

ПРОБЛЕМА ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В МАРКШЕЙДЕРСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ОХРАНЫ ЗДАНИЙ ОТ ВРЕДНОГО ВЛИЯНИЯ ПРОХОДКИ ВЫРАБОТОК МЕТРОПОЛИТЕНА

Д. З. Мукминова¹, Е. М. Волохов¹, М. О. Лебедев²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,
Россия, rectorat@spmi.ru

² ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, mail@lmgt.ru

Аннотация: Работа посвящена изучению процессов сдвижения и деформаций на земной поверхности при поэтапной проходке выработок метрополитена на примере станции метро «Театральная» в Санкт-Петербурге с использованием методов математического моделирования и выделению основных проблем обеспечения достоверности такого способа. Рассмотрены особенности строительства, физико-механические свойства пород, в которых производятся горнопроходческие работы. Произведен анализ натуральных данных маркшейдерских наблюдений на земной поверхности, в частности за историческим зданием Мариинского театра. При изучении процессов сдвижений использовался метод конечных элементов в программном комплексе Plaxis 3D с использованием данных натуральных маркшейдерских наблюдений на земной поверхности. Показана удовлетворительная сходимость данных натуральных маркшейдерских наблюдений на земной поверхности и результатов моделирования геомеханических процессов. По результатам исследований были выделены четыре основных этапа стабилизации вертикальных сдвижений на земной поверхности, рассчитаны значения наклонов и кривизны на каждом этапе строительства. Калибровка моделей осуществлялась таким образом, чтобы результаты математического моделирования и натуральных данных имели высокую сходимость на всех этапах строительства станционных выработок.

Ключевые слова: сдвижения и деформации земной поверхности, натурные данные, маркшейдерские наблюдения, станции метрополитена, наблюдательная станция, метод конечных элементов, моделирование геомеханических процессов, прогноз деформаций.

Для цитирования: Мукминова Д. З., Волохов Е. М., Лебедев М. О. Проблема достоверности оценки сдвижений и деформаций горных пород при использовании численного моделирования в маркшейдерском обеспечении охраны зданий от вредного влияния проходки выработок метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11-1. – С. 39–56. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_39.

The problem of reliability of the assessment of displacements and deformations of rocks when using numerical modeling in surveying the protection of buildings from the harmful effects of sinking underground workings

D. Z. Mukminova¹, E. M. Volokhov¹, M. O. Lebedev²

¹ St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, 199106, Russia, rectorat@spmi.ru

² OJSC "NIPPI Lenmetrogioprotrans", 191002, SaintPetersburg, Russia, mail@lmg.ru

Abstract: The work is devoted to the study of the processes of displacement and deformation on the Earth's surface during the phased excavation of the subway on the example of the Teatralnaya metro station in St. Petersburg using mathematical modeling methods and highlighting the main problems of ensuring the reliability of such a method. The features of construction, physical and mechanical properties of rocks in which mining operations are carried out are considered. The analysis of field data of surveying observations on the earth's surface, in particular on the historical building of the Mariinsky Theater, was carried out. When studying the processes of displacement, the finite element method was used in the Plaxis 3D software package using data from field surveying observations on the Earth's surface. Satisfactory convergence of the data of field surveying observations on the Earth's surface and the results of modeling geomechanical processes is shown. According to the results of the research, four main stages of stabilization of vertical movements on the earth's surface were identified, the values of slopes and curvature at each stage of construction were calculated. The calibration of the models was carried out in such a way that the results of mathematical modeling and field data had high convergence at all stages of the construction of station workings.

Key words: displacements and deformations of the Earth's surface, field data, surveying observations, metro stations, observation station, finite element method, modeling of geomechanical processes, deformation forecast.

For citation: Mukminova D. Z., Volokhov E. M., Lebedev M. O. The problem of reliability of the assessment of displacements and deformations of rocks when using numerical modeling in surveying the protection of buildings from the harmful effects of sinking underground workings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):39–56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_39.

Введение

На сегодняшний день развитие транспортной инфраструктуры городов-миллионников из-за возрастающей нагрузки на наземный городской транспорт, связанной с большими темпами освоения новых территорий под застройку жилых комплексов, рассчитанных на несколько тысяч людей, невозможно представить без проектирования и строительства новых станций метрополитена [1, 2]. Учитывая большое сечение станционных выработок, создаются условия для проявле-

ния деформаций на земной поверхности, что определяет проблему охраны зданий и сооружений от негативного воздействия горнопроходческих работ, особенно в районах с плотной исторической застройкой [3], где много зданий со статусом «Объект культурного наследия народов РФ федерального значения».

Проблема обеспечения прогноза и оценки вредного влияния подземного строительства на массив и здания и сооружения, попадающие в зону деформаций от горнопроходческих работ,

по-прежнему является малоизученной и очень актуальной [4, 5]. Одним из наиболее перспективных решений для комплексного и детального изучения данной проблемы является метод математического моделирования, получивший широкую популярность среди зарубежных [6, 7] и российских [8, 9] ученых-исследователей. Прогнозная оценка такого влияния должна учитывать физико-механические свойства породных массивов [10], их пространственную изменчивость, анизотропию свойств, физическую нелинейность, неоднородность и трещиноватость массивов [11, 12], их реологические характеристики [13, 14], влияние геологических процессов, а также технологические свойства строительства [15, 16]. Такой подход к изучению и прогнозу деформационных процессов позволит одновременно учитывать множество факторов, что может обеспечить достоверность полученных данных.

Для контроля спрогнозированных деформаций необходимо использовать комплексный подход методов математического моделирования и мониторинга деформационных процессов на земной поверхности и массива [17–19], так как результаты моделирования могут существенно отличаться от действительности [20].

Охрана зданий и сооружений при подземном строительстве требует комплексного подхода, одной из главных составляющих которого является маркшейдерско-геодезические профильные линии (специальная наблюдательная сеть) [21, 22]. Маркшейдерский мониторинг позволяет улучшить контроль за деформациями земной поверхности, а также способствует получению оперативной информации по деформациям подрабатываемых сооружений. До начала строительства станции метро «Театральная» была заложена

маркшейдерско-геодезическая наблюдательная станция (рис. 1), периодичность наблюдений составляла 1 раз в 2 недели.

При строительстве станционного комплекса «Театральная» Лахтинско-Правобережной линии Санкт-Петербургского метрополитена в зону влияния работ попадало здание Исторической сцены Государственного академического Мариинского театра, являющееся объектом культурного наследия федерального значения. На начало 2021 года здание театра уже было подработано несколькими выработками станционного комплекса и получило существенные деформации, но основные — при проходке самых крупных выработок комплекса. Средний станционный тоннель (ССТ) диаметром 9,8 м, боковые станционные тоннели по I и II путям (БСТ I и БСТ II) диаметром 8,5 м ещё не приблизились к зданию театра. За счет большого сечения указанных выработок и близкого расположения их друг к другу проходка в зоне восточного торца станции должна была оказывать существенное влияние на земную поверхность и повышать уровень повреждений здания театра.

Методы

Прогноз деформаций земной поверхности выполнялся на основании численного моделирования в программном комплексе Plaxis 3D.

Метод конечных элементов позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние неоднородного, анизотропного, нелинейного массива с разными физико-механическими свойствами, учитывая параметры заданной крепи и обеспечивая возможности поэтапного моделирования, в том числе опирающегося на технологию проходки.

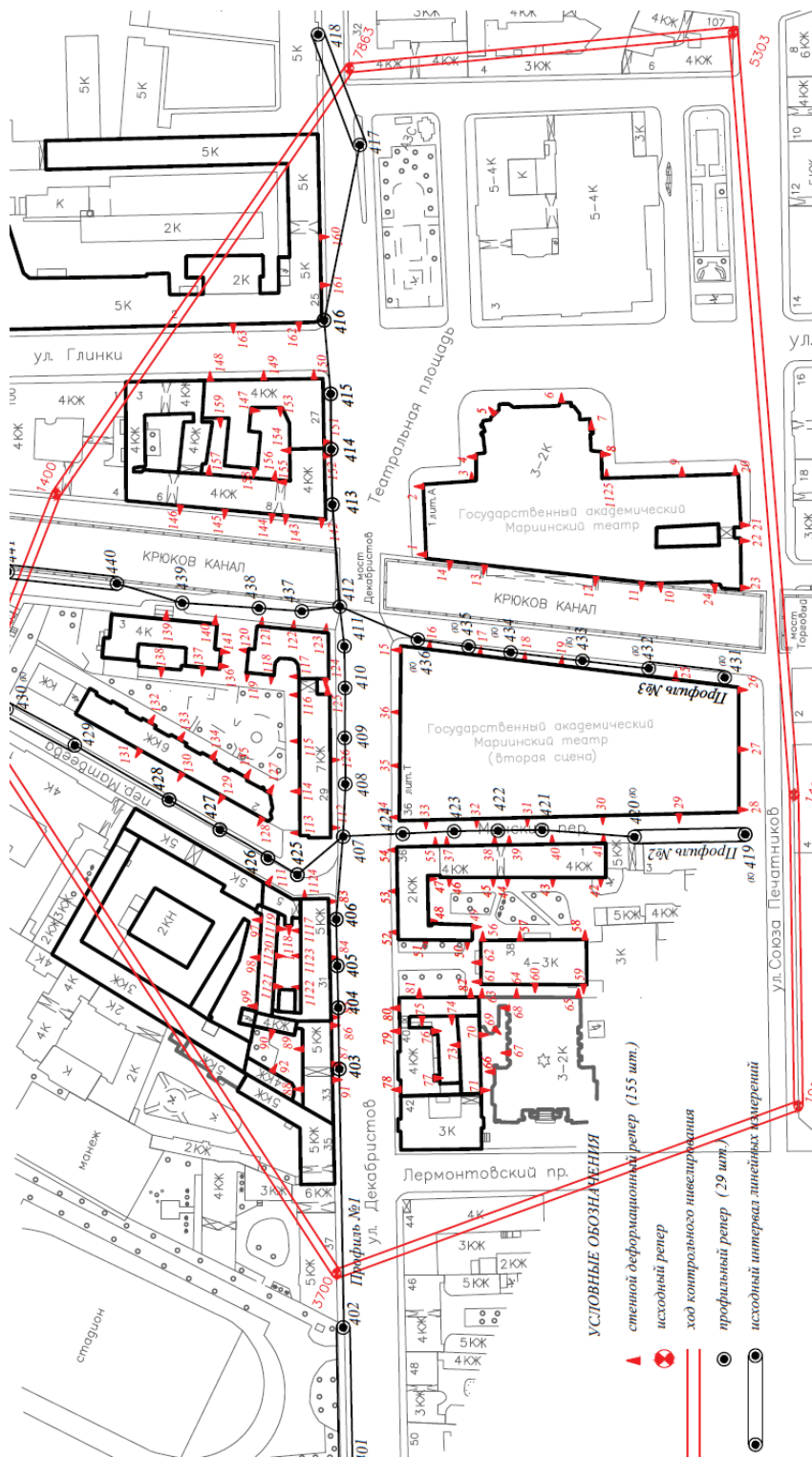


Рис. 1. Наблюдательная станция ООО «ГИРО» [составлено авторами]
 Fig. 1. Observation station of GIRO LLC

Комбинация данных натуральных маркшейдерских наблюдений и численного моделирования геомеханических процессов позволяет обеспечивать достоверность такой оценки деформаций на количественном уровне, а подобные модели позволяют выходить на прогнозную методику оценки сдвижений и деформаций.

На этапе оценки влияния горных работ на земную поверхность с помощью численного моделирования актуальным является корректный выбор модели поведения грунта и физико-механических параметров грунта расчетной модели для получения достоверной картины напряжённо-деформированного состояния (НДС) породного массива. По результатам исследований на первичных этапах, при верификации моделей, ввиду схожести данных результатов математического моделирования с натурными данными, было принято решение в дальнейших исследованиях использовать упруго-пластическую модель с упрочнением грунта (*HS — Hardening Soil*) [23].

Идеальная упругопластическая модель с упрочнением грунта включает в себя следующие параметры: модуль деформации при трехосном нагружении E_{50} , при разгрузке E_{ur} и одометрический модуль E_{oed} , коэффициент Пуассона (ν), угол внутреннего трения (φ), сцепление (c) и угол дилатансии (ψ). Данные параметры берутся из инженерно-геологических испытаний [24].

Обоснование конечно-элементных моделей и их параметров

Обширные возможности численных методов геомеханики, прикладных программных комплексов и современных вычислительных средств позволяют повысить качество прогнозирования деформационных процессов при усложнении модели, за счет ввода в рассмотрение всё большего количе-

ства влияющих факторов и свойств геологических и строительных объектов, а между тем именно высокая сложность модели может привести к снижению достоверности оценки геомеханических процессов, нарушить логику интерпретации причинно-следственных связей и даже к ошибочной оценке последствий горных работ. Кроме того, усложнение моделей ограничивается реальными возможностями применяемых сегодня инженерных изысканий. Поэтому одним из условий обеспечения достоверности является обоснованное упрощение моделей, выделение и учёт в расчётах базовых факторов и особенностей объектов.

При выполнении численных расчетов все инженерно-геологические элементы (ИГЭ) представлены горизонтальным залеганием литологических разностей, мощность геологических элементов относительно выдержана, наличие грунтовых вод в модели не учитывалось в связи с ограниченностью инженерно-геологических данных. Каждому геологическому слою присвоены физико-механические характеристики, представленные в табл. 1.

На рис. 2 представлена модель с упрощенным залеганием грунтов, геометрическим представлением всех стационарных выработок будущего метро «Театральная» и фундамента исторического здания Мариинского театра.

Необходимо отметить, что по причине пространственной изменчивости физико-механических свойств грунтов исследовались конечно-элементные модели, в которых общий модуль деформации кембрийских глин (слой 14/2) варьировался от 75 МПа до 200 МПа. В качестве теста для оценки влияния выбранных расчетных параметров на результаты про-

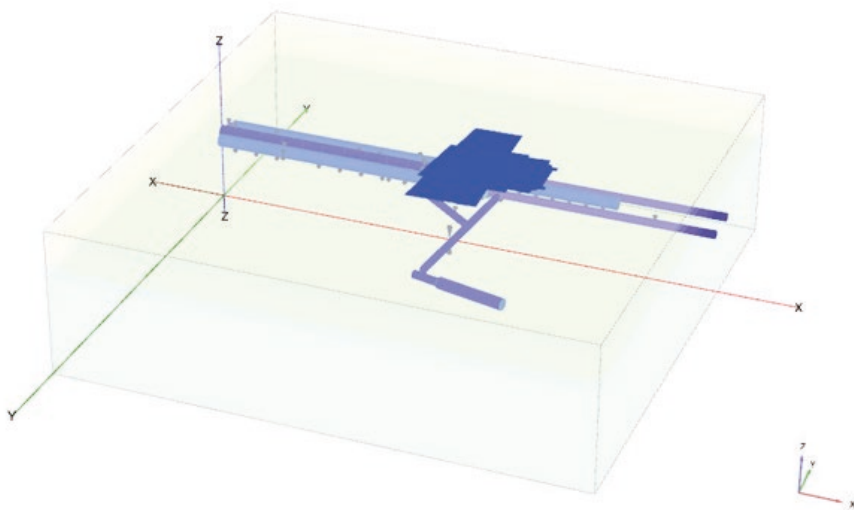


Рис. 2. Модель массива с упрощенным залеганием грунтов с геометрическим представлением численной модели прогноза развития деформаций при сооружении станции «Театральная» [составлено авторами]

Fig. 2. A model of an array with simplified soil occurrence with a geometric representation of a numerical model for predicting the development of deformations during the construction of the Teatralnaya station

Таблица 1

Параметры упругопластической модели Hardening-Soil, принятые при выполнении численного моделирования [составлено авторами]

Parameters of the Hardening-Soil elastoplastic model adopted during numerical modeling

Слой ИГЭ	γ_{sat} , кН/м ³	m, м	E_{50} , МПа	E_{oed} , МПа	E_{ur} , МПа	c' , кПа	ϕ' , °	ν
1	20	0,9	10 000	10 000	30 000	5	10	0,3
5/5	19,5	2	15 000	15 000	45 000	1	32	0,36
6/11	19,2	7,5	7 500	7 500	22 500	16	15	0,35
7/13	21	14,5	16 000	16 000	48 000	38	23	0,35
14/1	21,5	7	50 000	50 000	150 000	50	21	0,35
14/2	21,8	—	100 000	100 000	300 000	130	23	0,35

гноза напряженно-деформированного состояния грунтового массива был выполнен расчет системы «грунтовой массив – подземное сооружение» на этапе завершения строительства подземного комплекса станционных выработок. Для расчета приняты следующие значения модуля общей дефор-

мации: $E=75$ МПа; 100 МПа; 200 МПа. На рис. 3 показано распределение вертикальных сдвижений в произвольном сечении модели. Наибольшие значения деформаций ожидаемо получены расчетом по модели с модулем $E=75$ МПа, наименьшие – $E=200$ МПа. Таким образом, расчеты по модели с моду-

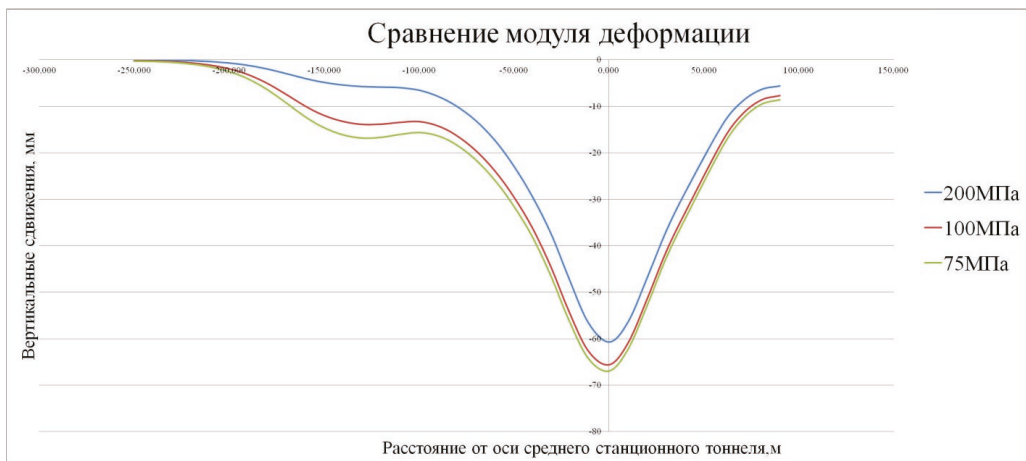


Рис. 3. Распределение оседаний в тестовой модели [составлено авторами]
 Fig. 3. Subsidence distribution in the test model

лем общей деформации в 200 МПа дают несколько заниженные результаты оседания земной поверхности. При этом оседания, взятые по моделям в 100 МПа и 75 МПа, целесообразно использовать в качестве запаса в расчетной оценке, так как физико-механические свойства рассматриваемых инженерно-геологических элементов характеризуются большой пространственной изменчивостью за счет трещиноватости и различных техногенных факторов.

Так как в работе в качестве критериев негативного влияния горных работ на земную поверхность и Мариинский театр в приоритете рассматривались деформации — наклоны и кривизна, разумным будет сравнивать модели именно по этим параметрам.

По графикам (рис. 4, 5) можно видеть, что в пределах от -130 до 80 м от оси среднего станционного тоннеля значения наклонов и кривизны в моделях с разными свойствами различаются в среднем в пределах 10–12%. Существенная разница в значениях деформаций проявляется на расстоянии -130 м от оси ССТ и дальше. Следует отметить, что рассматриваемая модель

Мариинского театра и все интересующие объекты находятся на расстоянии -125–80 м от оси ССТ. Помимо этого, достоверность полученных численных значений была определена сравнением их со значениями, зафиксированными в натуральных условиях.

Поэтому можно заключить, что при анализе всех трех моделей, рассматриваемых в исследовании, существенной разницы между оцениваемыми показателями деформаций нет (абсолютные значения деформаций варьируются в пределах 10–12% в зависимости от заданных свойств грунта). Использование моделей, применяемых в данном исследовании, не противоречит результатам мониторинга сдвижений и деформаций земной поверхности и дает достоверные результаты прогноза деформаций.

Методология построения численных моделей

При численном моделировании деформаций на земной поверхности от вредного влияния строительства подземных сооружений станции метро «Театральная» выделены два основных периода стабилизации оседаний:

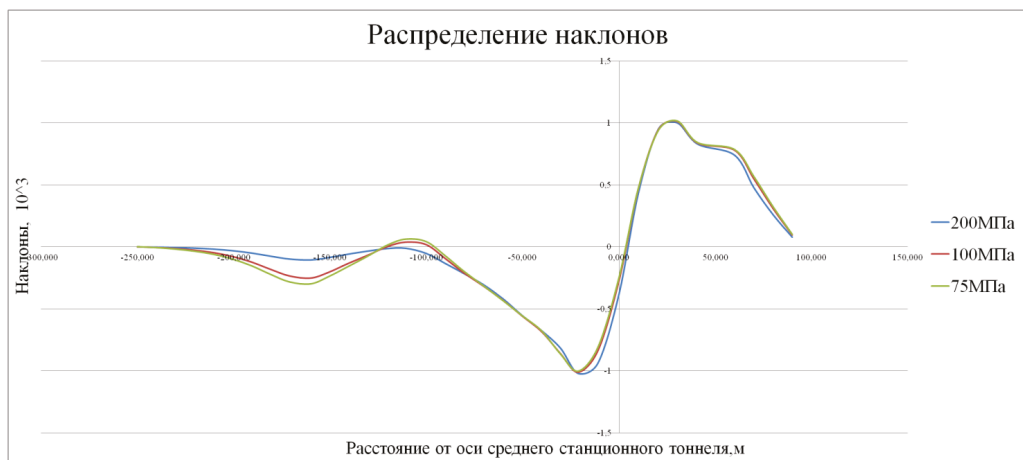


Рис. 4. Распределение наклонов в тестовой модели [составлено авторами]
 Fig. 4. Slope distribution in the test model

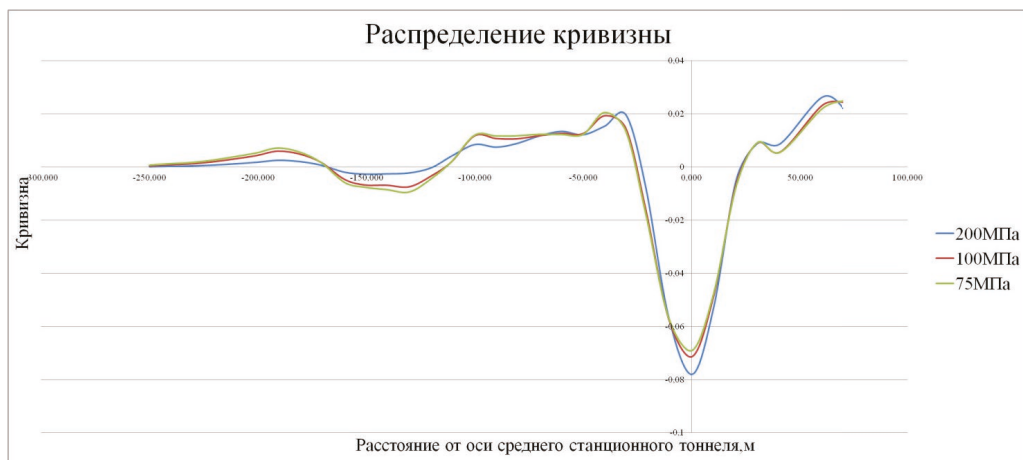


Рис. 5. Распределение кривизны в тестовой модели [составлено авторами]
 Fig. 5. Curvature distribution in the test model

Первый этап — численное моделирование при строительстве станционных выработок (глубина заложения 53 м). На данном этапе оценивается поэтапная проходка и монтаж обделки уже пройденных тоннелей и данные результатов математического моделирования сравниваются с данными маркшейдерских наблюдений на земной поверхности.

Второй этап — численное моделирование, позволяющее выполнить прогноз развития деформаций от проходки бокового станционного тоннеля II пути.

На первом и втором этапах размеры моделей приняты равными: в плане: $x_{\min} = 0$, $x_{\max} = -350$, $y_{\min} = -250$ и $y_{\max} = 90$; по высоте — 100 м, что является достаточным для исключения влияния граничных условий для расчета моделей. Всего было построено около 20 моделей с общим количеством элементов (узлов) 160–180 тыс.

Также в работе было учтено исходное (природное) напряженное состояние породного массива. В прогнозных оценках сдвижений и деформаций зача-

стью применяют известные теории академика Динника, однако, как показали наши исследования, для большинства глинистых пород эта теория плохо применима. Исходное напряженное состояние массивов глинистых пород (в условиях города Санкт-Петербурга) близко к гидростатическому, поэтому должно рассматриваться в расчётах как квазигидростатическое.

Результаты

При обработке натуральных данных маркшейдерских наблюдений были выделены четыре основных этапа стабилизации вертикальных сдвижений на земной поверхности:

– июнь 2018 г. — проходка НВУ 574 и руддвора;

– февраль 2020 г. — строительство пилот-тоннелей и подходных выработок;

– июнь 2021 г. — проходка ТПП, соединительных тоннелей на БСТ I и БСТ II пути;

– июль 2022 г. — проходка БСТ I, ССТ, БСТ II.

Результаты моделирования распределения оседаний по фундаменту здания Мариинского театра по всем четырем этапам на земной поверхности представлены на рис. 6.

Моделирование поэтапной проходки станционного комплекса «Театральная» показал, что наибольшие значения оседаний сконцентрированы на углу здания, находящемся на пересечении улицы Декабристов и набережной Крюкова Канала, что подтверждается маркшейдерскими наблюдениями за стенными реперами.

Активизация оседаний на углу здания наблюдается в июне 2018 года и достигает 20–22 мм по результатам моделирования. Данный эффект является следствием проходки и бетонирования подходного тоннеля, который

проходит под зданием Мариинского театра. Далее при строительстве станционных выработок происходит «накопительный эффект» от уже пройденных и новых тоннелей, оседания возрастают до 52–53 мм на момент проходки всех станционных выработок.

Достоверность результатов моделирования обуславливается высокой схожимостью с данными натурального маркшейдерско-геодезического мониторинга наблюдательных станций (см. рис. 1).

Для определения схожимости результатов математического моделирования и натуральных данных также была рассмотрена цепочка грунтовых реперов, расположенных по ул. Декабристов (Рр. 407–416) и набережной Крюкова Канала (Рр. 435–436) (табл. 2). Такой выбор обусловлен тем, что данные реперы попадают в размеры модели в плане (рис. 7).

Расхождение реперов 408–411 связаны с компенсационным нагнетанием для защиты зданий, проводимым по ул. Декабристов, д. 29, которое не было учтено в моделях ввиду отсутствия данных.

Согласно результатам данных математического моделирования, максимальные оседания на углу здания (пересечение ул. Декабристов и набережной Крюкова Канала) не превышают 60 мм от влияния проходки БСТ II пути (значения оседаний по данным маркшейдерских наблюдений на конец 2023 года составляют 49–50 мм). Максимальные оседания сконцентрированы над осью ССТ и не превышают 70 мм, наклоны и кривизна равны $-1 \cdot 10^{-3}$ и 0,062 мм/м соответственно.

На сегодняшний момент строительство крупных станционных выработок завершено, существенного прироста деформаций в дальнейшем не ожидается.

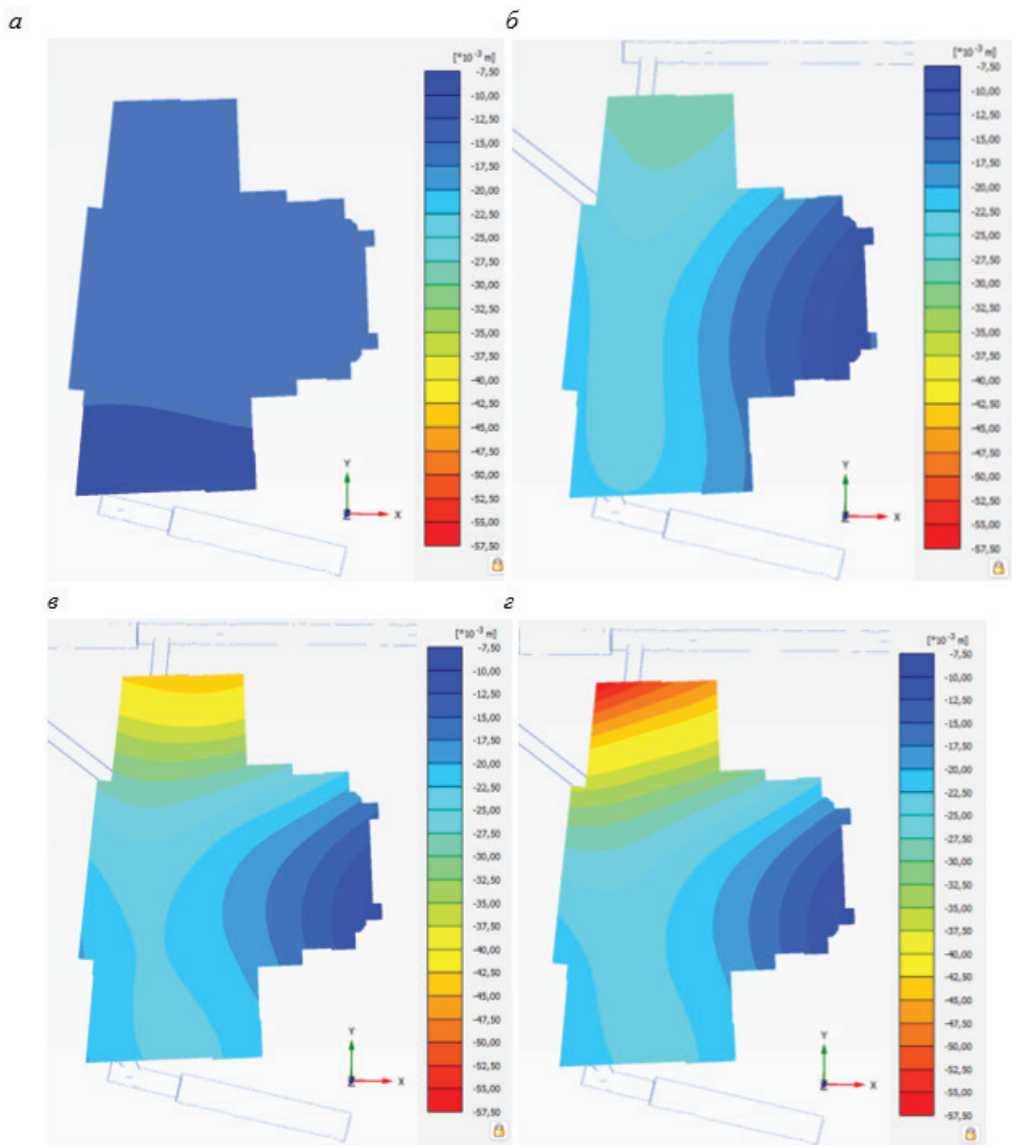


Рис. 6. Распределение вертикальных сдвижений по контуру здания Мариинского театра: а – июнь 2018 г., б – февраль 2020 г., в – июнь 2021 г., г – июль 2022 г. [составлено авторами]
 Fig 6. Vertical displacement distributions along the contour of the Mariinsky Theatre: a – June 2018, b – February 2020, c – June 2021, d – July 2022

Обсуждение результатов

При сопоставлении результатов натурных наблюдений задачей было подобрать такой параметр, учитывающий качество выполнения тампонажа c_{ref} , который бы описывал смещение

земной поверхности на момент окончания строительства.

При моделировании станционного комплекса «Театральная» учитывалось поэтапное строительство подземных выработок. На каждой фазе расчета

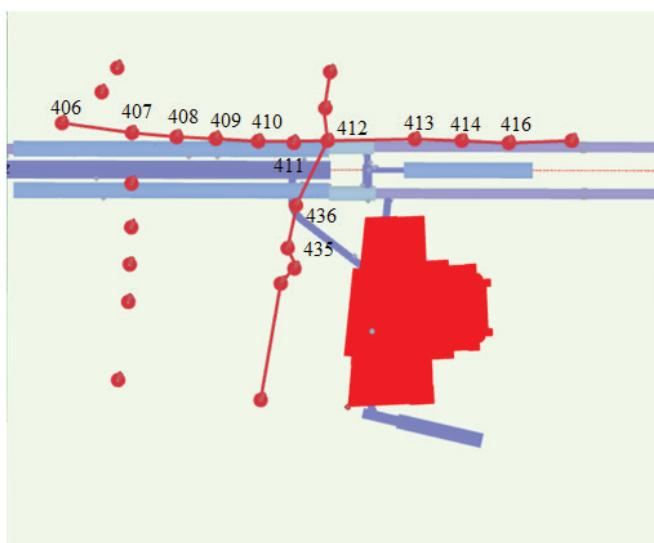


Рис. 7. Реперы наблюдательной станции, попадающие в параметры математической модели [составлено авторами]

Fig. 7. The reference points of the observation station that fall into the parameters of the mathematical model

Таблица 2

Результаты сравнения данных математического моделирования и натуральных данных (на июнь–июль 2022 года) [составлено авторами]

Results of comparison of mathematical modeling data and field data (for June–July 2022)

№ Rp	По данным натуральных наблюдений	По результатам моделирования
406	–50	–47
407	–46	–52
408	–43	–66
409	–42	–63
410	–32	–64
411	–24	–53
412	–33	–43
413	–27	–33
414	–28	–31
415	–29	–32
416	–26	–24
435	–26	–30
436	–36	–42

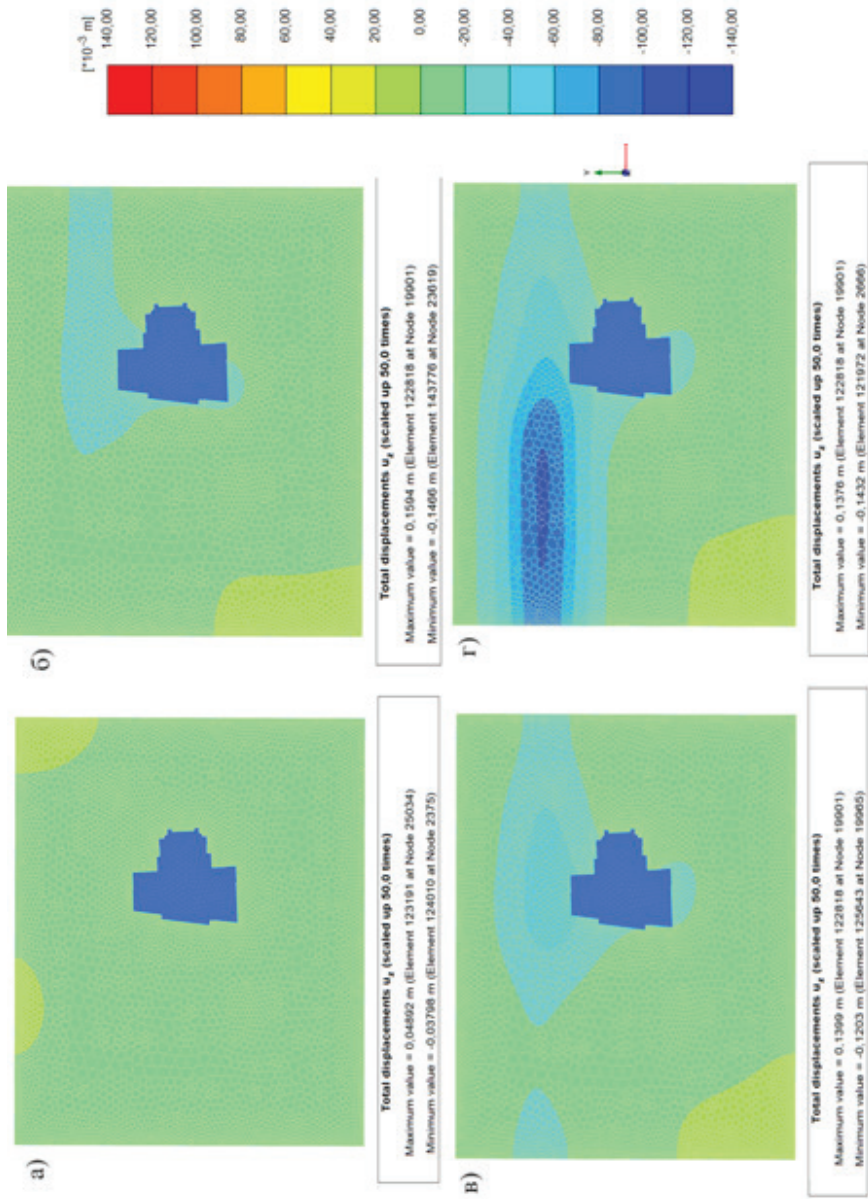


Рис. 8. Оседания поверхности в результате строительства горных выработок (а – июнь 2018 г., проходка НВУ 574 и руддвора; б – февраль 2020 г., строительство пилот-тоннелей, подходов БСТ I, ССТ, БСТ II); в – июль 2022 г., проходных выработок; г – июль 2021 г., проходка ТПП, соединительных тоннелей на БСТ I и БСТ II); з – июль 2022 г., проходка БСТ I, ССТ, БСТ II) [составлено авторами]

Fig. 8. Surface subsidence as a result of mining construction (a – June 2018, b – February 2020, c – June 2021, d – July 2022)

был произведен подбор коэффициента c_{ref} для каждой выработки, в зависимости от ее сечения.

Таким образом, после расчета каждой фазы производилось сравнение с результатами натуральных маркшейдерско-геодезических измерений, соответствующих дате измерений и дате проходки выработок. Разница не превышала 7–8 мм.

Оседания земной поверхности по результатам моделирования по ранее выделенным этапам вертикальных сдвижений приведены на рис. 8.

Обобщение данных калибровки параметров модели по данным маркшейдерских наблюдений позволило выделить результирующие показатели коэффициента перебора сечения тоннеля c_{ref} для подземных выработок станционного комплекса «Театральная». Установлено, что коэффициент перебора сечения меняется в пределах от 1,7 до 2% (5% в исключительных случаях):

– подходной тоннель № 1 — $c_{ref} = 5\%$ во время проходки, далее $c_{ref} = 2\%$, это связано с тем, что была нарушена технология строительства ходка, что вызвало активацию сдвижений в массиве и на земной поверхности; далее, после стабилизации сдвижений, влияние от проходки подходного тоннеля снизилось;

– подходной тоннель № 2, технологические ходки между соединительными тоннелями и ТПП — $c_{ref} = 2\%$:

– средний станционный тоннель (ССТ), боковой станционный тоннель I пути (БСТ I), боковой станционный тоннель II пути (БСТ II), тягово-понижительная подстанция (ТПП), соединительные тоннели БСТ I и II пути — c_{ref} составил 1,7%.

Предложения

Среди факторов, влияющих на достоверность моделирования гео-

механических процессов при строительстве подземных сооружений, можно выделить:

– сложность моделей и процедуры упрощения-усложнения моделей;

– анализ влияния и назначение граничных условий;

– правильный учёт исходного (природного) напряженного состояния массивов;

– учёт самих зданий и сооружений в моделях;

– качество входных параметров моделей;

– влияние технологических параметров станционных выработок на сдвижения;

– калибровка и верификация (валидация) моделей по натурным данным;

– применение схемы актуализации прогноза («текущего прогноза») или прогноза прироста деформаций после калибровки моделей;

– влияние реологических свойств пород и массивов.

Проведенное исследование показало, что проблема обеспечения достоверности геомеханических расчётов сложна и обширна, поэтому никак не может рассматриваться в рамках одного исследования. Наиболее перспективными направлениями дальнейшего усовершенствования этих подходов являются разработки в области учета технологических параметров основных горностроительных работ и специальных технологий, рассмотрения механизмов и закономерностей развития повреждений в подрабатываемых объектах, учёта реологических параметров развития деформационных процессов, совершенствования методов и технических средств мониторинга деформаций.

Заключение

По результатам анализа проблемы обеспечения достоверности сдвиже-

ний и деформаций на базе численного моделирования и проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- для обеспечения достоверности прогнозирования деформационных процессов необходимо обоснованное упрощение моделей с выделением базовых факторов и особенностей объектов;

- залогом обеспечения достоверности прогнозной оценки численными методами является корректная верификация, калибровка моделей по натурным маркшейдерским данным с наблюдательных станций (стенные и грунтовые реперы);

- обилие методов и средств обеспечения калибровки численных моделей может создавать определенную неоднозначность оценки качества моделей, однако ориентация на теоретически обоснованные и выверенные средства калибровки, опорные параметры и оценка погрешности способны обеспечить удовлетворительное качество калибровки. К таким средствам можно отнести инструмент обеспечения заданного уменьшения площади сечений выработок, реализованный в ПО PLAXIS; его эффективность показана нами здесь на примере подработки здания Мариинского театра. Однако при подтвержденной корректности работы для плоских сечений выработок, данный инструмент имеет определенные ограничения, которые нужно учитывать в геометрически сложных моделях;

- необходимым элементом в обеспечении достоверности является учёт технологических параметров поэтапной проходки выработок (способов и скоростей разработки породы, временного и постоянного крепления, параметров нагнетания и т.п.). Как показывает анализ реальных горных работ, развитие

деформаций во многом определяется этими параметрами, а сама группа этих факторов может оцениваться как наиболее востребованная в анализе;

- как одно из средств обеспечения учёта текущих технологических особенностей горно-строительных работ на конкретных объектах также могут рассматриваться натурные маркшейдерские данные с наблюдательных станций на самом строящемся объекте. В этом случае можно рассматривать режим актуализации прогноза, когда имеющиеся натурные данные регулярно используются для калибровки моделей, а прогноз распространяется на оставшиеся стадии строительства;

- для целей постадийного прогнозирования или режима актуализации прогноза деформаций на сложных объектах типа станционных и пересадочных комплексов метрополитена предлагается рассматривать укрупненные стадии, выделенные на основе выявленных интервалов «затишья горных работ» или стабилизации деформаций. Такой подход был реализован на представленном в исследовании объекте подработке — здании Исторической сцены Мариинского театра, который показал свою эффективность (расхождение прогноза с натурными данными по оседаниям на здании не превышали 15–20%) и может быть рекомендован в дальнейшей практике охраны зданий.

Вклад авторов

Мукминова Д. З. — обработка исходных данных, математическое моделирование, написание текста статьи.

Волохов Е. М. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, работа над текстом и редактирование окончательной версии.

Лебедев М. О. — получение данных для анализа.

Благодарности

Авторы выражают благодарность маркшейдерской службе АО «Метрострой Северной столицы» за предо-

ставление проекта производства работ и ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» за предоставление данных мониторинга за сдвигами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *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.

3. *Шокер Х. М., Мустафин М. Г.* Геодезическое обеспечение использования технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия // Геодезия и картография. — 2021. — № 2. — С. 2–10. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-968-2-2-10.

4. *Pascariello M. N., Luciano A., Bilotta E., Acikgoz S., Mair R.* Numerical modelling of the response of two heritage masonry buildings to nearby tunneling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 131 (2). DOI: 10.1016/j.tust.2022.104845.

5. *Дарбинян Т. П., Мушкетенов Т. С., Цымбалов А. А., Плешко М. С.* Оценка напряженно-деформированного состояния породного массива и крепи сверхглубоких выработок рудника «Скалистый» с учетом технологического фактора // *Горный журнал*. — 2023. — № 1. — С. 113–118. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.19.

6. *Guo X., Wang Z., Geng P., Chen C., Zhang J.* Ground surface settlement response to subway station construction activities using pile-beam-arch method // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 108. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103729.

7. *Namazi E., Mohamad H., Hajihassani M.* 3D Behaviour of Buildings due to Tunnel Induced Ground Movement // *Transportation Geotechnics*. 2021, vol. 31. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100661.

8. *Деменков П. А., Романова Е. Л.* Анализ подходов к расчету крепи вертикальных стволов в зонах тектонических нарушений // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2022. — № 4. — С. 223–236.

9. *Волохов Е. М., Мукминова Д. З.* Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения // *Записки Горного института*. — 2021. — Т. 252. — С. 826–839. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5.

10. *Ильинов М. Д., Коршунов В. А., Поспехов Г. Б., Шоков А. Н.* Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // *Горный журнал*. — 2023. — № 11. — С. 49–69. DOI: 10.25018/0236_14_93_2023_11_0_49.

11. *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.

12. *Протосеня А. Г., Иовлев Г. А.* Прогноз напряженно-деформируемого состояния в окрестности подземного сооружения в нелинейно-деформируемых грунтовых массивах // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2020. — № 2. — С. 215–228.

13. *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.

14. *Belikov A. A., Beliakov N. A.* Method of numerical modeling of rheological processes on the contour of single mine working // *Mining informational and analytical bulletin*. 2024, no. 1, pp. 94–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_94.

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. *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.

17. *Yang H., Xu X.* Structure monitoring and deformation analysis of tunnel structure // *Composite Structures*. 2021, no. 276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114565.

18. *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.


19. *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. — № 11. — С. 40–49. DOI: 10.22389/0016-7126-989-11-40-49.

20. *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.

21. *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(3). — С. 432–443. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-432-443.

22. *Ilyukhin D. A., Ivanik S. A., Vystrchil M. G., Kachan D., Savchenko A.* Technologies for obtaining and processing of space radar images for monitoring the state of the Earth's surface // *Journal of Physics: Conference*. 2020, vol. 1661(1), 012042.

23. *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. — Т. 13. — № 6. — С. 48–65. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65.

24. *Khandouzi G., Khosravi M. H.* An analytical investigation of soil arching induced by tunneling in sandy ground // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 140, 105242. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105242. 

REFERENCES

1. Alkhimova N. V., Mazein S. V. The St. Petersburg metro: in anticipation of rapid development. *Metro and tunnels*. 2023, vol. 1, pp. 8–23. [In Russ].

2. Molotkova E. G. The experience of building settlement on Admiralteysky Island. 1805–1840. *Academia. Architecture and construction*. 2022, no. 1, pp. 94–103. [In Russ]. DOI: 10.22337/2077-9038-2022-1-94-103.

3. Choker H. M., Mustafin M. G. Geodesic support of laser scan technology use for fixing cultural heritage objects. *Geodezia i Kartografiya*. 2021, vol. 82(2), pp. 2–10. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-968-2-2-10.

4. Pascariello M. N., Luciano A., Bilotta E., Acikgoz S., Mair R. Numerical modelling of the response of two heritage masonry buildings to nearby tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 131 (2). DOI: 10.1016/j.tust.2022.104845.

5. Darbinyan T. P., Mushtekerov T. S., Tsymbalov A. A., Pleshko M. S. Stress-Strain behavior assessment in rock mass and mine support systems on super deep levels in skality mine with regard to technology factor. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 113–118. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.19.
6. Guo X., Wang Z., Geng P., Chen C., Zhang J. Ground surface settlement response to subway station construction activities using pile–beam–arch method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 108. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103729.
7. Namazi E., Mohamad H., Hajihassani M. 3D Behaviour of Buildings due to Tunnel Induced Ground Movement. *Transportation Geotechnics*. 2021, vol. 31. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100661.
8. Demenkov P. A., Romanova E. L. Analysis of approaches to calculation of vertical shaft support in tectonic disturbance zones. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022, vol. 4, pp. 223–236. [In Russ].
9. Volokhov E. M., Mukminova D. Z. Deformations assessment during subway escalator tunnels construction by the method of artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 826–839. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5.
10. Ilinov M. D., Korshunov V. A., Pospikhov G. B., Shokov A. N. Integrated experimental research of mechanical properties of rocks: Problem and solutions. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 11, pp. 49–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_49.
11. Vasenin V. A. Evaluation of disturbed parameters of the natural structure of the laboratory samples of deposits during engineering geological surveys Saint-Petersburg territory and nearest areas. *Engineering geology world*. 2018, no. 6, pp. 48–65. [In Russ]. DOI: 10.25296/1993–5056–2018–13–6–48–65.
12. Protosenya A. G., Iovlev G. A. Stress-strain state prediction surrounding underground structures, constructed in nonlinear deformed medium-soft soils. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2020, no. 2, pp. 215–228. [In Russ].
13. 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.
14. Belikov A. A., Beliakov N. A. Method of numerical modeling of rheological processes on the contour of single mine working. *Mining informational and analytical bulletin*. 2024, no. 1, pp. 94–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_94.
15. Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Denkevich E. T. Mathematical modeling 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. 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.
17. Yang H., Xu X. Structure monitoring and deformation analysis of tunnel structure. *Composite Structures*. 2021, no. 276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114565.
18. 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.
19. Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O., Mustafin M. G. Creating highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodezia i Kartografiya*. 2022, vol. 11, pp. 40–49. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016–7126–989–11–40–49.
20. Vystrichil M. G., Gusev V. N., Sukhov A. K. A method of determining the errors of segmented GRID models of open-pit mines constructed with the results of unmanned aerial photogrammetric survey. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 562–570. [In Russ].
21. Afonin D. A., Kavkazskiy V. N., Nikitchin A. A. Operation geodetic check of bottom-hole zone deformations at innovative tunneling technologies. *Proceedings of Petersburg*

Transport University. 2022, vol. 19(3), pp. 432–443. [In Russ]. DOI: 10.20295/1815–588X-2022–3-432–443.

22. Ilyukhin D. A., Ivanik S. A., Vystrchil M. G., Kachan D., Savchenko A. Technologies for obtaining and processing of space radar images for monitoring the state of the Earth's surface. *Journal of Physics: Conference*. 2020, vol. 1661(1), 012042.

23. 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, vol. 13, no. 6, pp. 48–65. [In Russ]. DOI: 10.25296/1993–5056–2018–13–6-48–65.

24. Khosravi M. H. An analytical investigation of soil arching induced by tunneling in sandy ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 140, 105242. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105242.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Мукминова Диана Зинуровна*¹ — канд. техн. наук, заведующий лабораторией маркшейдерского обеспечения горных работ, e-mail: mukminova_dz@pers.spmi.ru, ORCID: 0000-0002-5595-9150;

*Волохов Евгений Михайлович*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры маркшейдерского дела, e-mail: volohov@spmi.ru, ORCID: 0000-0003-4430-4172;

*Лебедев Михаил Олегович*² — канд. техн. наук, доцент, e-mail: MLebedev@lmgt.ru, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, ORCID: 0000-0002-7749-442X;

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II;

² ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс».

Для контактов: *Мукминова Д. З.*, e-mail: mukminova_dz@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Mukminova D. Z.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Mine Surveying, e-mail: mukminova_dz@pers.spmi.ru, ORCID: 0000-0002-5595-9150;

*Volokhov E. M.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Surveying, e-mail: volohov@spmi.ru, ORCID: 0000-0003-4430-4172;

*Lebedev M. O.*², Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: MLebedev@lmgt.ru, Deputy Director General for Research, ORCID: 0000-0002-7749-442X;

¹ St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, 199106, Russia, rectorat@spmi.ru

² OJSC “NIPII Lenmetrogiprotrans”, 191002, Saint Petersburg, Russia, mail@lmgt.ru.

Corresponding author: *Mukminova D. Z.*, e-mail: mukminova_dz@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 18.08.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 17.06.2024; received after the review 18.08.2024; accepted for printing 10.10.2024.

