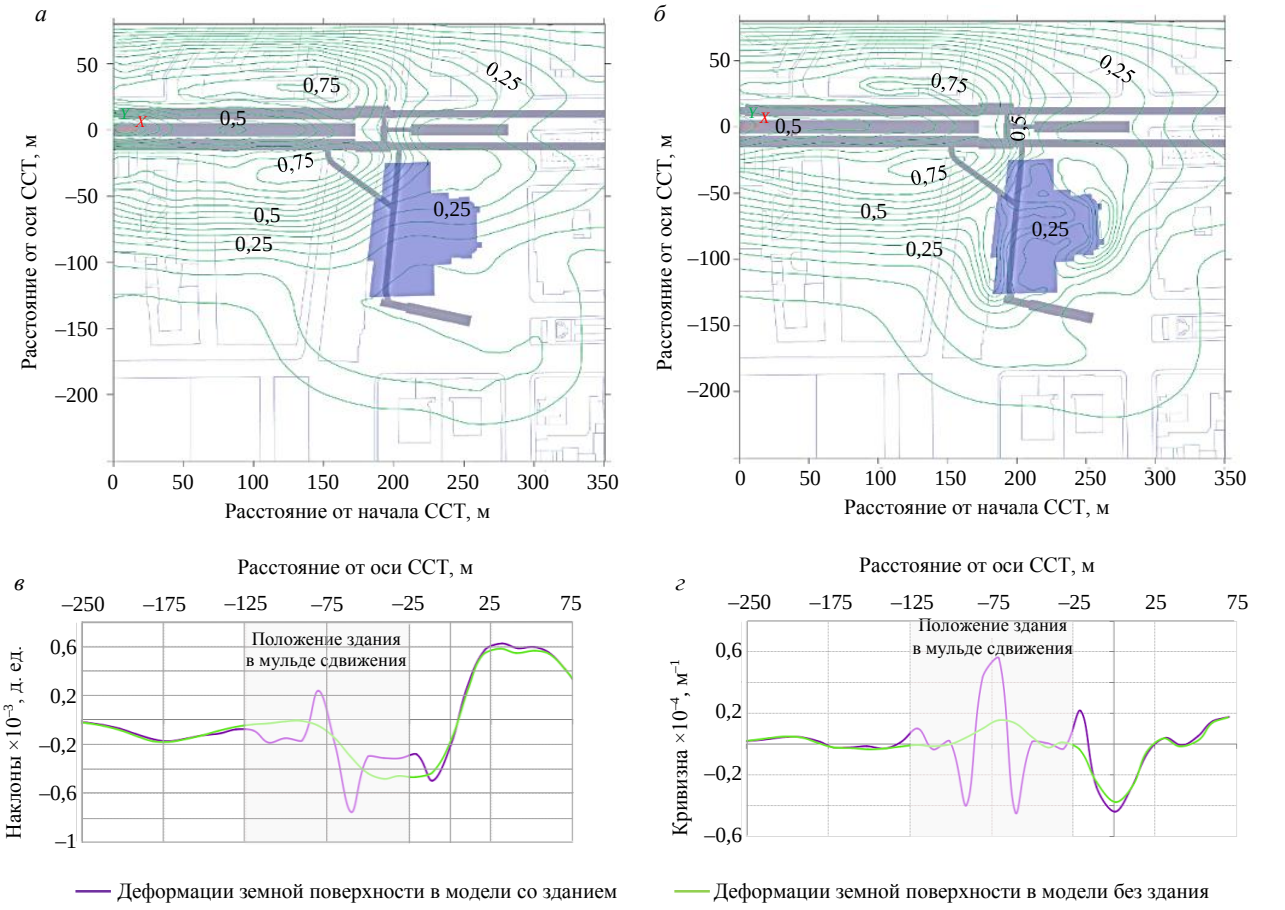


Рис.6. Контуры распределения абсолютных наклонов земной поверхности (10^{-3} д.ед.) над участком строительства станции «Театральная» (июль 2022 г., БСТ 2 п.)

При визуальной оценке деформационного состояния здания замечено, что количество трещин в простенках зрительной (центральной) части заметно уменьшается от 5-го к 1-му ярусу, уменьшается также их раскрытие, высказано предположение, что эта часть здания находится на положительной кривизне мульды сдвижения. Результаты моделирования подтверждают это предположение – вдоль западной (длинной) стороны здания основная (генеральная) кривизна положительна (рис.6, *г*), а само здание в связи с этим испытывает соответствующие дополнительные нагрузки и деформации. Это приводит к развитию дополнительных деформаций растяжения (в верхних ярусах строения), к которым каменная кладка малоустойчива, и, как следствие, появлению новых трещин и развитию (раскрытию) старых.

На графиках есть признаки сразу не очевидных, но важных эффектов. На разрезе 2-2 (рис.6, *г*) хорошо различима локальная зона повышенных деформаций кривизны земной поверхности, которая находится на расстоянии –75 м от оси среднего станционного тоннеля. Именно в этом месте располагаются зрительный зал и сцена Мариинского театра. Проявление этой зоны можно объяснить наличием существенной и сконцентрированной нагрузки от несущих, самонесущих и ненесущих стен на основание с северной и южной сторон от зрительной и сценической части, а также отсутствием большой нагрузки на фундамент и основание в зрительном зале и в районе сцены (рис.7). При подработке рассматриваемого объекта в этом месте формируется условная зона разгрузки и вторичная зона положительной кривизны, что может расцениваться как неблагоприятный сценарий развития деформаций в нижней части здания, так как наличие положительной кривизны в основании приводит к развитию дополнительных деформаций растяжения в конструктивных элементах под партером и сценой. Резкий перепад нагрузки на фундамент и основание в зонах на краях сцены и партера создает условия для развития касательных напряжений и проявления сдвиговых деформаций в основании, фундаменте и прилегающих к зонам стенах. Так как указанные особенности нагружения основания были заложены в сооружении изначально, можно предположить

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

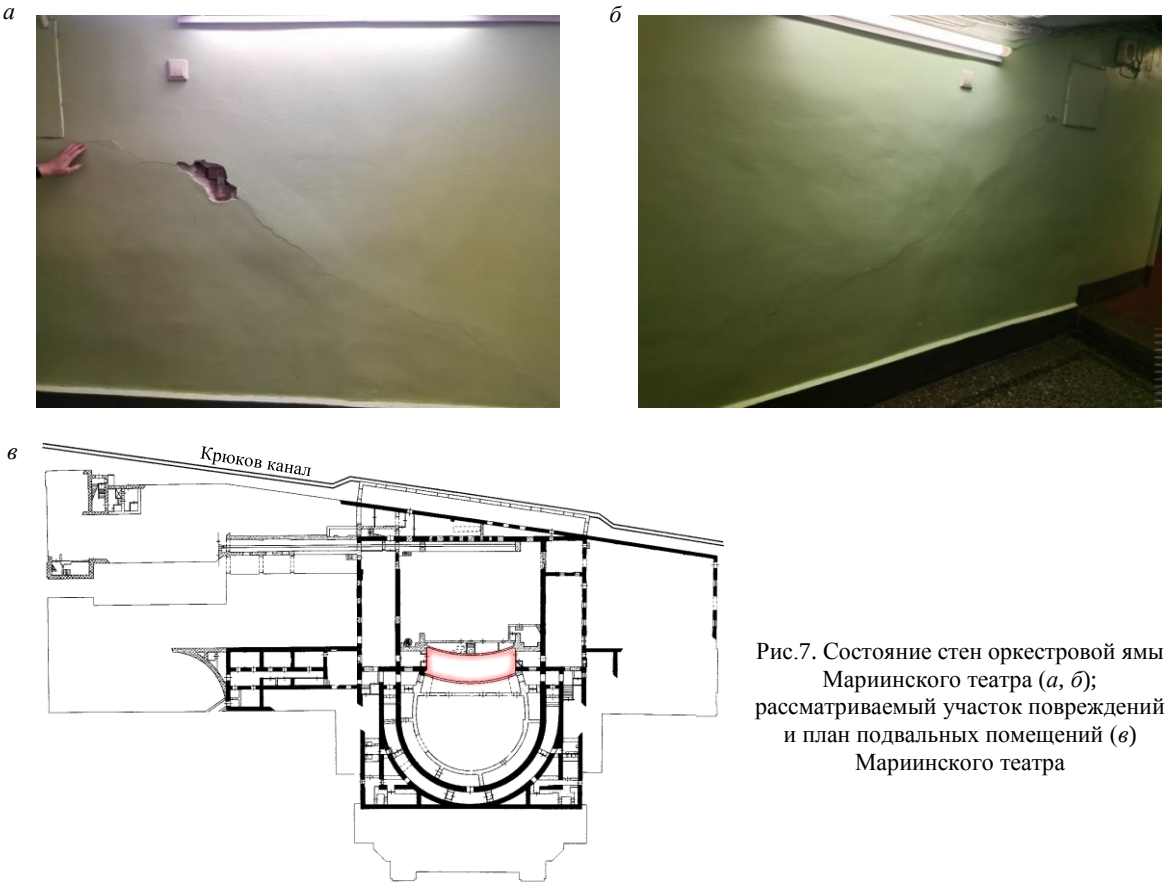


Рис.7. Состояние стен оркестровой ямы Мариинского театра (*а*, *б*); рассматриваемый участок повреждений и план подвальных помещений (*в*) Мариинского театра

влияние таких процессов уже после постройки и реконструкции здания театра, а рассматриваемые здесь деформационные процессы при подработке можно считать фактором активизации деформаций и пробуждения старых систем трещин. Этот эффект может объяснить проявление двух новых систем трещин (классифицированных как опасных), которые локализуются симметрично в стене оркестровой ямы (рис.7).

Эти трещины были обнаружены только в 2020 г., что условно позволяло связать их с ведением горных работ (на тот период под зданием была закончена проходка двух подходных выработок). Теперь, при выявлении указанного эффекта на моделях, можно говорить о высокой вероятности их инициирования именно горными работами.

В подобных исследованиях обычно предполагается, что эффекты взаимодействия пород основания и конструкции в основном уменьшают прогнозируемые классическими методами деформации от подработки, что и подтверждается нашим исследованием. Снижение деформаций (как первых производных от оседаний) прослеживается на фасадных стенах, где проявляются так называемые эффекты зависания и врезания [28]. Внешняя позитивность результатов моделирования и подобных рассуждений о снижении деформаций не должна исключать из рассмотрения и анализа указанные эффекты, которые могут существенно изменять НДС пород основания и конструкций здания. Увеличение оседаний по цоколю здания в зонах врезания (главным образом за счет собственного веса здания) может свидетельствовать о развитии дополнительных нагрузок и перераспределении напряжений в породах основания, в фундаментах и стенах с развитием дополнительных вертикальных деформаций в основании, а снижение оседаний в зонах зависания не может свидетельствовать о благоприятных условиях работы конструкций, так как здесь происходит существенное перераспределении напряжений в фундаментах и стенах. Когда здание деформируется в режиме зацепления с породами основания (см. рис.5, *а*, *б*), перераспределение не всегда ощутимо сглаживает неравномерность оседаний и снижает показатели деформаций. Можно отметить, что неправильная интерпретация таких эффектов приводит к ошибочным оценкам возможных повреждений зданий, вызванных их подработкой, и высоким рискам их реального появления, особенно на фоне маскирующего эффекта снижающихся показателей деформаций.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Выводы

В работе была поставлена задача оценки влияния крупного и уникального здания на деформации пород основания в условиях подработки выработками метрополитена. Типизация таких объектов невозможна, так как, помимо своих конструктивных особенностей, исследуемый объект подработки имеет геометрические размеры, соизмеримые с мульдой сдвижения. Поэтому для решения поставленной задачи использовались сопряженные комплексные конечно-элементные модели для систем тоннель – массив и тоннель – массив – здание, сравнительная оценка которых позволила выявить и оценить влияние самого здания на деформации земной поверхности в районе здания и по его фундаменту. Проектные и текущие технологические данные строительства станции метро «Театральная», данные визуальных обследований старого здания исторической сцены Мариинского театра, а также данные маркшейдерско-геодезического мониторинга по наблюдательным станциям позволили построить и откалибровать трехмерные сопряженные комплексные конечно-элементные модели.

Из-за сложной геометрии здания театр был смоделирован с высокой геометрической точностью с помощью двухмерных элементов, свойства которых были заданы на основе данных полевых измерений прочности каменной кладки. При анализе были выявлены эффекты увеличения вертикальных смещений (оседаний) и изменения деформаций по контуру здания и непосредственно под ним, этими явлениями не следует пренебрегать при оценке влияния деформаций земной поверхности на здания и сооружения в условиях подработки. Сопряженная модель помогла интерпретировать развитие новых опасных трещин в стенах оркестровой ямы театра, что подтверждает актуальность применения такого подхода для более эффективной оценки реакции здания на деформации земной поверхности.

При верификации данных моделирования грунтового массива отмечено, что правая часть поперечного сечения мульды сдвижения не может быть соотнесена с натурными наблюдениями, поскольку именно в этой части зоны влияния подземного строительства на земную поверхность проводились мероприятия по охране наземной инфраструктуры, которые включали в себя компенсационное нагнетание в породный массив. Эти эффекты в модели не были учтены. При анализе сдвижений и деформаций фундамента театра отмечено, что модель фундамента характеризуется более жестким поведением, это может указывать на необходимость учета ранее существовавших повреждений и дефектов в фундаменте здания. Следует отметить отсутствие грунтовых реперов вокруг здания театра, что не позволило определить сдвижения и деформации грунта относительно сооружения, все это говорит о неполноценности наблюдательной станции и необходимости применения современного маркшейдерского [29, 30] и геотехнического [31-33] мониторинга, в том числе дистанционными методами [34, 35].

Исследование показало актуальность использования сопряженного численного моделирования в совокупности с данными маркшейдерско-геодезического мониторинга и визуального обследования здания для определения причин наблюдаемых повреждений и деформаций в здании, а также учесть важные геотехнические аспекты (геометрия комплекса подземных выработок, этапность строительства подземного сооружения), которые влияют на результат моделирования.

Можно сделать вывод, что проведение оценки и прогноза потенциальных повреждений зданий и сооружений в условиях подработки только на основе получения сдвижений и деформаций земной поверхности не всегда может дать достоверный результат. Существует необходимость исследования влияния жесткости типовых зданий и их веса на перераспределение деформаций земной поверхности в основании сооружений. При оценке влияния подработки геометрически и структурно неоднородного здания Мариинского театра и определения уровня его деформирования с помощью численного моделирования, необходимо рассматривать геотехническую систему целиком на основе сопряженных моделей. Оценка и прогноз деформаций, основанный на моделировании только породного массива и подземного комплекса выработок, может дать заниженные значения вертикальных перемещений и завышенные значения деформаций земной поверхности в месте нахождения подрабатываемых объектов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хатум Х.М., Мустафин М.Г.* Оптимизация места расположения роботизированных станций наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 9. С. 2-13. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13

2. *Вальков В.А., Виноградов К.П., Валькова Е.О., Мустафин М.Г.* Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Геодезия и картография. 2022. Т. 83. № 11. С. 40-49. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49

3. *Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., Сухов А.К.* Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 562-570.

4. *Pospehov G.B., Savón Y., Delgado R. et al.* Inventory Of Landslides Triggered By Hurricane Matthews In Guantánamo, Cuba // Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. № 1. P. 55-63. DOI: 10.24057/2071-9388-2022-133

5. *Протосеня А.Г., Алексеев А.В., Вербило П.Э.* Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 252-260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26

6. *Карасев М.А., Сотников Р.О.* Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 626-638. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2

7. *Волохов Е.М., Кожухарова В.К., Бритвин И.А. и др.* Проблема оценки влияния горных работ на объекты наземной инфраструктуры // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 8. С. 72-93. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_72

8. *Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А., Лю Цзылу.* Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 5-21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_5

9. *Jun-qiang Ma, Xue-hua Li, Qiang-ling Yao et al.* Numerical simulation on mechanisms of dense drilling for weakening roofs and its application in roof control // Journal of Central South University. 2023. Vol. 30. Iss. 6. P. 1865-1886. DOI: 10.1007/s11771-023-5345-1

10. *Gajjar P.N., Ali M., Sayet T. et al.* Numerical study on the nonlinear thermomechanical behaviour of refractory masonry with dry joints // Engineering Structures. 2023. Vol. 291. № 116468. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116468

11. *Giordano E., Masciotta M.G., Clementi F., Ghiassi B.* Numerical prediction of the mechanical behavior of TRM composites and TRM-strengthened masonry panels // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 397. № 132376. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132376

12. *Bilotta E., Paolillo A., Russo G., Aversa S.* Displacements induced by tunnelling under a historical building // Tunnelling and Underground Space Technology. 2017. Vol. 61. P. 221-232. DOI: 10.1016/j.tust.2016.10.007

13. *Namazi E., Mohamad H., Hajihassani M.* 3D Behaviour of Buildings due to Tunnel Induced Ground Movement // Transportation Geotechnics. 2021. Vol. 31. № 100661. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100661

14. *Burd H.J., Yiu W.N., Acikgoz S., Martin C.M.* Soil-foundation interaction model for the assessment of tunnelling-induced damage to masonry buildings // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 199. № 104208. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104208

15. *Pascariello M.N., Luciano A., Bilotta E. et al.* Numerical modelling of the response of two heritage masonry buildings to nearby tunnelling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023. Vol. 131. № 104845. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104845

16. *Алхимова Н.В., Мазеин С.В.* Петербургский метрополитен: в ожидании бурного развития // Метро и тоннели. 2023. № 1. С. 18-23.

17. *Молоткова Е.Г.* Опыт урегулирования застройки на Адмиралтейском острове. 1805-1840-е годы // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 1. С. 94-103. DOI: 10.22337/2077-9038-2022-1-94-103

18. *Колодников И.В.* Дерево в современных проектах оперных театров и концертных залов: основные направления развития архитектуры и дизайна // Terra Artis. Искусство и дизайн. 2021. № 3. С. 6-19. DOI: 10.53273/27128768_2021_3_06

19. *Давидич Т.Ф.* Анализ развития «кирпичного стиля», его ведущие представители Виктор Шрётер и Иероним Китнер // ScienceRise. 2019. № 4 (57). С. 6-13. DOI: 10.15587/2313-8416.2019.165104

20. *Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А.* Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13

21. *Алексеев А.В., Иовлев Г.А.* Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 4. С. 75-87. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87

22. *Иовлев Г.А., Пискунов Н.С., Бахвалов Е.Д., Очкуров В.И.* Методы оптимизации параметров нелинейных грунтовых моделей для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 7. С. 148-163. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_148

23. *Wu J.T.H., Tung S.C.-Y.* Determination of Model Parameters for the Hardening Soil Model // Transportation Infrastructure Geotechnology. 2020. Vol. 7. Iss. 1. P. 55-68. DOI: 10.1007/s40515-019-00085-8

24. *Miliziano S., Caponi S., Carlaccini D., de Lillis A.* Prediction of tunnelling-induced effects on a historic building in Rome // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 119. № 104212. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104212

25. *Franza A., Zheng C., Marshall A.M., Jimenez R.* Investigation of soil–pile–structure interaction induced by vertical loads and tunnelling // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 139. № 104386. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104386

26. *Jinyang Fu, Zhiwu Yu, Shuying Wang, Junsheng Yang.* Numerical analysis of framed building response to tunnelling induced ground movements // Engineering Structures. 2018. Vol. 158. P. 43-66. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.039

27. *Amorosi A., Sangirardi M.* Coupled three-dimensional analysis of the progressive tunnelling-induced damage to masonry buildings: is it always worth it? // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 118. № 104173. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104173

28. *Franza A., Acikgoz S., DeJong M.J.* Timoshenko beam models for the coupled analysis of building response to tunnelling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 96. № 103160. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103160

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

29. *Hao Yang, Xiangyang Xu.* Structure monitoring and deformation analysis of tunnel structure // Composite Structures. 2021. Vol. 276. № 114565. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114565

30. *Афонин Д.А., Кавказский В.Н., Никитчин А.А.* Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. Вып. 3. С. 432-443. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-432-443

31. *Мамаев Д.С., Бугаков П.Ю.* Разработка программного обеспечения для геодинамического и геотехнического ГНСС мониторинга // XVII Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021»: Материалы Международной научной конференции «Молодежь. Инновации. Технологии», 19-21 мая 2021, Новосибирск, Россия. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2021. Т. 7. № 2. С. 114-119.

32. *Колотовичев Ю.А., Шахраманьян А.М.* Автоматизированный мониторинг деформации несущих конструкций «Екатеринбург Арены» // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 3. С. 314-330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330

33. *Лебедев М.О., Егоров Г.Д.* Геотехнические исследования при сооружении эскалаторных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 10. С. 146-159. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159

34. *Ru Wang, Mengshi Yang, Jie Dong, Mingsheng Liao.* Investigating deformation along metro lines in coastal cities considering different structures with InSAR and SBM analyses // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 115. № 103099. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103099

35. *Васильев Б.Ю., Мустафин М.Г.* Анализ и оптимизация цифровых моделей рельефа горнопромышленного объекта с открытым типом разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9. С. 141-159. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_141

***Авторы*: Евгений Михайлович Волохов,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-4430-4172*, **Василина Константиновна Кожухарова,** *аспирант* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *me@kozhuharova.ru, https://orcid.org/0009-0008-0705-3646*, **Сергей Николаевич Зеленцов,** *канд. техн. наук, заведующий сектором* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0006-6784-8702*, **Диана Зинуровна Мукминова,** *канд. техн. наук, заведующий лабораторией* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-5595-9150*, **Александр Александрович Исаев,** *начальник сектора* (*СПб ГКУ «Дирекция транспортного строительства», Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0009-6403-8941*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0