

# Моделирование влияния деформаций породного массива на перегонные тоннели глубокого заложения линии метрополитена

С.А. Жуков<sup>1</sup>✉, М.А. Бубнов<sup>2</sup>, Н.С. Наумов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ [fragrante@mail.ru](mailto:fragrante@mail.ru)

**Резюме:** В статье рассмотрено влияние подвижек грунтового массива на перегонные тоннели глубокого заложения линии метрополитена. В основу исследования легли данные, полученные при натурном обследовании участка тоннеля, подвергнутого нештатной ситуации. Смещения массива, вмещающего тоннель, в период эксплуатации последнего могут происходить из-за нарушения режима подземных вод, вызванного обильными водопритоками к тоннельной выработке. Причиной деформации перегонных тоннелей в процессе их эксплуатации могут быть также карстовые пустоты, особенно заполненные водой, что повлечет прорыв воды в тоннель. Если эти пустоты заполнены рыхлыми отложениями, то это тоже может послужить причиной появления значительных местных нагрузок на обделку. Для оценки возможности горизонтального смещения тоннелей проведен ряд численных экспериментов, которые предполагали моделирование вмещающего тоннель участка грунтового массива протяженностью 25 м. На первом этапе проводилось моделирование усадки грунта в условиях постепенной проходки тоннеля щитовым способом, на втором – фронта горизонтальных смещений. Установлены зависимости смещения обделок от расстояния до фронта смещения породного массива. При проведении численных экспериментов установлено, что основные геологические процессы, которые могли привести к деформации тоннелей, происходили на расстоянии более 20 м от кромки одного из них.

**Ключевые слова:** метрополитен, перегонный тоннель, смещение массива, грунтовый массив, численное моделирование

**Для цитирования:** Жуков С.А., Бубнов М.А., Наумов Н.С. Моделирование влияния деформаций породного массива на перегонные тоннели глубокого заложения линии метрополитена. *Горная промышленность*. 2024;(5S):190–196. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-190-196>

## Modeling of the rock mass deformations effect on deep metro main line tunnels

S.A. Zhukov<sup>1</sup>✉, M.A. Bubnov<sup>2</sup>, M.S. Naumov<sup>3</sup>

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ [s.mesyats@ksc.ru](mailto:s.mesyats@ksc.ru)

**Abstract:** The article discusses the effects of soil mass movement on deep metro main line tunnels. The study is based on the data obtained as part of a field survey of a tunnel section that was exposed to a non-routine event. Displacements of the soil mass surrounding the tunnel during its operation may occur due to disturbance of the groundwater mode caused by abundant water inflow into the tunnel. Solution cavities, especially those filled with water, can also cause deformation of the tunnels during operation, resulting in water inflow into the tunnel. If these cavities are filled with loose sediments, this can also cause significant local loads on the tunnel lining. A number of numerical experiments were carried out to assess the possibility of horizontal displacements of the tunnels, which involved modelling of a 25 m long section of the soil mass enclosing the tunnel. The first stage involved modelling of the soil shrinkage due to progressive shield tunnelling, while the second stage simulated the horizontal displacement front. Dependences of the lining displacement on the distance to the displacement front of the soil mass have been established. Numerical experiments showed that the main geological processes that could lead to deformation of the tunnels occurred at a distance of more than 20 m from the edge of one of the tunnels.

**Keywords:** metro, main line tunnel, rock mass displacement, soil mass, numerical modeling

**For citation:** Zhukov S.A., Bubnov M.A., Naumov M.S. Modeling of the rock mass deformations effect on deep metro main line tunnels. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):190–196. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-190-196>

## Введение

В процессе строительства и эксплуатации к тоннелям метрополитена предъявляются повышенные требования по контролю напряженно-деформированного состояния (НДС). Свойства грунтового массива, в первую очередь степень его водонасыщения, прочность и ползучесть, играют ключевую роль в характере формирования и изменения НДС вокруг тоннеля. В водонасыщенном грунте напряжения растут со временем, пока не достигнут периода стабилизации за счет консолидации породного массива и рассеивания его избыточного порового давления. Так, согласно исследованию [1; 2] в водонасыщенных несвязных грунтах (песках) преобладают релаксационные процессы, в водонасыщенных связных породах типа глин – консолидационно-релаксационные. Эти факторы необходимо учитывать при расчетах.

Рассмотрим участок перегонного тоннеля одной из линий метрополитена, на котором произошла нештатная ситуация.

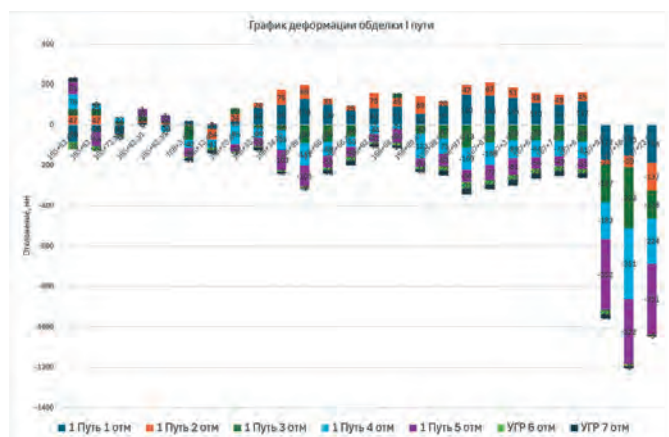
На рассматриваемом участке зафиксированы существенные деформации грунтового массива, которые привели к смещению осей тоннелей. Процесс смещения спровоцировал локальные деформации обделки, которые привели к изменению габаритных размеров тоннеля и невозможности прохождения по нему метropоезда.

## Основные теоретические предпосылки

Для проведения исследования нами выбраны контрольные точки, для того чтобы проследить, как развиваются линейные деформации, возникающие по всем направлениям, а также угловые деформации, возникающие на всех площадках, которые проходят через точку деформируемого грунтового массива.

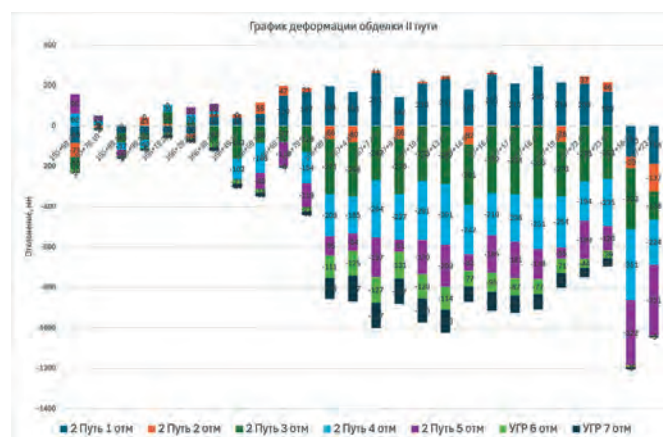
Полученные в результате обследования данные говорят о существенном искривлении оси тоннеля на участке протяженностью 150–300 м. Данные проведенных съемок представлены на рис. 1, 2.

Учитывая протяженность и величину участка смещения грунтового массива, было выдвинуто предположение о сопоставимости величины смещений в массиве с размерами рассматриваемого участка, т.е. не менее 300 м в поперечнике.



**Рис. 1**  
График деформации обделки I пути: ось Y – размерность в миллиметрах, ось X – точка разметки расстояния на железнодорожных линиях (метры)

**Fig. 1**  
Graph of lining deformation in Track No.I. Y-axis: dimension in millimetres, X-axis: distance marking point of the railway lines (metres)



**Рис. 2**  
График деформации обделки II пути: ось Y – размерность в миллиметрах, ось X – точка разметки расстояния на железнодорожных линиях (метры)

**Fig. 2**  
Graph of lining deformation in Track No.II. Y-axis: dimension in millimetres, X-axis: distance marking point of the railway lines (metres)

Обделка тоннелей метрополитена работает в условиях неопределенности [3–5], прежде всего в части нагрузок, действующих на несущие конструкции, а также многообразия условий эксплуатации подземного объекта, которые бывает сложно оценить только качественными или количественными величинами.

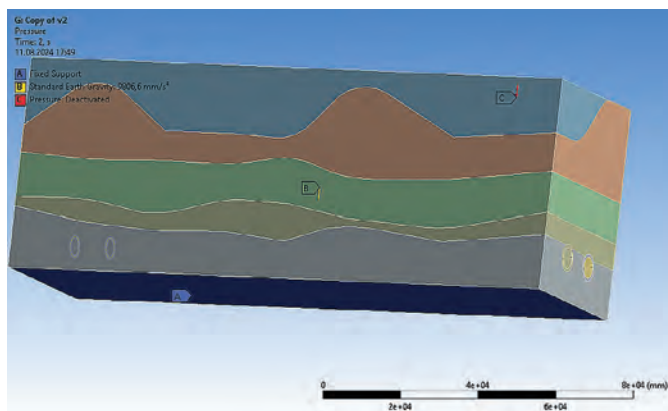
Смещения массива, вмещающего тоннель, в период эксплуатации последнего могут происходить из-за нарушения режима подземных вод [6; 7], вызванного обильными водопритоками к тоннельной выработке.

Причиной деформации перегонных тоннелей в процессе их эксплуатации могут быть также карстовые пустоты, особенно заполненные водой, что повлечет прорыв воды в тоннель [8]. Если эти пустоты заполнены рыхлыми отложениями, то это тоже может послужить причиной появления значительных местных нагрузок на обделку. Ситуацию осложняет то, что характеристики вмещающих тоннель пород могут меняться под воздействием целого ряда факторов, вызывая изменения и условий статической работы обделки [9–11].

Смещения участков обделки могут быть вызваны дополнительными нагрузками за счет изменения гидростатического давления подземных вод и их минерализации [12]. Увеличение минерализации грунтовых вод и их фильтрации через тело обделки влечет растворение карбоната и гидрата оксидов кальция и выщелачивания их из бетона обделки, что в значительной мере снижает ее прочность [13–15]. Изменение химической составляющей грунтовых вод сопровождается увеличением объема пород в течение весьма длительного времени. При этом возникают условия для образования пльвунов и прорыва их в тоннельное пространство [16].

## Численное моделирование взаимодействия породного массива с тоннельной обделкой

В настоящей работе посредством численного моделирования в программном пакете ANSYSWorkbench версии 2021R2 в модуле Staticstructural был выполнен расчёт НДС стальных труб, имитирующих скрепленные тубинги на криволинейном двухпутном участке метрополитена. В первом приближении рассмотрен участок вмещающего грунтового массива протяженностью 150 м.



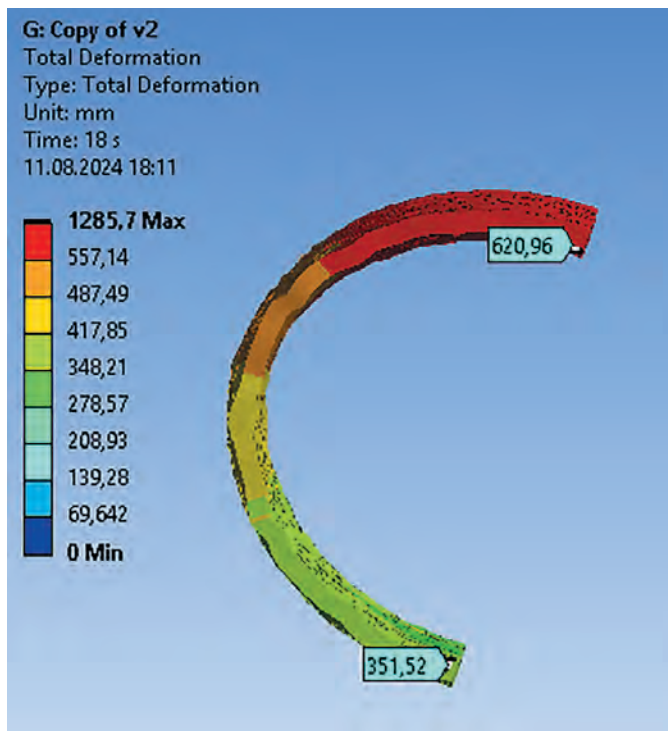
**Рис. 3**  
Расчетная схема задачи для качественного тестирования модели

**Fig. 3**  
A computational scheme for the problem of the model's qualitative testing



**Рис. 4**  
Напряжения на стенке тоннелей (моделируется контакт блоков отдельных тубингов), МПа

**Fig. 4**  
Stresses in the tunnel wall (contact of individual tunnel vaults is modelled), МПа



**Рис. 5**  
Перемещения сечения правой (ближней) нитки тоннелей

**Fig. 5**  
Displacements of the right (near) tunnel line cross-section

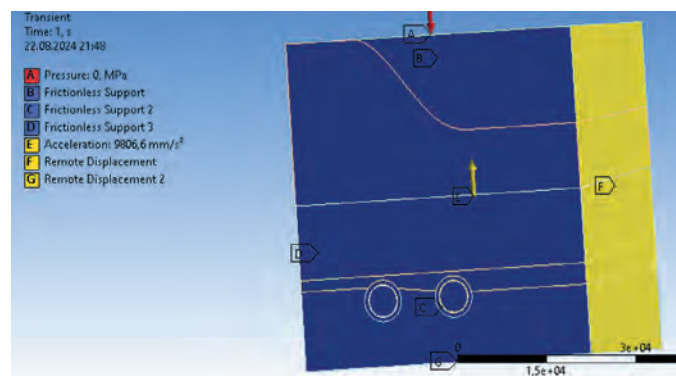
Полученные в результате расчета данные (рис. 4, 5) позволили провести оптимизацию модели для проведения последующих численных экспериментов. В частности, были разработаны рекомендации по изменению протяженности участка вмещающего тоннель грунтового массива, эквивалентного заданию граничных и начальных условий, оптимизации сетки конечных элементов (КЭ) и др.

Для оценки возможности горизонтального смещения тоннелей проведен ряд численных экспериментов, которые предполагают моделирование участка вмещающего тоннель грунтового массива протяженностью 25 м.

На первом этапе проводится моделирование усадки грунта в условиях постепенной проходки тоннеля щитовым способом. На втором этапе моделируется фронт горизонтальных смещений. Смещение фиксируется на величине 100 мм с учетом:

- смещения ключевых точек обделки тоннелей;
- разницы между соответствующими точками двух тоннелей.

Расположение фронта смещения при этом варьируется между 12,5 и 27,5 м. Смещение в каждом случае фиксируется по двум направлениям (рис. 6). Ниже показан общий вид расчетной модели (вариант с фронтом смещения в 22,5 м от тоннеля), а также приведены основные результаты (рис. 7).



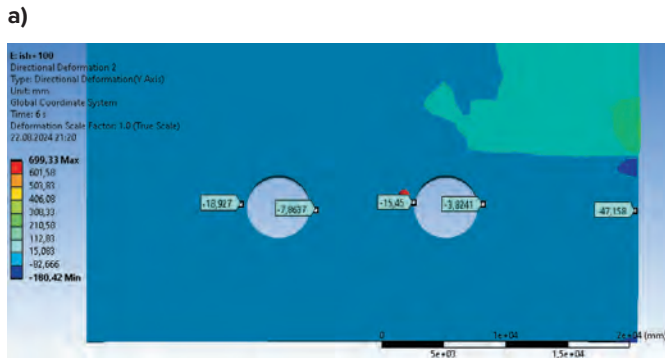
**Рис. 6**  
Общий вид расчетной модели

**Fig. 6**  
A general view of the computational model



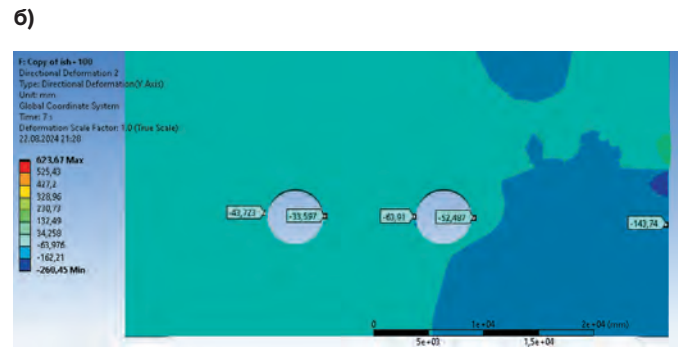
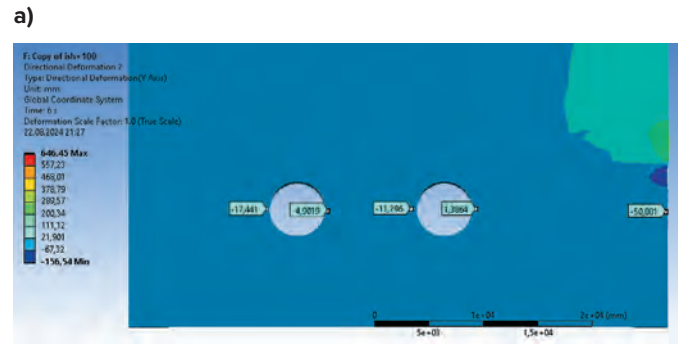
**Рис. 7**  
Расположение ключевых точек (в качестве примера приведен вариант расчета при фронте смещения в 22,5 м от кромки тоннеля, направление смещения – от тоннеля)

**Fig. 7**  
Location of the key points (as an example, a calculation option is provided for a displacement front within 22.5 m from the tunnel edge, the direction of displacement is away from the tunnel)



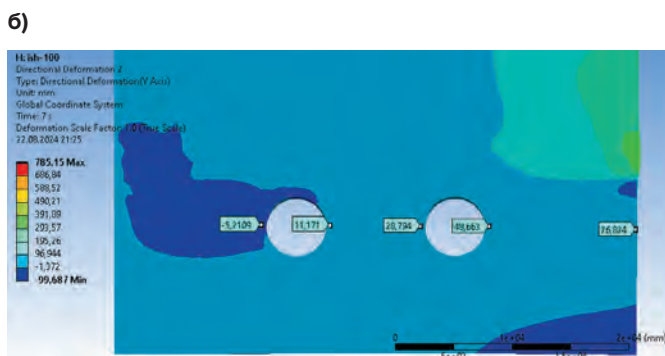
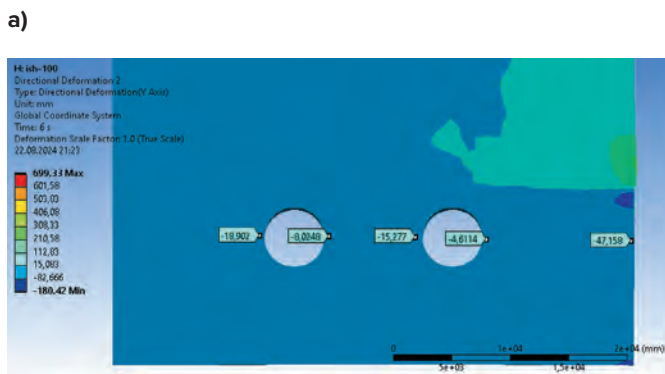
**Рис. 7.1**  
Фронт 12,5 м, смещение по направлению к туннелю. Здесь и в рис. 7.2–7.8: а – исходное положение ключевых точек; б – положение ключевых точек после смещения

**Fig. 7.1**  
The 12.5 m front, displacement towards the tunnel. Here and in Figs. 7.2-7.8: a – the initial position of the key points; б – position of the key points after the displacement



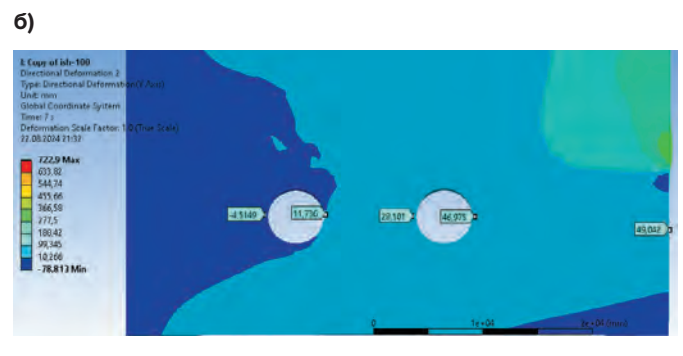
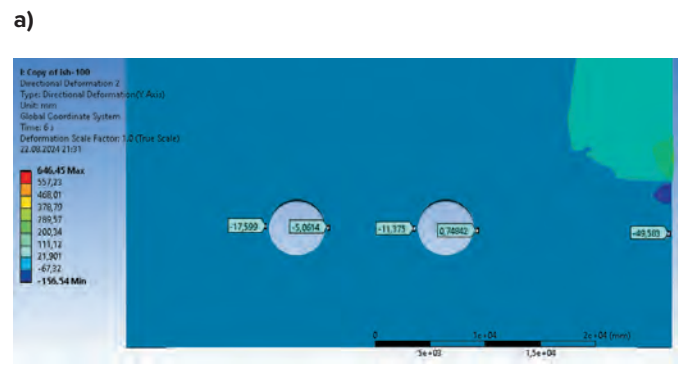
**Рис. 7.3**  
Фронт 17,5 м, смещение к туннелю

**Fig. 7.3**  
The 17.5 m front, displacement towards the tunnel



**Рис. 7.2**  
Фронт 12,5 м, смещение от туннеля

**Fig. 7.2**  
The 12.5 m front, displacement away from the tunnel



**Рис. 7.4**  
Фронт 17,5 м, смещение от туннеля

**Fig. 7.4**  
The 17.5 m front, displacement away from the tunnel

a)



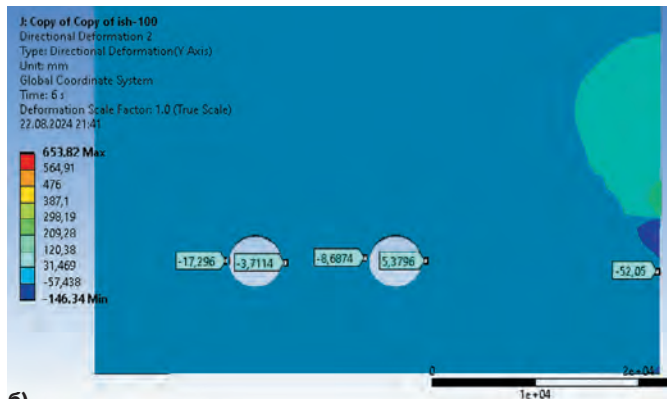
b)



**Рис. 7.5**  
Фронт 22,5 м, смещение по направлению к тоннелю

**Fig. 7.5**  
The 22.5 m front, displacement towards the tunnel

a)



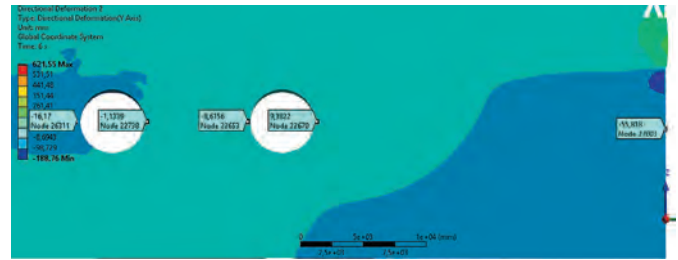
b)



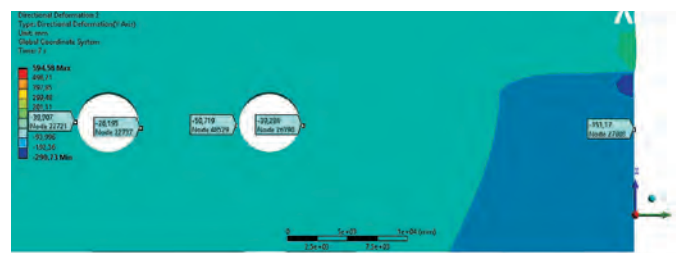
**Рис. 7.6**  
Фронт 22,5 м, смещение от тоннеля

**Fig. 7.6**  
The 22.5 m front, displacement away from the tunnel

a)



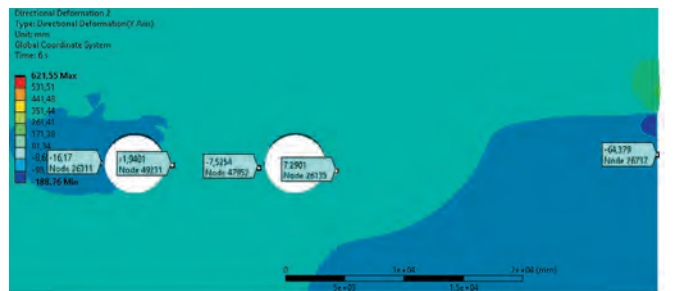
b)



**Рис. 7.7**  
Фронт 27,5 м, смещение к тоннелю

**Fig. 7.7.** The 27.5 m front, displacement towards the tunnel

a)



b)



**Рис. 7.8**  
Фронт 28,5 м, смещение от тоннеля

**Fig. 7.8**  
The 28.5 m front, displacement away from the tunnel

По данным табл. 1 были построены графики изменения положения ключевых точек в зависимости от расстояния до фронта смещения при направленности этих смещений в сторону тоннеля (рис. 8) и от него (рис. 9).

Положение характерных точек по I и II путям продемонстрировано на рис. 10.

Отсутствие ряда исходных данных обусловило большое количество допущений для решения поставленных задач. Проведенные численные эксперименты позволяют определить перечень возможных дополнительных исследований.

Таблица 1  
Результаты численных экспериментов по определению смещений

Table 1  
Results of numerical experiments on defining the displacements

Вариант расчета	Точка						
	T1	T2	T3	T4	T5	T1-T2	T1-T4
Фронт 12,5 м, смещение к тоннелю	-100	-61,3	-56,7	-34,7	-25,9	38,7	65,3
Фронт 12,5 м, смещение от тоннеля	100	53,2	44,1	19,1	13,7	46,8	80,9
Фронт 17,5 м, смещение к тоннелю	-100	-53,9	-52,6	-28,7	-26,3	46,1	71,3
Фронт 17,5 м, смещение от тоннеля	100	46,3	39,5	16,8	13,1	53,7	83,2
Фронт 22,5 м, смещение к тоннелю	-100	-49,3	-46,2	-25,9	-22,5	50,7	77,5
Фронт 22,5 м, смещение от тоннеля	100	40,4	30,8	16,2	24,0	59,6	76,0
Фронт 27,5 м, смещение к тоннелю	-100	-48,7	-42,1	-25,1	-23,7	51,3	74,9
Фронт 27,5 м, смещение от тоннеля	100	38,6	34,0	15,0	10,7	61,4	89,3

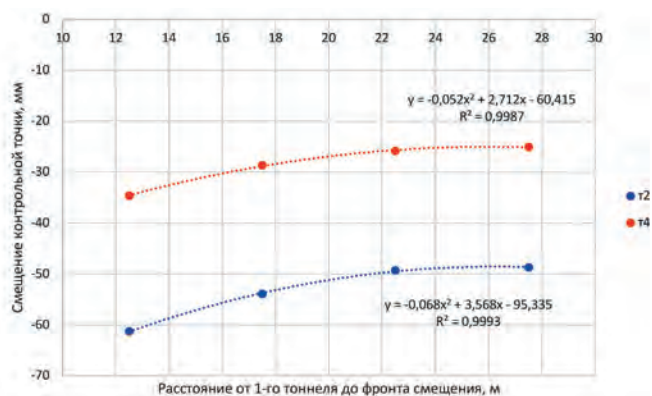


Рис. 8  
Зависимость изменения положения ключевых точек от расстояния до фронта смещения, при смещении в сторону тоннеля

Fig. 8  
The dependence of changes in the key point locations on the distance to the displacement front, when the displacement is towards the tunnel

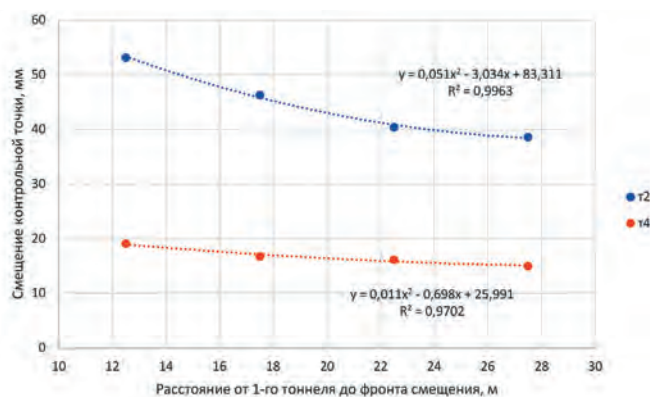


Рис. 9  
Зависимость изменения ключевых точек от расстояния до фронта смещения, при смещении в сторону от тоннеля

Fig. 9  
The dependence of changes in the key point locations on the distance to the displacement front, when the displacement is away from the tunnel

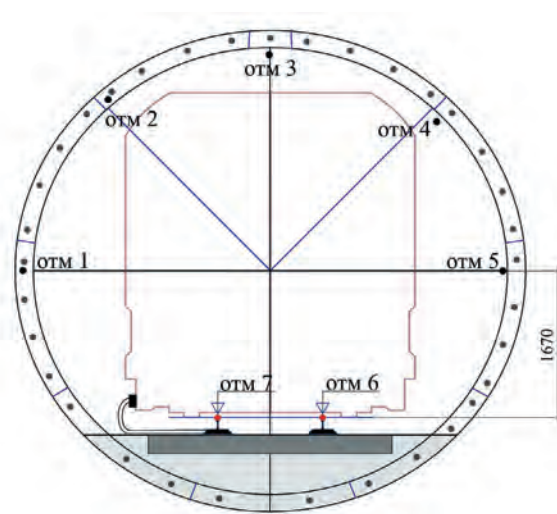


Рис. 10  
Положение характерных точек

Fig. 10  
Locations of the specific points

### Выводы

В ходе проведения численных экспериментов были смоделированы условия, эквивалентные реальным условиям размещения тоннеля во вмещающих грунтах, и оценено их взаимное влияние друг на друга.

Косвенное подтверждение получила гипотеза сдвига достаточно большого участка массива грунта (по текущим оценкам, этот участок массива достигает 300 м в поперечнике).

Установлены зависимости смещения обделок от расстояния до фронта смещения породного массива.

При проведении численных экспериментов установлено, что основные геологические процессы, которые могли привести к деформации тоннелей, происходили на расстоянии более 20 м от кромки одного из них.

В дальнейшем предполагается провести исследования состояния грунтового массива в районе сдвига на расстоянии  $\pm 150$  м от осей тоннелей.

### Список литературы / References

1. Дуванский А.В. Разработка методики учета тектонических нагрузок при расчете тоннелей глубокого заложения. *Строительство и техногенная безопасность*. 2013;(47):56–61.  
Duvansky A.V. Development of a methodology to account for tectonic loads in calculation of deep tunnels. *Construction and Industrial Safety*. 2013;(47):56–61. (In Russ.)

2. Гуськов И.А., Пестрякова Е.А., Харитонов С.С., Титов Е.Ю. Методы оценки осадок при проходке тоннелей с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов. *Транспортные сооружения*. 2019;6(3). <https://doi.org/10.15862/18SATS319>  
Guskov I.A., Pestryakova E.A., Kharitonov S.S., Titov E.Yu. Methods for estimating sediment during tunneling using a mechanized tunneling. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019;6(3). (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/18SATS319>
3. Куликова Е.Ю. Выработка управленческих решений в сфере безопасности подземного строительства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(1):79–82.  
Kulikova E.Yu. Making of administrative decisions in the field of safety of underground building. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(1):79–82. (In Russ.)
4. Алымов В.Т., Крапчатов В.П., Тарасова Н.П. *Анализ техногенного риска*. М.: Интеграция; 1999. 160 с.
5. Бурков В.Н., Грацианский Е.В., Дзюбко С.И., Щепкин А.В. *Модели и механизмы управления безопасностью*. М.: СИНТЕГ; 2001. 153 с.
6. Зиновьева О.М., Кузнецов Д.С., Меркулова А.М., Смирнова Н.А. Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):113–123. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123>  
Zinovieva O.M., Kuznetsov D.S., Merkulova A.M., Smirnova N.A. Digitalization of industrial safety management systems in mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):113–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123>
7. Потапова Е.В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):52–60. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>  
Potapova E.V. Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):52–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>
8. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V. Risk control system for the construction of urban underground structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962:042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>
9. Кауфман Л.Л., Лысиков Б.А. *Геотехнические риски в подземном строительстве (обзор зарубежного опыта)* [под общ. ред. Л.Л. Кауфмана]. Донецк: Норд-Пресс; 2009. 362 с.
10. Гарбер В.А. Нештатные ситуации в подземных транспортных сооружениях. *Подземные горизонты*. 2018;(16):20–25.  
Garber V.A. Non-routine events in underground transport structures. *Underground Horizons*. 2018;(16):20–25. (In Russ.)
11. Sousa R.L. *Risk analysis for tunneling projects: Thesis (Ph. D.)*. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering; 2010. Available at: <http://hdl.handle.net/1721.1/58282> (accessed: 13.08.2024).
12. Чунюк Д.Ю. Особенности классификации и составляющие геотехнического риска в строительстве. *Промышленное и гражданское строительство*. 2013;(9):42–44.  
Chunyuk D.Yu. Features of classification and components of geotechnical risk in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2013;(9):42–44. (In Russ.)
13. Khine P.P., Shun W.Z. Big data for organizations: A review. *Journal of Computer and Communications*. 2017;5(3):40–48. <https://doi.org/10.4236/jcc.2017.53005>
14. Reis M.S., Gins G. Industrial process monitoring in the Big Data / Industry 4.0 Era: from detection, to diagnosis, to prognosis. *Processes*. 2017;5(3):35. <https://doi.org/10.3390/pr5030035>
15. Mishra R.K., Janiszewski M., Uotinen L.K.T., Szydłowska M., Siren T., Rinne M. Geotechnical risk management concept for intelligent deep mines. *Procedia Engineering*. 2017;191:361–368. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.192>
16. Hebblewhite B.K. Geotechnical risk in mining methods and practice: critical issues and pitfalls of risk management. In: Wesseloo J. (ed.) *MGR 2019: Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2019, pp. 299–308. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1905\\_17\\_Hebblewhite](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1905_17_Hebblewhite)

**Информация об авторах**

**Жуков Сергей Анатольевич** – генеральный директор, АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0007-6492-6696>; e-mail: [fragrante@mail.ru](mailto:fragrante@mail.ru)

**Бубнов Михаил Александрович** – кандидат технических наук, доцент, передовая инженерная школа, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0006-5041-8597>

**Наумов Максим Сергеевич** – ведущий инженер отдела, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0000-1148-1530>

**Information about the authors**

**Sergey A. Zhukov** – General Director, Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0007-6492-6696>; e-mail: [fragrante@mail.ru](mailto:fragrante@mail.ru)

**Mikhail A. Bubnov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Advanced engineering school, Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0006-5041-8597>

**Maxim S. Naumov** – Lead Engineer of the Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0000-1148-1530>

**Article info**

Received: 27.08.2024

Revised: 23.10.2024

Accepted: 26.10.2024

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 27.08.2024

Поступила после рецензирования: 23.10.2024

Принята к публикации: 26.10.2024