

# ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ПРОХОДКИ СТАНЦИОННЫХ ВЫРАБОТОК МЕТРОПОЛИТЕНА ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ СДВИЖЕНИЙ ПОДРАБАТЫВАЕМОГО ПОРОДНОГО МАССИВА

Е.М. Волохов<sup>1</sup>, В.И. Киреева, И.А. Бритвин<sup>1</sup>, Е.А. Волошина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: britvini25@yandex.ru

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы оценки вредного влияния горных работ при сооружении станции метрополитена «Театральная» в Санкт-Петербурге на здание Исторической сцены Мариинского театра в условиях возможного проявления больших деформаций при проходке натяжной камеры в восточном торце станции. Указанная проблема рассматривалась в контексте обеспечения охраны здания театра от вредного влияния горных работ на завершающей стадии подземного строительства, когда здание уже получило значительные повреждения, а забои самых крупных станционных выработок были временно остановлены для анализа деформаций и принятия окончательных технических решений по проходке в целях недопущения фатальных для здания театра последствий. Основным поводом для рассмотрения именно аварийных режимов послужили данные специальных натуральных наблюдений за массивом горных пород, показавшие проявление весьма значительных сдвижений над сводом среднего станционного тоннеля. Исследование включало анализ технологии сооружения камер большого сечения в восточном торце станции с целью выявления возможных рисков проявления больших деформаций, многовариантное численное моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива при проходке указанных выработок и анализ данных натуральных наблюдений за сдвигами в скважинах и на земной поверхности. По результатам исследований сделан вывод о весьма низкой вероятности проявления больших деформаций в породном массиве и на земной поверхности в текущих горно-геологических условиях сооружения выработок станции «Театральная», сформулированы рекомендации по модернизации проектных изыскательских работ для целей прогнозной оценки сдвижений пород и мониторинга деформаций.

**Ключевые слова:** сдвигения и деформации, напряженно-деформированное состояние, мониторинг, наблюдательные скважины, численное моделирование, Plaxis 3D, станционные тоннели, аварийные режимы проходки, метростроение.

**Для цитирования:** Волохов Е. М., Киреева В. И., Бритвин И. А., Волошина Е. А. Исследование аварийных режимов проходки станционных выработок метрополитена глубокого заложения при оценке сдвижений подрабатываемого породного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 28–49. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_28.

---

## Analysis of emergency modes in deep subway station tunnel driving during estimation of displacements in undermined rock mass

E.M. Volokhov<sup>1</sup>, V.I. Kireeva, I.A. Britvin<sup>1</sup>, E.A. Voloshina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: britvini25@yandex.ru

---

**Abstract:** The article discusses issues concerned with the estimation of harmful impact exerted by construction of the Teatralnaya Station of the Saint-Petersburg Subway on the building of the Mariinsky Theater's Historic Stage under conditions of potential large deformations during driving of a tension station on the east side of the Teatralnaya Station tunnel. That problem was analyzed in the context of safety of the theater building under impact of mining operations at the final phase of underground construction, when the building was already considerably damaged and the tunneling was temporarily stopped at the largest stations of the subway for the analysis of deformations and for the ultimate decision-making on tunneling with a view to elimination of fatal consequences for the theater building. The main reason for the analysis of the emergency modes was given by the data of special field observations over rock mass, which showed very large displacements in rock mass above the arch of the middle station tunnel. The research included: the analysis of the construction technology for the large-section rooms on the east side of the test station with a view to revealing possible risks of large deformations; the multivariate numerical modeling of the stress-strain behavior of rock mass during tunneling; and the study of field data from observations of displacements in boreholes and on ground surface. Based on the research results, it is concluded on the very low probability of large deformations in rock mass and on ground surface in the current geological conditions of tunneling at the Teatralnaya Station, and the recommendations are offered for upgrading project exploration operations for the predictive estimation of movements in rock mass and for the deformation monitoring.

**Key words:** displacements and deformations, stress-strain behavior, monitoring, observation boreholes, numerical modeling, Plaxis 3D, station tunnels, emergency driving modes, subway construction.

**For citation:** Volokhov E. M., Kireeva V. I., Britvin I. A., Voloshina E. A. Analysis of emergency modes in deep subway station tunnel driving during estimation of displacements in undermined rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(5):28-49. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_28.

---

### Введение

Проблема достоверного прогноза и оценки вредного влияния подземного строительства на вмещающий массив и земную поверхность в условиях плотной застройки современных мегаполисов по-прежнему остается сложной и актуальной. На сегодняшний день наиболее перспективным инструментом для решения задач подобного рода считается математическое моделирование ме-

тодом конечных элементов (МКЭ), популярное как среди российских [1–3], так и среди зарубежных исследователей [4–6]. Прогнозная оценка такого влияния должна учитывать физико-механические свойства породных массивов, их пространственную изменчивость, анизотропию свойств, физическую нелинейность, неоднородность и трещиноватость массивов [7–9], их реологические характеристики [10–12], а также

влияние геологических процессов [13]. Используемые геомеханические модели сред должны позволять учитывать не только свойства массива, но и технологические параметры строительства [14–16]. Методы расчета должны обеспечивать одновременный учет множества факторов, а также достоверность на уровне деформаций. Важным в таких заключениях является и своевременная оценка состояния подрабатываемых объектов инфраструктуры [17–19], для которых часто требуется обосновывать меры охраны. Для контроля спрогнозированных деформаций, выявления причин реализации на поверхности тех или иных непрогнозируемых деформаций и организации управления движением горных пород применяют методы мониторинга [20–22], и все чаще используются современные инклинометрические системы мониторинга [23–25]. Результаты мониторинга впоследствии также используются для уточнения прогноза сдвижений и деформаций [26–28], поскольку прогнозируемые значения могут существенно отличаться от данных натуральных

наблюдений [27, 29]. При строительстве станционного комплекса «Театральная» Лахтинско-Правобережной линии Санкт-Петербургского метрополитена в зону влияния горных работ попадало здание Исторической сцены Государственного академического Мариинского театра (ГАМТ), являющееся объектом культурного наследия федерального значения.

На начало 2021 г. здание театра уже было подработано несколькими выработками станционного комплекса и получило существенные деформации, но основные – самые крупные выработки комплекса: средний станционный тоннель (ССТ), группа камер (камера местной водоотливной установки, камера затворов и натяжная камера) и боковые станционные тоннели п. I и II путей (БСТ I и БСТ II), еще не приблизились к зданию театра. В связи с этим ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» был организован скважинный мониторинг вертикальных сдвижений и деформаций вмещающего породного массива при проходке крупных выработок станции «Театральная», располагавшихся в непо-

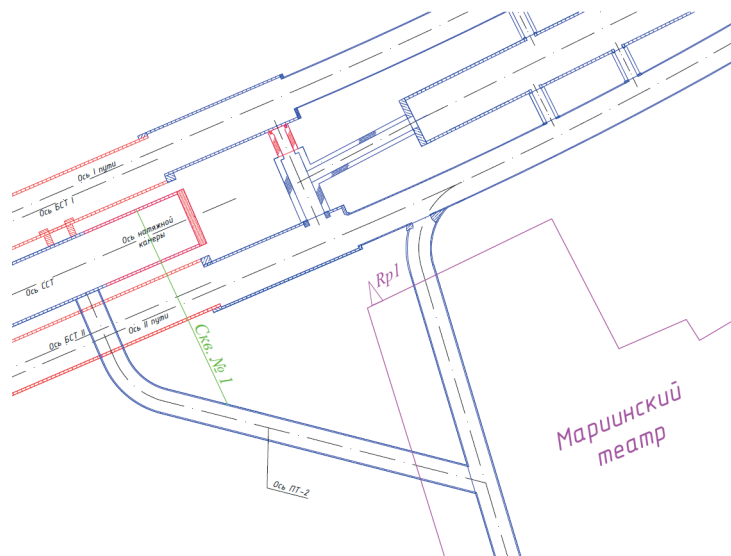


Рис. 1. Выработки станционного комплекса «Театральная» под зданием Мариинского театра  
 Fig. 1. Tunnels of Teatralnaya station complex under Mariinsky theater

средственной близости от здания театра. По замыслу инициаторов такой мониторинг должен был обеспечить условия выявления и количественной оценки деформаций в месте их возникновения для заблаговременного принятия мер по снижению воздействия на земную поверхность. Для этих целей над сводами стационарных выработок в восточном торце станции были пробурены две наклонные наблюдательные скважины из подходной выработки ПТ-2 под углом примерно  $17^\circ$  к горизонту. После проходки самых крупных выработок по оси станции (ССТ  $\varnothing 9,8$  м и группы камер за ССТ в таком же диаметре) скважинный мониторинг показал весьма большие деформации. В данной статье будут рассматриваться данные мониторинга по скважине № 1, результаты по которой были наиболее показательными, а основным средством количественного анализа механизмов выбрано многовариантное численное моделирование геомеханических процессов на базе МКЭ. На рис. 1 изображено плановое положение горных выработок под зданием Мариинского театра, синим цветом выделены выработки стационарного комплекса, которые были уже сооружены на момент начала наблюдений по деформационной скважине, красным цветом обозначены выработки и участки тоннелей, которые предстояло построить, зеленым цветом показана горизонтальная проекция скважины № 1.

Забой скважины № 1 располагался в 8,8 м над сводом выработок по оси станции. Оснащение направляющими трубами было выполнено 15.09.2021. Первый цикл измерений был произведен 23.12.2021. На 07.01.2022 оседание над сводом группы камер ССТ, по данным мониторинга, составило около 200 мм. После завершения активной фазы сдвижений значение оседаний здесь было зарегистрировано уже в 220 мм.

Полученные результаты значительно (в несколько раз) отличались от прогнозных значений сдвижений и деформаций. В связи с этим было принято решение выполнить теоретическую оценку возможных сценариев развития столь экстремальных деформаций численными методами, в т.ч. и через верификацию конечно-элементных моделей по результатам указанного мониторинга, и определить условия, при которых в массиве могли реализоваться столь значительные сдвижения. Проработка сценариев развития экстремальных деформаций и выявление основных факторов, определяющих эти процессы, должны опираться на анализ элементов технологии горно-строительных работ на стационарных тоннелях.

## **Методы**

*Технология сооружения стационарных выработок, ее анализ. Обоснование основных параметров моделирования*

Изложенные ниже классические для отечественного метростроения последовательность и технологические аспекты сооружения тоннелей большого сечения горным способом отражены в трудах [30, 31].

Таким образом, технология проходки ССТ и камер была практически стандартна, за исключением применения системы опережающего анкерного крепления лба забоя [32, 33] для обеспечения стабилизации деформаций призабойной зоны перед тоннелем. Анализ реализации этого проектного решения и схемы оптимизации самой технологии проходки ССТ показал хорошие результаты: перебор грунта был минимальный, скорость проходки удалось повысить и держать на стабильном высоком уровне, временное крепление призабойной зоны было удовлетворительным, качество анкерного крепления забоя не вызывало

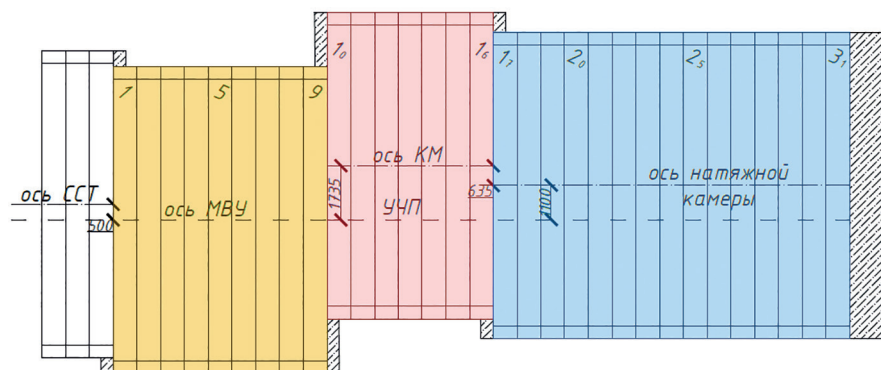


Рис. 2. Схема укладки колец в профиле по МВУ, КМ и натяжной камере [из материалов проектно-сметной документации строительства]

Fig. 2. Profile scheme of rings in local pump station, metal structure chamber and escalator chamber [Design and estimate documentation of construction data]

сомнений, первичное нагнетание осуществлялось стабильно и регулярно. Поэтому подробно анализировать технологию по ССТ мы здесь не будем, отметим лишь, что геологические условия по оси ССТ были стабильными, мощность протерозоя над сводом достаточна, а глубина заложения свода среднего станционного тоннеля составляла 46,9 м от поверхности. Для камер за ССТ ситуация была не так очевидна.

Итак, как уже было показано ранее, продолжением ССТ являются выработки т.н. натяжной камеры (рис. 2), включающей камеру МВУ — местной водоотливной установки (кольца № 1—9), КМ — камеру металлоконструкций, или камеру затворов (кольца № 10—16), и собственно натяжную камеру эскалаторного тоннеля (кольца № 17—31). Диаметр обделки на данных участках принят такой же, как и в ССТ —  $\varnothing 9,8$  м. Вследствие различного функционального назначения оси камер запроектированы на разных отметках относительно уровня чистого пола (УЧП). Основное отличие от типового проектного решения для таких камер (с крупными арками и монолитными конструкциями, постадийным раскрытием сечения и последовательным сооружением элемен-

тов) — это использование сборной крепи и тюбингоукладчика, что, по задумке проектировщика, должно было сократить сроки проходки и снизить показатели деформационного воздействия. Однако и такая компоновочная схема способна инициировать большие сдвиги и деформации, особенно в призабойных зонах на участках изменения отметок осей, которых нет при проходке обычного прямого участка ССТ.

Сооружение натяжной камеры выполнялось горным способом с разработкой породы отбойными молотками в два этапа: кольца № 1—9 в период с 13.07.2021 по 06.08.2021 (были пройдены сразу как продолжение ССТ), кольца № 10—31 в период с 25.11.2021 по 08.01.2022 (т.е. после некоторой паузы в 2—3 месяца). Проекция указанной выше наблюдательной скважины расположена примерно над сводом кольца № 22 (см. рис. 1).

Поскольку большие оседания, зафиксированные в скважине, возникли во время ведения горных работ на втором этапе проходки, мы рассмотрим более детально технологию сооружения камеры металлоконструкций и натяжной камеры. Именно там и следует ждать развития наибольших деформаций.

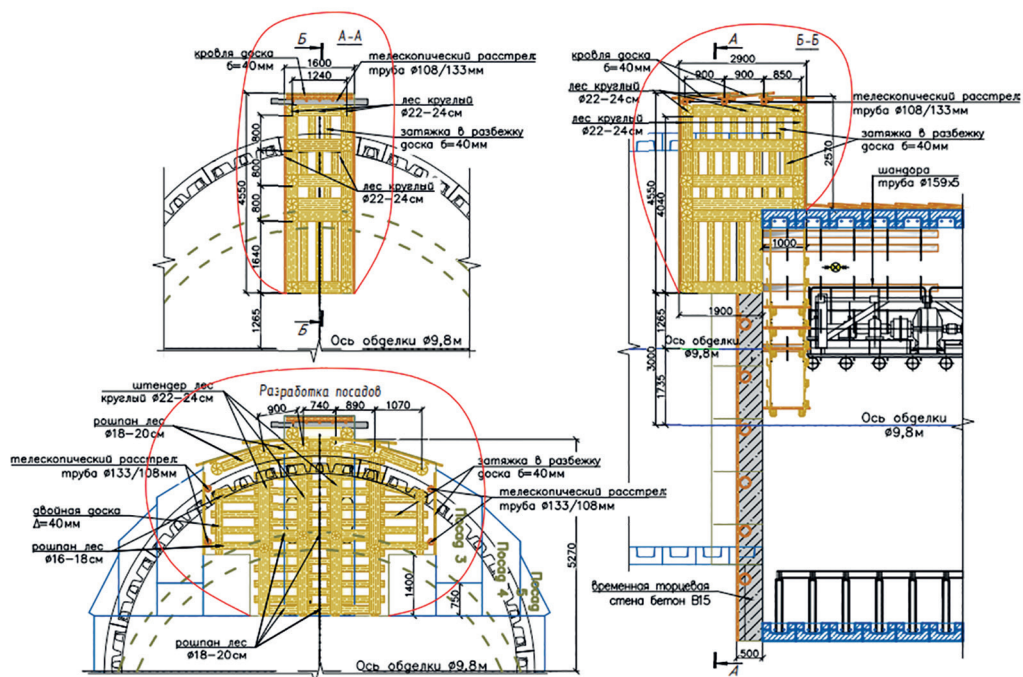


Рис. 3. Раскрытие калотты под прорезное кольцо № 10 [из материалов проекта производства работ (ППР) на сооружение натяжной камеры]

Fig. 3. Calotte construction for ring №10 [from method statement of escalator chamber construction]

Согласно порядку производства работ (ППР), при разработке породы на прорезное кольцо № 10 вырубается временная торцевая стена и далее поэтапно разрабатывается калотта: сначала разрабатывается врубовая прорезь и далее вертикально вверх сооружается фурнель (рис. 3, сеч. А–А, Б–Б). Крепление кровли осуществляется доской 4 см всплошную и телескопическими расстрелами  $\text{Ø}108–133$  мм. При креплении фурнели сооружается унтерцуг, представляющий собой две вертикальные рамы из круглого леса  $\text{Ø}22–24$  см, раскрепленных между собой рошпанами. Далее приступают к разработке посадок лонгарин одновременно в обе стороны от фурнели, лонгарины распираются на стойки из круглого леса (штендеры). На рис. 3 красным цветом условно показаны зоны инициализации деформационного процесса (зоны повышенных

касательных напряжений). После раскрытия калотты переходят к разработке породы штросс. Лоб забоя штросс закрепляют заведенной за телескопические расстрелы  $\text{Ø}219–273$  мм доской 4 см вразбежку.

Далее монтируется прорезное кольцо при помощи тубингоукладчика УТ2-М с первичным нагнетанием за обделку до горизонтального диаметра (ГД). Положение тубингов выше ГД фиксируется шандорами (труба  $\text{Ø}159$ ). По окончании монтажа прорезного кольца набирается опалубка и производится бетонирование торцевой стены. После набора бетоном прочности осуществляется первичное нагнетание кольца выше ГД.

Указанные технологические особенности проходки при переходе на отметки свода камеры затворов приводят к весьма большим породным обнажениям в калоттной части (по ширине и по пи-

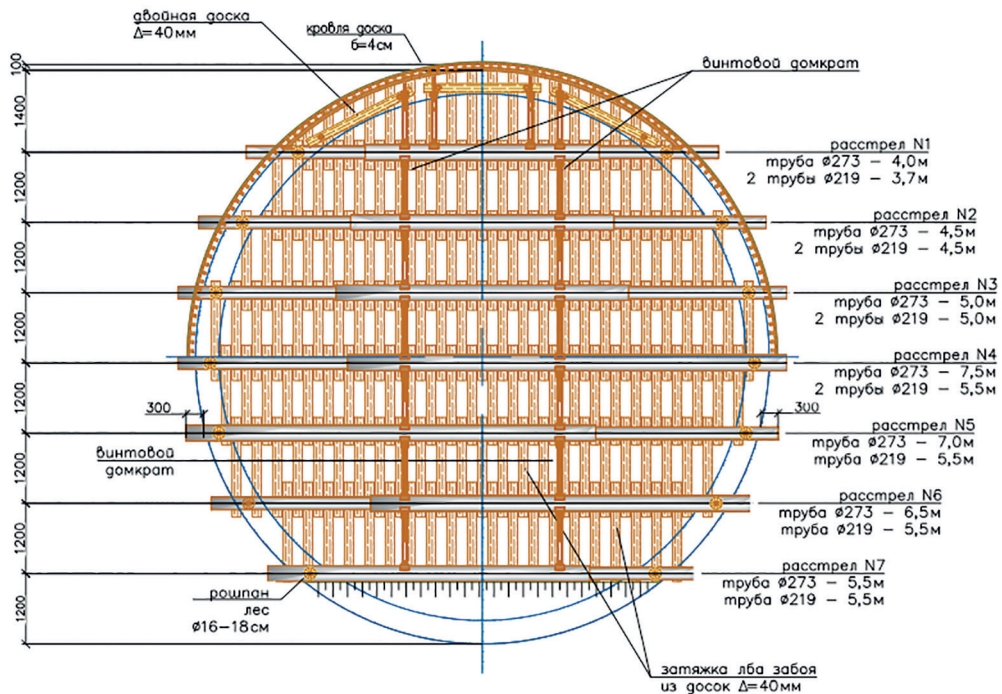


Схема крепления кровли

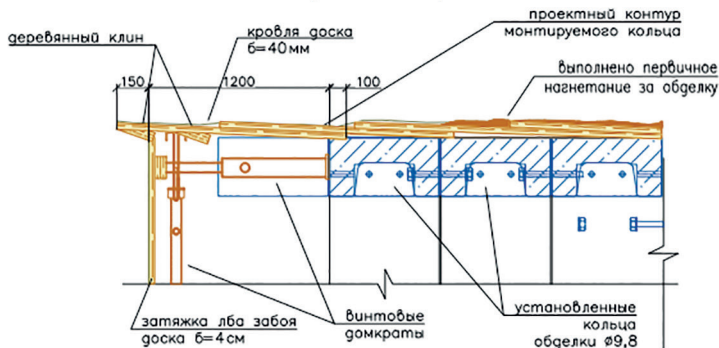


Рис. 4. Крепление забоя при разработке породы на кольцо Ø9,8 м [из материалов ППР на сооружение натяжной камеры]

Fig. 4. Tunnel face support due to ring Ø9,8 m excavation [from method statement of escalator chamber construction]

кету) с использованием временной крепи (не способной сопротивляться силам горного давления), время нахождения сводов без основной крепи может доходить до 5–7 дней. И как следствие, мы имеем дело с высоким риском развития больших деформаций контура выработки, проявления запредельного деформирования и вывалов.

Далее ведется штатная проходка прямого участка тоннеля (кольца № 11–16) с заходкой на одно кольцо. Кровля забоя здесь крепится досками вплотную (переборы допускаются до 15 см с учетом запаса на соблюдение требуемой эллиптичности кольца), при этом одним концом они опираются на смонтированное кольцо и расклиниваются,

другим концом заводятся в штору (рис. 4). Проходка тоннеля ведется с т.н. «передвижной» кровлей, т.е. при разработке породы на очередное кольцо кровля поддерживается той же деревянной крепью, которая использовалась в предыдущей заходке. Лоб забоя крепится телескопическими расстрелами и досками вразбежку (рис. 4). Расстрелы распираются между собой на винтовые домкраты.

До вруба на следующее кольцо производится первичное нагнетание за контур смонтированного кольца на всю высоту (по проекту). Отметим, что на практике первичное нагнетание колец выше ГД осуществляется через 3–5 смонтированных колец, так как технологически осуществить нагнетание в первое кольцо затруднительно. Очевидно, что и такая традиционная для петербургского метростроя схема также может создавать условия для проявления дополнительных деформаций и оседаний по своду из-за отсутствия ввода в работу основной крепи на пролете в 3–4 м по пикету.

На следующем «проблемном» участке изменения отметки разработка забоя

на кольцо № 16 велась с учетом торцевой стены под ним (см. рис. 2). После бетонирования торцевой стены собирается кольцо № 16.

По окончании первичного нагнетания кольца № 16 разрабатывается забой на прорезное кольцо № 17 натяжной камеры. По завершении монтажа бетонировается торцевая стена выше ГД за кольцом № 17 (см. рис. 2). После набора бетоном прочности выполняется нагнетание прорезного кольца. Здесь можно констатировать относительно благоприятные условия с точки зрения развития деформаций, однако из-за существенного увеличения периода нахождения во временной крепи на кольце № 17 и операций устройства монолитных участков торцевых стен возможно проявление дополнительных сдвижений. Далее ведется проходка прямого участка тоннеля (кольца № 17–31). За кольцом № 31 сооружается финишная торцевая стена на все сечение толщиной 1,2 м. Для данного участка характерна аналогичная прямым участкам ССТ и камер картина развития деформаций. При проходке камер так же, как и при сооружении

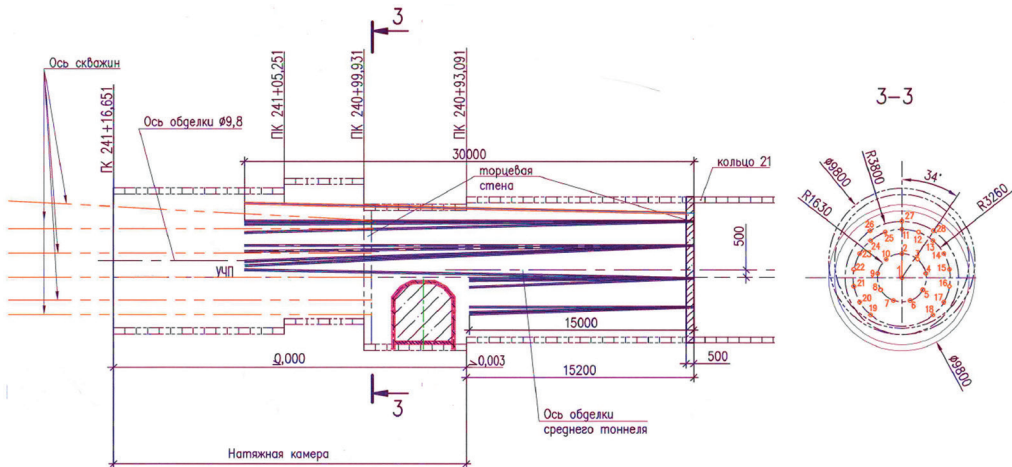


Рис. 5. Схема расположения скважин опережающего крепления лба забоя на втором этапе сооружения натяжной камеры [из материалов проектно-сметной документации строительства]

Fig. 5. Boreholes location for advanced face fixing during the second stage of escalator chamber construction [Design and estimate documentation of construction data]



ССТ, применялось опережающее крепление лба забоя (рис. 5) в целях сдерживания деформаций массива. До начала второго этапа строительства натяжной камеры из кондукторов во временной торцевой стене за кольцом № 9 забуривались 25 горизонтальных и 3 наклонные скважины Ø132 на глубину 25 м (по сеч. 3–3 на рис. 5). В пробуренные скважины устанавливались анкеры, выполненные из двух стержней Ø30 арматуры и нагнетальной трубки, через которую подавался цементно-песчаный раствор, омоноличивающий скважину и анкера. Этот элемент технологии рассматривался как однозначно благоприятный, эффективно сдерживающий возможные деформации пород со стороны забоев указанных выработок и камер, так как маркшейдерские наблюдения за деформациями забоев не показали отрицательной динамики по деформациям (максимальные горизонтальные сдвиги по забоям во временной крепи не более 5–10 см, по временным торцевым стенам не более 5–10 мм). Итак, указанная схема и последовательность ведения горно-строительных работ при сооружении ССТ и последующих камер в восточном торце станции потенциально может приводить к существенным дополнительным деформациям массива вследствие проявления следующих факторов:

- раскрытия больших по площади сечений и пикету выработанных пространств в калоттной части выработок на стыках камер;
- крепления этих пространств временной деревянной крепью, не способной сдерживать деформации от основного силового фактора;
- использования крупных монолитных конструкций торцевых стен сложной формы, которая усложняет бетонные работы, провоцирует оставление пустот, усложняет проведение качественного нагнетания за обделку;

- существенного увеличения затрат времени на разработку породы, временное крепление и бетонирование, а соответственно увеличения нахождения этих больших пространств без капитальной крепи.

Главными признаками проявления указанных негативных факторов при ведении горных работ на ССТ и камерах, которые можно фиксировать в анализе, являются:

- проявление существенной конвергенции контура тоннеля по породе (главным образом в виде большого оседания свода);
- повышенные горизонтальные сдвиги пород в забое.

В частности, при раскрытии калотты на переходных участках забой выше ГД разрабатывается со значительными переборами (40–45 см): на заведение лонгарин из круглого леса, а также с учетом запаса на выдавливание верхних косых и свода кольца. Время на установку прорезного кольца кратно превышает время, затрачиваемое на цикл для очередного кольца. Также скорость проходки существенно сдерживается и бетонными работами на торцевых стенах. Таким образом, постоянная крепь в зоне прорезного кольца может вступать в работу не раньше, чем через 7 дней после разработки породы.

Нужно отметить, что такое конструктивное решение для камер, включающее использование нескольких коротких участков, все-таки (при определенных обстоятельствах) может приводить к существенному росту деформаций массива над сводами камер, основная концентрация которых может быть приурочена к зонам изменения отметки профиля (где необходимы большие породные обнажения и сконцентрированы работы по монолитным конструкциям) и зонам над камерой металлоконструкций. Оценивая указанные выше техно-

логические зазоры, возможные пустоты и согласованное действие других негативных факторов (плохого первичного нагнетания и длительного нахождения выработанного пространства калотт во временной крепи), можно ориентировочно оценить максимальную посадку сводов на уровне до 40 – 50 см.

По степени проявления указанных выше деформационных признаков будем выделять два качественных уровня (уровня риска): предаварийный (режимы умеренного риска проявления опасных деформаций) и аварийный (режимы высокого риска проявления опасных деформаций).

Под аварийными режимами строительства будем здесь и далее понимать режимы проходки, связанные с серьезным нарушением технологических регламентов, или режимы, сопряженные с проявлением природных и технологических факторов, приводящих к аварийной ситуации (например, технологические режимы с длительной остановкой забоя или с «хроническим» отсутствием первичного нагнетания, приводящие к разрушению временной крепи, возникновению вывалов или обрушений и т.п.), при которых в массиве и на поверхности реализуются весьма значительные деформации, опасные для подрабатываемых объектов.

При штатных режимах проходки значение конвергенции пород в районе свода тоннеля обычно не должно превышать уровней порядка 15 – 17 см; исходя из усредненных данных о зазоре между породой и кольцом обделки или штатном переборе грунта в 10 – 15 см, условий изъятия оттуда всех элементов временной крепи (досок, лонгарин и т.п.) и отсутствия своевременного нагнетания тампонажного раствора, весь этот зазор может сомкнуться (чего на практике практически не случается). Еще 20 мм может сюда добавиться от оседа-

ния свода обделки при вступлении ее в работу. В предложенной классификации для аварийных режимов (режимов высокого риска) можно установить следующие уровни деформаций для фиксации их признаков:

- проявление конвергенции контура тоннеля (оседание свода) более 50 см;
- горизонтальные сдвигения пород по забою более 10 см.
- Для предаварийных режимов (режимов умеренного риска):
  - проявление конвергенции контура тоннеля (оседание свода) от 15 – 17 до 50 см;
  - горизонтальные сдвигения пород по забою до 5 – 10 см.

Для корректного моделирования воздействия строительства на вмещающий массив и земную поверхность необходимо правильно учитывать особенности технологии строительства выработок, а также инженерно-геологические условия проходки. Анализ технологии позволил выделить основные факторы, которые могут существенно повлиять на изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в процессе строительства в этой зоне и обеспечить условия развития больших деформаций и сдвижений над сводами выработок.

В связи с тем, что верификация КЭ-моделей планировалась по результатам мониторинга скважины № 1 (т.е. мониторинга конкретной зоны проходки – зоны проходки камер ССТ), было принято решение упростить модель станционного комплекса, т.е. оставить в модели только те выработки, которые в момент проявления максимальных сдвижений могли повлиять на деформационную картину: ССТ и выработки натяжной камеры.

#### *Общая характеристика моделей*

Расчеты выполнялись в программном комплексе Plaxis 3D в трехмерной по-

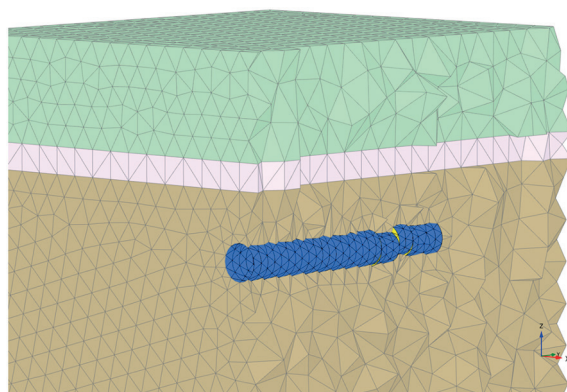


Рис. 6. Конечно-элементная модель ССТ и натяжной камеры станции «Театральная»  
 Fig. 6. Finite element model of central station tunnel and escalator chamber of Teatralnaya station

становке (рис. 6). Также для упрощения расчетов и анализа результатов было выполнено объединение слоев четвертичных отложений с усреднением физико-механических свойств. Всего модель содержит три слоя пород, согласно данным геологического разреза. Работа выполнялась на основе модели упрочняющихся грунтов (Hardening Soil), которая подходит наилучшим образом для решения прогнозных задач в соответствующих горно-геологических условиях [34]. Параметры грунтовой толщи представлены в таблице. Ввиду того, что большая часть моделей реализована в режиме заданных деформаций, базовый модуль деформации выбран на уровне 100 МПа. Вариация этого параметра в

обоснованных ранее пределах (75 – 200 МПа) существенной разницы в оценке по заданным деформациям не приносила. Система опережающего крепления забоя в модели не учитывалась, так как расчеты велись в режимах, имитирующих большие деформации.

Расчеты выполнялись на моделях с размерами по осям  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$  соответственно 300,0; 120,0 и 102,5 м. Данные размеры грунтового массива были приняты на условии минимизации влияния граничных эффектов при моделировании больших значений сдвижений и деформаций.

Средний размер элемента КЭ-сети составил 10 м. Количество элементов в моделях составляло более 34 000, ко-

**Физико-механические характеристики пород модели**  
**Physical and mechanical characteristics of rocks in the model**

Слой инженерно-геологических элементов (ИГЭ)	Удельный вес в насыщенном состоянии $\gamma_{sat}$ , кН/м <sup>3</sup>	Мощность $m$ , м	Модуль жесткости на трехосное сжатие $E_{50}$ , МПа	Одометрический модуль жесткости $E_{oed}$ , МПа	Жесткость при разгрузке/повторном нагружении $E_{ur}$ , МПа	Сцепление $c'$ , кПа	Угол внутреннего трения $\phi'$ , град.
Четвертичные отложения	21,8	27	13	13	39,4	27	20
Глины переходного слоя	21,5	7	50	50	150	50	21
Нижний слой кембрийских глин	21,8	68	100	100	300	130	23

личество узлов превышало 51 000. Конструкции выработок ССТ и натяжной камеры моделировались двумерными элементами типа Plate с эквивалентными характеристиками. Временное крепление лба забоя (при необходимости) также задавалось элементом Plate с эквивалентными характеристиками. Конвергенция пород вокруг выработок задавалась в режиме заданных деформаций с использованием функции Contraction (относительного уменьшения площади сечения выработки в %).

#### *Основные принципы моделирования. Группы моделей*

Основными данными, полученными по результатам мониторинга массива и поверхности, являются данные об оседаниях. В связи с этим верификация моделей и анализ результатов расчетов производились в основном по вертикальной составляющей сдвижений.

Для верификации моделей изменялись следующие параметры расчетов с учетом всех влияющих факторов, выделенных ранее:

- значение сдвижений пород вокруг выработок с использованием функции Contraction для имитации конвергенции пород вокруг выработок;
- физико-механические характеристики плиты у лба забоя для имитации сдвижения пород во внутреннее пространство выработки.

За исходные параметры моделирования были взяты данные из ранее проведенных исследований, в которых была выполнена верификация моделей по результатам мониторинга сдвижений земной поверхности.

В зависимости от изменяемых параметров было принято разделение моделей на следующие две группы:

- модели, в которых изменялись параметры проходки группы камер ССТ (камеры МВУ, камеры затворов и на-

тяжной камеры), так как именно они находились под скважиной и была необходима оценка их влияния на сдвижения в массиве над сводом тоннеля.

С шагом в 0,5% изменялся показатель конвергенции вокруг этих выработок. Также кратно уменьшался, при необходимости, модуль деформации плиты, имитирующей забой, вплоть до приведения этого значения к параметрам вмещающего массива (т.е. незакрепленного забоя);

- модели, в которых помимо группы камер ССТ менялись значения конвергенции на остальных рассматриваемых выработках модели (главным образом ССТ), так как их строительство также вносит вклад в конечное значение сдвижений массива в рассматриваемой точке.

Технически поставленная задача решалась выбором и назначением таких условий и параметров модели, которые обеспечили бы оседание в 200 мм (на уровне 8,8 м над сводом), чтобы оценить потенциальные возможности такого сдвижения в реальных условиях. В связи с тем, что данные значения сдвижений кратно превышали прогнозные, верификация моделей по таким данным выполнялась для т.н. аварийных режимов.

#### **Результаты**

##### *Обоснование стадийности моделирования проходки*

Для обоснования количества фаз моделирования была выполнена оценка влияния эффекта постадийной проходки на результаты расчетов. Сравнивались результаты моделирования строительства выработок в одну фазу и при поэтапной заходке. Для поэтапного моделирования строительства ширина заходки была принята укрупненной до 10 м. Например, однофазная задача может описывать аварийную проходку всего ССТ.

На рис. 7 приведены результаты сравнения поэтапного моделирования и од-

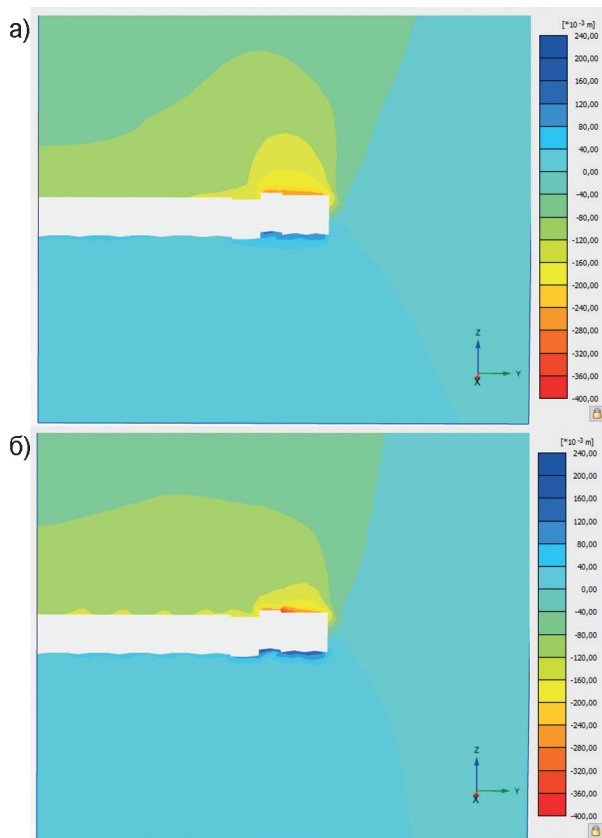


Рис. 7. Распределение вертикальной составляющей сдвижений в массиве ( $U_z$ ) в разрезе вдоль оси тоннеля ССТ и натяжной камеры: при одностадийном моделировании (а); при многостадийном моделировании (б)

Fig. 7. Vertical soil movement ( $U_z$ ) in the section along central station tunnel and escalator chamber: for single stage modelling (a); for multiple stage modelling (b)

нофазной задачи. При одностадийном моделировании область влияния на массив локальных сдвижений в шельге больше.

Области сдвижений над выработками и в массиве различаются по форме и площади распространения, но не более чем на 20% в массиве и на 13% в приповерхностной зоне. Данные расхождения можно считать незначительными для задач подобного рода. Это позволяет нам обосновать вариант одностадийного моделирования строительства выработок станции для тех случаев, где это возможно.

#### Результаты моделирования аварийных режимов строительства

По результатам скважинного мониторинга при строительстве ССТ и натяжной камеры в массиве на расстоянии 8,8 м над сводом натяжной камеры реализовывались значительные оседания порядка 220 мм. Эти данные стали основой для калибровки КЭ-моделей.

В первой группе моделей изменялись параметры проходки группы камер ССТ и физико-механические характеристики крепления лба забоя. Обеспечить оседания в 220 мм на этих моделях не удалось даже при моделировании аварий-

ных режимов проходки для всех трех камер. Показатель конвергенции (величина оседания) в своде выработок был доведен до 700 мм, и забой был не закреплен (рис. 8, а). Дальнейшее увеличение конвергенции приводило к «разрушению» модели, расчет обрывался. В связи с этим было принято решение перейти к расчетам по второй группе моделей, в которых аварийные режимы строительства задавались уже по всему ССТ. Результаты расчетов по второй группе моделей представлены на рис. 8, б. Подобные результаты были получены при моделировании значительных вели-

чин конвергенций пород в шельге и лотке выработок, достигавших 700 мм.

Также значительный вклад в сдвигения в рассматриваемой области дал незакрепленный забой. Сдвигение пород в незакрепленном забое в сторону выработанного пространства достигало 350 мм. Только при этих условиях в 8,8 м над сводом натяжной камеры на моделях были получены 220 мм (т.е. соответствующие данным скважинного мониторинга массива). При столь значительных величинах сдвигения в массиве оседание поверхности над осью натяжной камеры составило бы порядка 130 мм.

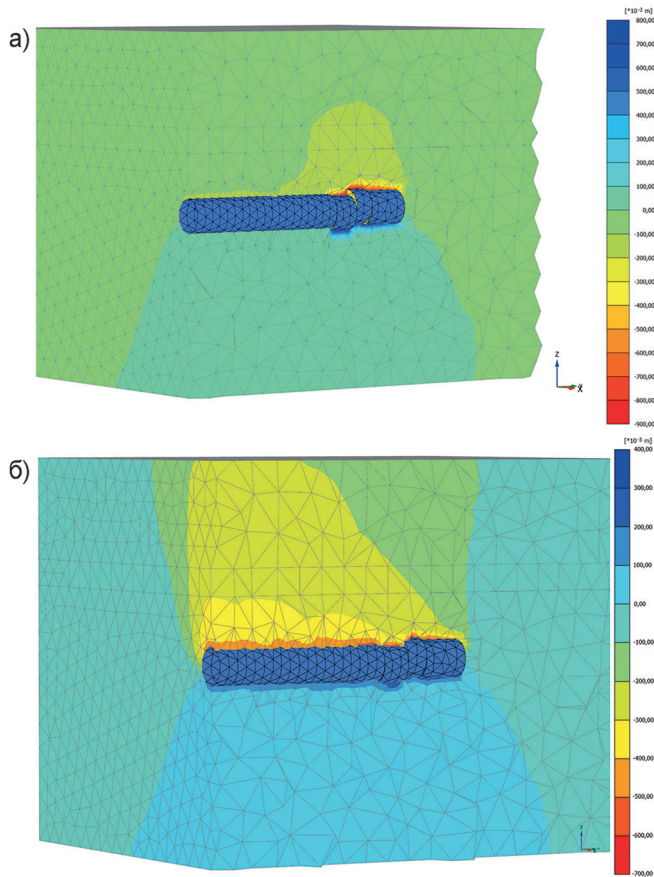


Рис. 8. Распределение вертикальной составляющей сдвижений в массиве при аварийных режимах проходки: натяжной камеры (а); ССТ и натяжной камеры (б)

Fig. 8. Vertical soil movement during emergency modes excavation: of escalator chamber (a); of central station tunnel and escalator chamber (b)

## Обсуждение результатов

В месте расположения деформационного репера Rp1 на углу здания Мариинского театра (см. рис. 1) по результатам моделирования при заданных параметрах проходки получилось оседание в 40–42 мм. В то же время согласно данным натурных измерений оседание на репере 1 от строительства трех камер ССТ (МВУ, камеры затворов и натяжной камеры) составило всего 5–7 мм.

Для сравнения результатов мониторинга и моделирования приведены гра-

фики оседаний по скважине (рис. 9). На графике оседаний по результатам натурных наблюдений (рис. 9, а) в 7 м от устья скважины имеется ярко выраженный «надлом», после которого значения оседаний значительно увеличиваются. Далее оседания в массиве изменяются практически по линейному закону. Такое распределение сдвижений и деформаций нехарактерно для подрабатываемого массива при строительстве тоннелей. Это очевидно в сравнении с результатами моделирования (рис. 9, б), где на не-

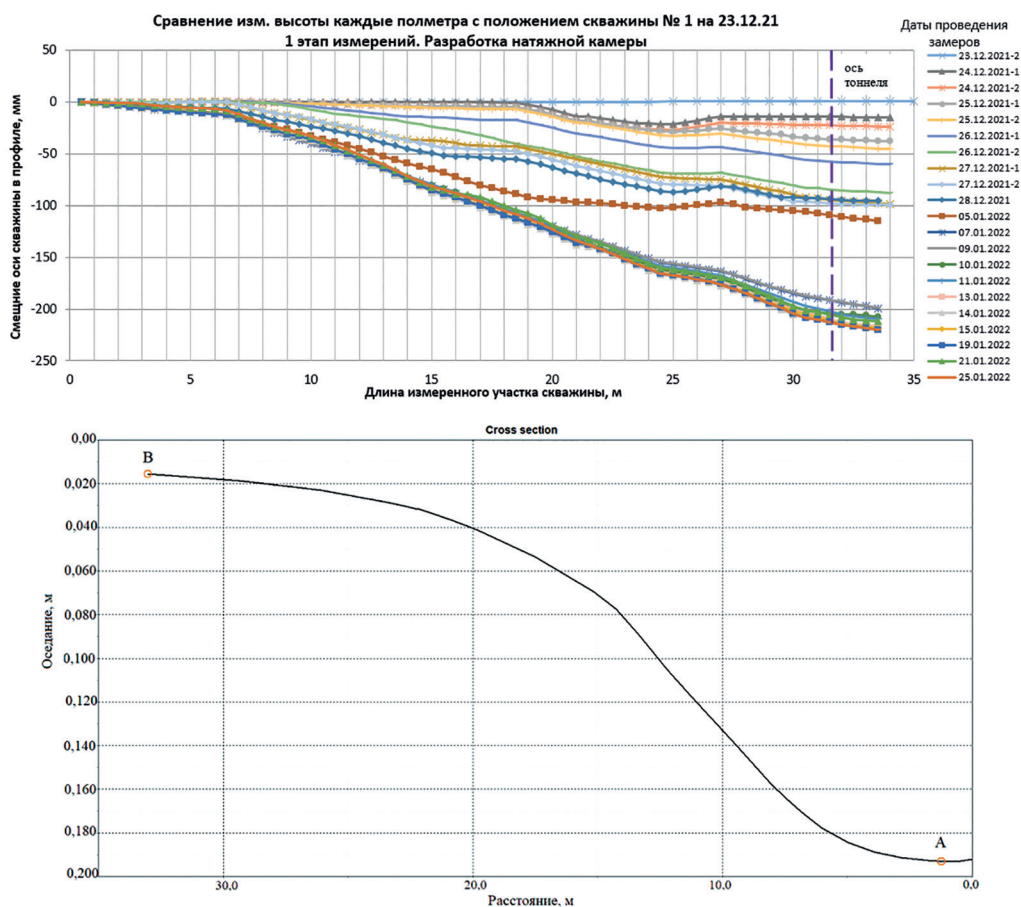


Рис. 9. График оседания массива вдоль скважины № 1: по результатам скважинного мониторинга [из материалов ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»] (а); по результатам моделирования (А – точка над осью тоннеля, В – точка в устье скважины) (б)

Рис. 9. Soil settlement along the borehole № 1: from borehole monitoring [JSC “Lenmetrogioprotrans” data] (a); from model data (A – the point above tunnel, B – the point in the borehole head) (b)

линейном графике видны области выпуклости и вогнутости, которые должны проявляться в данном случае.

### **Предложения**

Полученные данные об уровнях смещений пород в сводах станционных тоннелей и камер следует учитывать при организации мониторинга массива в дальнейшем. Также следует отметить, что для корректного обоснования моделей грунтов и повышения достоверности прогноза смещений и деформаций в целом необходимо модернизировать программу инженерно-геологических изысканий, обеспечив получение данных трехосных испытаний, показателей структурного ослабления массива, рассмотреть возможности организации дополнительных изысканий на этапе строительства для исследования свойств подрабатываемого массива — изысканий в динамике (с учетом техногенного воздействия), так как строительство станционных комплексов происходит долго и поэтапно, оно может растягиваться во времени до 5—7 и более лет, каждый этап может значительно влиять на НДС вмещающих пород и менять их физико-механические свойства. Также необходимо рассматривать обеспечение исследований реологических свойств пород и массива в целом, учет которых весьма важен при моделировании поэтапного влияния и корректных оценок деформаций не только на конечных стадиях подземного строительства [12, 35].

Наиболее существенным, на наш взгляд, фактором, не учтенным в работе из-за ограниченности данных, является влияние природной и приобретенной трещиноватости породного массива. Так, в практике подземного строительства в протерозойских породах установлено появление и развитие интенсивности микротрещиноватости и макротрещин, которые, согласно [36, 37], могут суще-

ственно влиять на параметры прочности, деформационные свойства и проницаемость аргиллитоподобных глин. Кроме известных методов изучения трещиноватости в забоях, можно рассматривать и опережающее разведочное бурение. Все это позволит подойти к учету в модельных расчетах смещений земной поверхности влияния масштабного фактора на механические свойства породного массива.

Учитывая сложность поставленных задач прогнозной оценки деформаций, влияние множества независимых факторов в многофазной гетерогенной среде и высокие риски выхода на предаварийные режимы проходки, вопрос постановки и реализации подобных деформационных наблюдений за породным массивом по-прежнему остается весьма актуальным и востребованным, а данные таких мониторинговых наблюдений зачастую являются единственным средством обеспечения количественной достоверности прогноза деформаций. В условиях подземного строительства в районах исторической застройки городов необходимо ставить вопрос об обязательности постановки автоматизированных скважинных мониторинговых наблюдений с глубинными реперами.

Предложенная классификация режимов проходки не может считаться исчерпывающей, однако постановка вопроса рассмотрения разных вариантов режимов проходки (вплоть до предаварийных и аварийных) и их влияния на развитие деформационных процессов должна найти место в современных проектных решениях и самом подземном строительстве. Многовариантность проектного решения (для разных режимов проходки), особенно для опасных в геологическом отношении участков, сложных сопряжений и крупных выработок, должна обеспечивать оперативность изменения технологических параметров и своевре-



менность купирования чрезмерно развивающегося деформационного процесса в целях охраны подрабатываемых объектов.

### **Заключение**

В данной работе выполнялась верификация КЭ-моделей с учетом результатов скважинного мониторинга сдвижений и была выполнена оценка условий проходки, при которых в массиве могли реализоваться столь значительные оседания (220 мм), кратно превышающие прогнозные значения.

Для обоснования основных параметров моделирования была детально проанализирована технология строительства выработок. Были выделены факторы, способные повлиять на величину сдвижений и деформаций массива, и предложена классификация режимов на предаварийные и аварийные. В зависимости от уровня изменения определяющих параметров в моделях было принято разделение моделей на две группы. В первой группе моделей изменялись параметры проходки натяжной камеры и физико-механические характеристики пород и крепления лба забоя. Обеспечить оседания в 220 мм на этих моделях не удалось даже при моделировании аварийных режимов проходки для всех трех камер.

Отдельно была выделена группа моделей, в которых предаварийные и аварийные режимы строительства задавались уже по всему ССТ. Здесь расчеты показали, что реализация оседаний, полученных по результатам мониторинга, возможна только при значительных величинах конвергенции пород у свода выработок всего ССТ и натяжной камеры (порядка 700 мм), а также при больших значениях сдвижений пород лба забоя (350 мм). Столь большие значения сдвижений могут проявиться только в аварийных режимах: при крупных вы-

валах, незакреплении выработок, систематическом ненагнетании тампонажного раствора за обделку или значительных деформациях основных несущих конструкций, которых при строительстве ССТ и других выработок на станции «Театральная» зафиксировано не было. Также полученные из моделей значения оседаний на поверхности для предаварийных и аварийных режимов совершенно не соответствовали натурным данным.

По результатам моделирования проходки ССТ и всех камер за ССТ в месте расположения деформационного репера 1 на здании Мариинского театра фиксировалось оседание в 42 мм. По результатам нивелировок при строительстве ССТ, МВУ, камеры затворов и натяжной камеры оседания составили всего 5–7 мм, что в 6 раз меньше полученных значений.

Сравнение графиков оседаний вдоль скважины также показало значительные расхождения и в характере распределения сдвижений в массиве.

Из всего вышеизложенного можно сделать однозначный вывод о том, что сдвижения в массиве, зафиксированные по результатам скважинного мониторинга, не могли реализоваться при строительстве ССТ, МВУ, камеры затворов и натяжной камеры, которые по фактическим данным маркшейдерских наблюдений проходились в безаварийных режимах, что подтверждается качественными технологическими признаками и количественными параметрами обоснованной в работе классификации режимов. Показанный в работе подход к анализу возможных аварийных режимов, при получении «тревожных» данных на внедрении новых методов и подходов для деформационного мониторинга, может быть рекомендован в подобной практике для верификации получаемых мониторинговых данных и прогнозного ана-

лиза развития реальных деформаций. Даже в случаях использования численного моделирования для нестандартных условий только опора на детальный технологический разбор горнотехнической ситуации и анализ физической картины деформационных процессов может однозначно классифицировать аварийность режима проходки реального тоннеля.

Авторы выражают благодарность производственно-техническому отделу и маркшейдерской службе АО «Метрострой Северной столицы» за предоставление ППР на сооружение натяжной камеры на станции «Театральная» и ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» за предоставление данных скважинного мониторинга за сдвигами подрабатываемого породного массива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Novozhenin S. U., Vystrchil M. G., Bogdanova K. A.* Analysis of the mathematical modelling results of displacements and deformations induced by the construction of the escalator tunnel of «Mining Institute» station in Saint Petersburg // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012105. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012105.
2. *Вильнер М. А., Стрешнев А. А., Онуприенко В. С.* Комплексное исследование напряженно-деформированного состояния целиков при отработке апатит-нефелиновых месторождений системой подэтажного обрушения // *Горный журнал*. — 2023. — № 5. — С. 80–87. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.12.
3. *Trushko O. V., Trushko V. L., Demenkov P. A.* Construction of underground and multi-story car parks in high-density urban areas // *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024, vol. 37, no. 2, pp. 224–236. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.02B.02.
4. *Franco V. H., Gitirana G. D. F. N., de Assis A. P.* Probabilistic assessment of tunneling-induced building damage // *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 113, article 103097. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103097.
5. *Salahudeen A. B., Yisa G. L.* Settlement, slope stability and seepage analyses by numerical modelling method and their applications in practice // *Nigerian Journal of Technology*. 2023, vol. 42, no. 3, pp. 306–314. DOI: 10.4314/njt.v42i3.2.
6. *Ninić J., Gamra A., Ghiassi B.* Real-time assessment of tunnelling-induced damage to structures within the building information modelling framework // *Underground Space*. 2024, vol. 14, pp. 99–117. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.05.010.
7. *Vitali O. P. M., Celestino T. B., Bobet A.* New modeling approach for tunnels under complex ground and loading conditions // *Soils and Rocks*. 2021, vol. 44, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.28927/SR.2021.052120.
8. *Maazallahi V., Majdi A.* Numerical appraisal of rock mass anisotropy effect on elastic deformations of a circular tunnel // *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13, article 547. DOI: 10.1007/s12517-020-05531-3.
9. *Алексеев А. В., Вербило П. Э.* Численное моделирование устойчивости лба забоя в зоне неоднородности при недренированной модели массива // *Известия Уральского государственного горного университета*. — 2019. — Т. 53. — № 1. — С. 80–87. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-80-87.
10. *Zhang Z., Chen Y., Han K., Wei G., Pan Y., Sun M.* Mathematical modelling for interaction between soft ground and small curvature shield tunneling considering viscoelastic characteristics influences // *Applied Mathematical Modelling*. 2024, vol. 127, pp. 607–639. DOI: 10.1016/j.apm.2023.12.020.
11. *Wang Z., Guo W., Ding W., Liu K., Qin W., Wang C., Wang Z.* Numerical study on the hydrodynamic properties of bentonite slurries with Herschel-Bulkley-Papanastasiou rheology model // *Powder Technology*. 2023, vol. 419, article 118375. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118375.
12. *Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V.* Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022, no. 12, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.
13. *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.

14. Wu H., Yang X. H., Cai S. C., Zhao B., Zheng K. Analysis of stress and deformation characteristics of deep-buried phyllite tunnel structure under different cross-section forms and initial support parameters // *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, article 8824793. DOI: 10.1155/2021/8824793.

15. Барях А. А., Девятков С. Ю., Денкевич Э. Т. Математическое моделирование развития процесса сдвижения при отработке калийных руд длинными очистными забоями // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 259. — С. 13 — 20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.

16. Cheng H., Chen J., Chen G. Analysis of ground surface settlement induced by a large EPB shield tunnelling: a case study in Beijing, China // *Environmental Earth Sciences*. 2019, vol. 78, article 605. DOI: 10.1007/s12665-019-8620-6.

17. Wang R., Zhang J., Liu X. A most-unfavorable-condition method for bridge-damage detection and analysis using PSP-InSAR // *Remote Sensing*. 2022, vol. 14, article 137. DOI: 10.3390/rs14010137.

18. Zhao C., Lavasan A. A., Hölter R., Schanz T. Mechanized tunneling induced building settlements and design of optimal monitoring strategies based on sensitivity field // *Computers and Geotechnics*. 2018, vol. 97, pp. 246 — 260. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.01.007.

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

20. 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.

21. Zhao Y., Chen X., Hu B., Huang L., Lu G., Yao H. Automatic monitoring and control of excavation disturbance of an ultra-deep foundation pit extremely adjacent to metro tunnels // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 142, article 105445. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105445.

22. Мазин С. В., Кузина А. В., Мишедченко О. А. Обоснование и результаты мониторинга деформаций здания в зоне влияния строительства тоннеля и котлована // *Транспортное строительство*. — 2022. — № 3. — С. 10 — 12.

23. Allasia P., Godone D., Giordan D., Guenzi D., Lollino G. Advances on measuring deep-seated ground deformations using robotized inclinometer system // *Sensors*. 2020, vol. 20, article 3769. DOI: 10.3390/s20133769.

24. Ha D. W., Kim J. M., Kim Y., Park H. S. Development and application of a wireless MEMS-based borehole inclinometer for automated measurement of ground movement // *Automation in Construction*. 2018, vol. 87, pp. 49 — 59. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.011.

25. Song H., Pei H., Zhu H. Monitoring of tunnel excavation based on the fiber Bragg grating sensing technology // *Measurement*. 2021, vol. 169, article 108334. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108334.

26. Li C., Hou S., Liu Y., Qin P., Jin F., Yang Q. Analysis on the crown convergence deformation of surrounding rock for double-shield TBM tunnel based on advance borehole monitoring and inversion analysis // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020, vol. 103, article 103513. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103513.

27. Falbe-Hansen K., Paulatto E., Arce Juliao I. Monitoring cityringen metro project in Copenhagen, Denmark // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Civil Engineering*. 2018, vol. 171, no. 5, pp. 39 — 47. DOI: 10.1680/jci.17.00024.

28. Nejjar K., Dias D., Caira F., Chapron G., Lebissonais H. Experimental study of the performance of a 32 m deep excavation in the suburbs of Paris // *Geotechnique*. 2022, vol. 73, no. 6, pp. 469 — 479. DOI: 10.1680/jgeot.21.00017.

29. Rezaei A. H., Ahmadi-adli M. The volume loss: real estimation and its effect on surface settlements due to excavation of Tabriz metro tunnel // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020, vol. 38, pp. 2663 — 2684. DOI: 10.1007/s10706-019-01177-5.

30. Волков В. П., Наумов С. Н., Пирожкова А. Н., Хралов В. Г. Тоннели и метрополитены. — М.: Транспорт, 1975. — 551 с.

31. Голицынский Д. М., Фролов Ю. С., Кулагин Н. И. Строительство тоннелей и метрополитенов. — М.: Транспорт, 1989. — 319 с.

32. Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A., Basova L. A. Face stability in heavy clay: theory and practice // *Journal of Mining Science*. 2022, vol. 58, pp. 234 — 245. DOI: 10.1134/S1062739122020077.

33. Соловьев Д. А., Анциферов С. В., Саммаль А. С., Деев П. В. Взаимодействие массива протерозойских глин с опережающей анкерной крепью // *Известия Тульского государственного*

университета. Науки о Земле. — 2022. — № 1. — С. 363–372. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-363-372.

34. Hsu C.-F., Tsai Y.-H., Chen Y.-R., Li Y.-F., Chen S.-L. Normalized analysis of deformation for deep excavation diaphragm walls under different neighboring building conditions // *Results in Engineering*. 2024, vol. 22, article 102155. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102155.

35. Frenelus W., Peng H., Zhang J. Creep behavior of rocks and its application to the longterm stability of deep rock tunnels // *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 17, pp. 1–35. DOI: 10.3390/app12178451.

36. Васенин В. А. Статистическая оценка параметров нарушения природной структуры лабораторных образцов глинистых отложений при инженерно-геологических изысканиях на территории Санкт-Петербурга и окрестностей // *Инженерная геология*. — 2018. — № 6. — С. 48–65. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65.

37. Дашко П. 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. **PLAB**

## REFERENCES

1. Novozhenin S. U., Vystrichil M. G., Bogdanova K. A. Analysis of the mathematical modelling results of displacements and deformations induced by the construction of the escalator tunnel of «Mining Institute» station in Saint Petersburg. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012105. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012105.

2. Vilner M. A., Streshnev A. A., Onuprienko V. S. Integrated stress-strain analysis of pillars in apatite-nepheline ore mining by sublevel caving. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 80–87. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.12.

3. Trushko O. V., Trushko V. L., Demenkov P. A. Construction of underground and multi-story car parks in high-density urban areas. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024, vol. 37, no. 2, pp. 224–236. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.02B.02.

4. Franco V. H., Gitirana G. D. F. N., de Assis A. P. Probabilistic assessment of tunneling-induced building damage. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 113, article 103097. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103097.

5. Salahudeen A. B., Yisa G. L. Settlement, slope stability and seepage analyses by numerical modelling method and their applications in practice. *Nigerian Journal of Technology*. 2023, vol. 42, no. 3, pp. 306–314. DOI: 10.4314/njt.v42i3.2.

6. Ninić J., Gamra A., Ghiassi B. Real-time assessment of tunnelling-induced damage to structures within the building information modelling framework. *Underground Space*. 2024, vol. 14, pp. 99–117. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.05.010.

7. Vitali O. P. M., Celestino T. B., Bobet A. New modeling approach for tunnels under complex ground and loading conditions. *Soils and Rocks*. 2021, vol. 44, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.28927/SR.2021.052120.

8. Maazallahi V., Majdi A. Numerical appraisal of rock mass anisotropy effect on elastic deformations of a circular tunnel. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13, article 547. DOI: 10.1007/s12517-020-05531-3.

9. Alekseev A. V., Verbilo P. E. Numerical modeling of stability of the forehead of the face in the area of heterogeneity with undrained array mode. *News of the Ural State Mining University*. 2019, vol. 53, no. 1, pp. 80–87. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-80-87.

10. Zhang Z., Chen Y., Han K., Wei G., Pan Y., Sun M. Mathematical modelling for interaction between soft ground and small curvature shield tunneling considering viscoelastic characteristics influences. *Applied Mathematical Modelling*. 2024, vol. 127, pp. 607–639. DOI: 10.1016/j.apm.2023.12.020.

11. Wang Z., Guo W., Ding W., Liu K., Qin W., Wang C., Wang Z. Numerical study on the hydrodynamic properties of bentonite slurries with Herschel-Bulkley-Papanastasiou rheology model. *Powder Technology*. 2023, vol. 419, article 118375. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118375.

12. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022, no. 12, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

13. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Prediction of the stress-strain state and stability of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 252–260. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.

14. Wu H., Yang X. H., Cai S. C., Zhao B., Zheng K. Analysis of stress and deformation characteristics of deep-buried phyllite tunnel structure under different cross-section forms and initial support parameters. *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, article 8824793. DOI: 10.1155/2021/8824793.
15. Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Denkevich E. T. Mathematical modelling of displacement during the potash ores mining by longwall faces. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 13 – 20. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.
16. Cheng H., Chen J., Chen G. Analysis of ground surface settlement induced by a large EPB shield tunnelling: a case study in Beijing, China. *Environmental Earth Sciences*. 2019, vol. 78, article 605. DOI: 10.1007/s12665-019-8620-6.
17. Wang R., Zhang J., Liu X. A most-unfavorable-condition method for bridge-damage detection and analysis using PSP-InSAR. *Remote Sensing*. 2022, vol. 14, article 137. DOI: 10.3390/rs14010137.
18. Zhao C., Lavasan A. A., Hölter R., Schanz T. Mechanized tunneling induced building settlements and design of optimal monitoring strategies based on sensitivity field. *Computers and Geotechnics*. 2018, vol. 97, pp. 246 – 260. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.01.007.
19. Bilotta E., Paolillo A., Russo G., Aversa S. Displacements induced by tunnelling under a historical building. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 61, pp. 221 – 232. DOI: 10.1016/j.tust.2016.10.007.
20. Hatoum H. M., Mustafin M. G. Optimization of locating robotic total stations for determining the deformations of buildings and structures. *Geodeziya i Kartografiya*. 2020, vol. 81, no. 9, pp. 2 – 13. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13.
21. Zhao Y., Chen X., Hu B., Huang L., Lu G., Yao H. Automatic monitoring and control of excavation disturbance of an ultra-deep foundation pit extremely adjacent to metro tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 142, article 105445. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105445.
22. Mazein S. V., Kuzina A. V., Mishedchenko O. A. Justification and results of building deformations monitoring in the influence zone of tunnel and pit construction. *Transport construction*. 2022, no. 3, pp. 10 – 12. [In Russ].
23. Allasia P., Godone D., Giordan D., Guenzi D., Lollino G. Advances on measuring deep-seated ground deformations using robotized inclinometer system. *Sensors*. 2020, vol. 20, article 3769. DOI: 10.3390/s20133769.
24. Ha D. W., Kim J. M., Kim Y., Park H. S. Development and application of a wireless MEMS-based borehole inclinometer for automated measurement of ground movement. *Automation in Construction*. 2018, vol. 87, pp. 49 – 59. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.011.
25. Song H., Pei H., Zhu H. Monitoring of tunnel excavation based on the fiber Bragg grating sensing technology. *Measurement*. 2021, vol. 169, article 108334. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108334.
26. Li C., Hou S., Liu Y., Qin P., Jin F., Yang Q. Analysis on the crown convergence deformation of surrounding rock for double-shield TBM tunnel based on advance borehole monitoring and inversion analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020, vol. 103, article 103513. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103513.
27. Falbe-Hansen K., Paulatto E., Arce Juliao I. Monitoring cityringen metro project in Copenhagen, Denmark. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*. 2018, vol. 171, no. 5, pp. 39 – 47. DOI: 10.1680/jci.17.00024.
28. Nejjar K., Dias D., Cui F., Chapron G., Lebissonnais H. Experimental study of the performance of a 32 m deep excavation in the suburbs of Paris. *Geotechnique*. 2022, vol. 73, no. 6, pp. 469 – 479. DOI: 10.1680/jgeot.21.00017.
29. Rezaei A. H., Ahmadi-adli M. The volume loss: real estimation and its effect on surface settlements due to excavation of Tabriz metro tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020, vol. 38, pp. 2663 – 2684. DOI: 10.1007/s10706-019-01177-5.
30. Volkov V. P., Naumov S. N., Pirozhkova A. N., Khrapov V. G. *Tonneli i metropoliteny* [Tunnels and subways], Moscow, Transport, 1975, 551 p.
31. Golitsynskiy D. M., Frolov Yu. S., Kulagin N. I. *Stroitel'stvo tonneley i metropolitenov* [Tunnels and subways construction], Moscow, Transport, 1989, 319 p.
32. Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A., Basova L. A. Face stability in heavy clay: theory and practice. *Journal of Mining Science*. 2022, vol. 58, pp. 234 – 245. DOI: 10.1134/S1062739122020077.
33. Soloviev D. A., Antsiferov S. V., Sammal A. S., Deev P. V. Interacting massif of proterozoic clays with advanced anchor lining. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2022, no. 1, pp. 363 – 372. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-363-372.

34. Hsu C.-F., Tsai Y.-H., Chen Y.-R., Li Y.-F., Chen S.-L. Normalized analysis of deformation for deep excavation diaphragm walls under different neighboring building conditions. *Results in Engineering*. 2024, vol. 22, article 102155. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102155.

35. Frenelus W., Peng H., Zhang J. Creep behavior of rocks and its application to the longterm stability of deep rock tunnels. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 17, pp. 1–35. DOI: 10.3390/app12178451.

36. Vasenin V. A. Evaluation of disturbed parameters of the natural structure of the laboratory samples of clay deposits during engineering and geological surveys in Saint Petersburg territory and nearest areas. *Inzhenernaya geologiya*. 2018, no. 6, pp. 48–65. [In Russ]. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65.

37. Dashko R. E., Lokhmatikov G. A. The Upper Kotlin clays of the Saint Petersburg region as a foundation and medium for unique facilities: an engineering-geological and geotechnical analysis. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 180–190. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Волохов Евгений Михайлович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: volohov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4430-4172,

*Киреева Вероника Игоревна* — канд. техн. наук,

независимый исследователь, e-mail: chacter@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9758-5871,

*Бритвин Илья Александрович*<sup>1</sup> — аспирант,

e-mail: britvini25@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1561-0835,

*Волошина Екатерина Александровна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: pravdina\_ea@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0009-0002-4510-7138,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

**Для контактов:** Бритвин И.А., e-mail: britvini25@yandex.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.M. Volokhov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Associate Professor, e-mail: volohov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4430-4172,

*V.I. Kireeva*, Cand. Sci. (Eng.),

Independent Researcher,

e-mail: chacter@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9758-5871,

*I.A. Britvin*<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: britvini25@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1561-0835,

*E.A. Voloshina*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Associate Professor,

e-mail: pravdina\_ea@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0009-0002-4510-7138,

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** I.A. Britvin, e-mail: britvini25@yandex.ru.

Получена редакцией 08.07.2024; получена после рецензии 29.08.2024; принята к печати 10.04.2025.

Received by the editors 08.07.2024; received after the review 29.08.2024; accepted for printing 10.04.2025.