



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-259>

УДК 528.9



Обоснование экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена с учетом гидрогеологического риска

С. А. Жуков

АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация

fragrante@mail.ru

Аннотация

В современном мире стремительной урбанизации экологическая безопасность становится ключевым аспектом городского планирования и управления. Проблематика экологической безопасности охватывает широкий спектр вопросов – от снижения уровня загрязнения и сохранения биоразнообразия до обеспечения устойчивого использования природных ресурсов. В этом контексте объекты метрополитена как неотъемлемая часть городской инфраструктуры играют важную роль в обеспечении мобильности городского населения, однако они также представляют собой потенциальный источник экологических проблем. Эксплуатация объектов метрополитена сопровождается шумовым загрязнением, эмиссией вредных веществ, так как системы метрополитена используют энергию, производимую из ископаемых источников, энергопотреблением, нежелательным влиянием на подземные воды и другими негативными экологическими аспектами. Также не менее важным является вопрос утилизации отходов и строительных материалов, используемых при строительстве и ремонте метрополитенов. Целью данного исследования являлась оценка экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена. Рассмотрение этой темы особенно актуально в свете глобального стремления к устойчивому развитию и необходимости обеспечения высокого качества жизни городского населения. Оценка экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена предполагается осуществлять на основе комплексного подхода, подразумевающего проведение натурных исследований и моделирования характера распределения дефектов в конструкциях подземных сооружений метрополитена под воздействием гидрогеологических рисков. Системный подход к оценке экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена, основанный на моделировании развития дефектов в конструкциях тоннелей под действием гидрогеологических факторов, позволит структурировать имеющуюся информацию по потенциальным авариям, выработать методы мониторинга и меры по минимизации рисков, ведущих к снижению экологической устойчивости подземных объектов транспортной структуры города. Полученные результаты исследований, включающие в себя систематизацию критериев экологической безопасности при эксплуатации метрополитена, анализ дефектов в конструкциях тоннелей под действием гидрогеологических факторов, являются основой для дальнейшей разработки методики обеспечения экологически безопасной эксплуатации городских транспортных тоннелей.

Ключевые слова

метрополитен, экологическая безопасность, устойчивое развитие, городская транспортная система, экологические стандарты, инновационные технологии, риски

Для цитирования

Zhukov S. A. Substantiation of environmental safety in metro facility operations considering hydrogeological risks. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):283–291. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-259>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Substantiation of environmental safety in metro facility operations considering hydrogeological risks

S. A. Zhukov

Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian Federation

fragrante@mail.ru

Abstract

In today's world of rapid urbanization, environmental safety has become a key aspect of urban planning and management. The issue of environmental safety encompasses a wide range of concerns, from pollution reduction and biodiversity conservation to ensuring the sustainable use of natural resources. In this context,



metro facilities, as an integral part of urban infrastructure, play a crucial role in providing mobility for urban populations, yet they also pose potential environmental challenges. The operation of metro facilities is associated with noise pollution, emissions of harmful substances due to the use of energy produced from fossil fuels, energy consumption, undesirable impacts on groundwater, and other negative environmental aspects. Equally important is the issue of waste disposal and the use of construction materials during the building and maintenance of metro systems. The aim of this study was to assess the environmental safety of metro facility operations. The consideration of this topic is particularly relevant in light of global efforts towards sustainable development and the need to ensure a high quality of life for urban populations. The assessment of environmental safety in metro operations is proposed to be conducted through a comprehensive approach, involving field studies and modelling the distribution patterns of defects in metro structures under the influence of hydrogeological risks. A systematic approach to evaluating environmental safety in metro operations, based on modelling the development of defects in tunnel structures under the influence of hydrogeological factors, will help organize existing information on potential accidents and develop monitoring methods and measures to minimize risks that compromise the environmental sustainability of underground transport infrastructure. The research results, which include the systematization of environmental safety criteria for metro operations and the analysis of tunnel structure defects caused by hydrogeological factors, provide the basis for further developing methods to ensure environmentally safe operation of urban transport tunnels.

Keywords

metro, environmental safety, sustainable development, urban transport system, environmental standards, innovative technologies, risks

For citation

Zhukov S.A. Substantiation of environmental safety in metro facility operations considering hydrogeological risks. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):283–291. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-259>

Введение

Для оценки экологической безопасности метрополитенов необходимо учитывать ряд ключевых критериев, которые помогут обеспечить устойчивое функционирование этих систем.

Гидрогеологический критерий: включает определение гидростатического давления подземных вод, их минерализацию, состав.

Эмиссии загрязняющих веществ: включает измерение уровней выбросов углекислого газа, азотных оксидов и других загрязнителей, которые могут оказывать влияние на качество воздуха в городах. Особое внимание следует уделить местам с высокой концентрацией людей, таким как станции метро и пересадочные узлы.

Шумовое загрязнение: работа метрополитенов часто сопровождается высоким уровнем шума, который может негативно сказываться на здоровье и качестве жизни городских жителей. Важно оценивать уровни шума и принимать меры по их снижению.

Энергоэффективность: эффективное использование энергии является ключевым фактором в снижении экологического воздействия метрополитенов. Это включает использование энергосберегающих технологий, а также переход на возобновляемые источники энергии.

Утилизация отходов и использование материалов: важными аспектами являются управление отходами, возникающими в процессе строительства и эксплуатации метрополитенов, а также выбор экологически устойчивых материалов.

Влияние на экосистемы и биоразнообразие: необходимо учитывать воздействие метрополитенов на природные экосистемы, в частности, при строительстве новых линий метро и развитии инфраструктуры.

Применение этих критериев требует комплексного подхода, включая регулярный мониторинг, использование современных технологий и инновационных решений. Также важно разрабатывать и реализовывать нормативно-правовые акты, которые будут регулировать экологические аспекты функционирования метрополитенов.

Критерии экологической безопасности должны регулярно пересматриваться и обновляться в соответствии с последними научными исследованиями и технологическими достижениями. Это обеспечит возможность адаптации и постоянного улучшения в ответ на меняющиеся условия и потенциальные нештатные ситуации.

Применение этих критериев поможет не только снизить негативное воздействие метрополитенов на окружающую среду, но и повысить их эффективность и удобство для персонала и посетителей, способствуя тем самым устойчивому развитию городских транспортных систем.

Примеры успешных практик

Метрополитен Стокгольма, Швеция: Один из наиболее экологически чистых метрополитенов в мире. Благодаря использованию 100% возобновляемой энергии для метropоездов Стокгольм значительно снизил углеродный след своей транспортной системы. Кроме того, внедрены эффективные системы вентиляции и шумоподавления.

Метрополитен Сингапура: Пример высокоэффективной и инновационной транспортной системы. Сингапурский метрополитен использует регенеративное торможение, которое позволяет снизить общее потребление энергии. Также применяются строгие стандарты по снижению шума и загрязнения воздуха.

Лондонский метрополитен, Великобритания: Внедрение программы по сокращению энергопотребления и улучшению качества воздуха. Лондонский метрополитен также активно работает над улучшением своей инфраструктуры для снижения уровня шума и вибрации.

Примеры с проблемными аспектами

Метрополитен Нью-Йорка, США: Несмотря на свою величину и значимость сталкивается с рядом экологических проблем, связанных главным образом с устаревающей инфраструктурой и высокими уровнями шума. Проекты по модернизации инфраструктуры и повышению энергоэффективности находятся в процессе разработки и реализации.

Московский метрополитен, Россия: Хотя в последние годы были предприняты шаги по улучшению экологической безопасности, такие как внедрение энергоэффективного освещения и улучшенная вентиляция, все еще существуют проблемы, связанные с изношенностью инфраструктуры и изменением геолого-гидрологической обстановки из-за изменения городского ландшафта.

Материалы и методы

Одним из самых опасных видов экологических рисков на подземных объектах метрополитена, ведущих к существенному снижению экологической безопасности, являются гидрогеологические риски, т.е. возможные социальные и экономические потери в результате развития неблагоприятных гидрогеологических процессов, что выражается в снижении устойчивости выработок метрополитена и экологической безопасности системы «породный массив – подземное сооружение – окружающая среда». Гидрогеологические риски проявляются в виде формирования

таких дефектов в несущих конструкциях выработок, как свищи, течи, выносы водных масс и грунта в подземный объект, прорывы воды и плывунов и т. п.

Рассмотрим в качестве примера оценки уровня экологической безопасности на существующий объект Московского метрополитена, основываясь на данных инженерно-геологических изысканий на различных период времени. Фотоматериал по перегонному тоннелю линии Московского метрополитена представлен на рис. 1–3.

Натурным обследованием конструкций на аварийном участке перегонного тоннеля линии Московского метрополитена было выявлено наличие следующих наиболее характерных дефектов и повреждений:

- сколы бетона в стеновых блоках, в том числе на некоторых участках с обнажением арматуры;
- сколы бетона в плитах перекрытия, в том числе на некоторых участках с обнажением арматуры;
- выщелачивания на стеновых блоках перегонного тоннеля;
- выщелачивания на плитах перекрытия перегонного тоннеля;
- мокрые пятна на стеновых блоках перегонного тоннеля;
- нарушение заделки швов в стеновых блоках и плитах перекрытия;
- активные течи;
- трещины в плитах перекрытия величиной раскрытия до 0,2 мм.

Классификация выявленных дефектов отражена в табл. 1.

Результаты

Геологические разрезы по рассматриваемому перегону на различные периоды времени представлены на рис. 4, 5.



Рис. 1. Выщелачивание и мокрое пятно в межкольцевом и межблочном стыке обделки, активная течь. Трещина в спинке тубинга

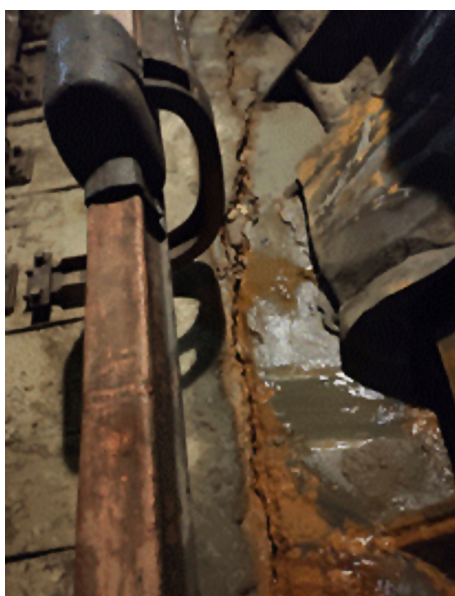


Рис. 2. Вынос грунта в область контактного рельса



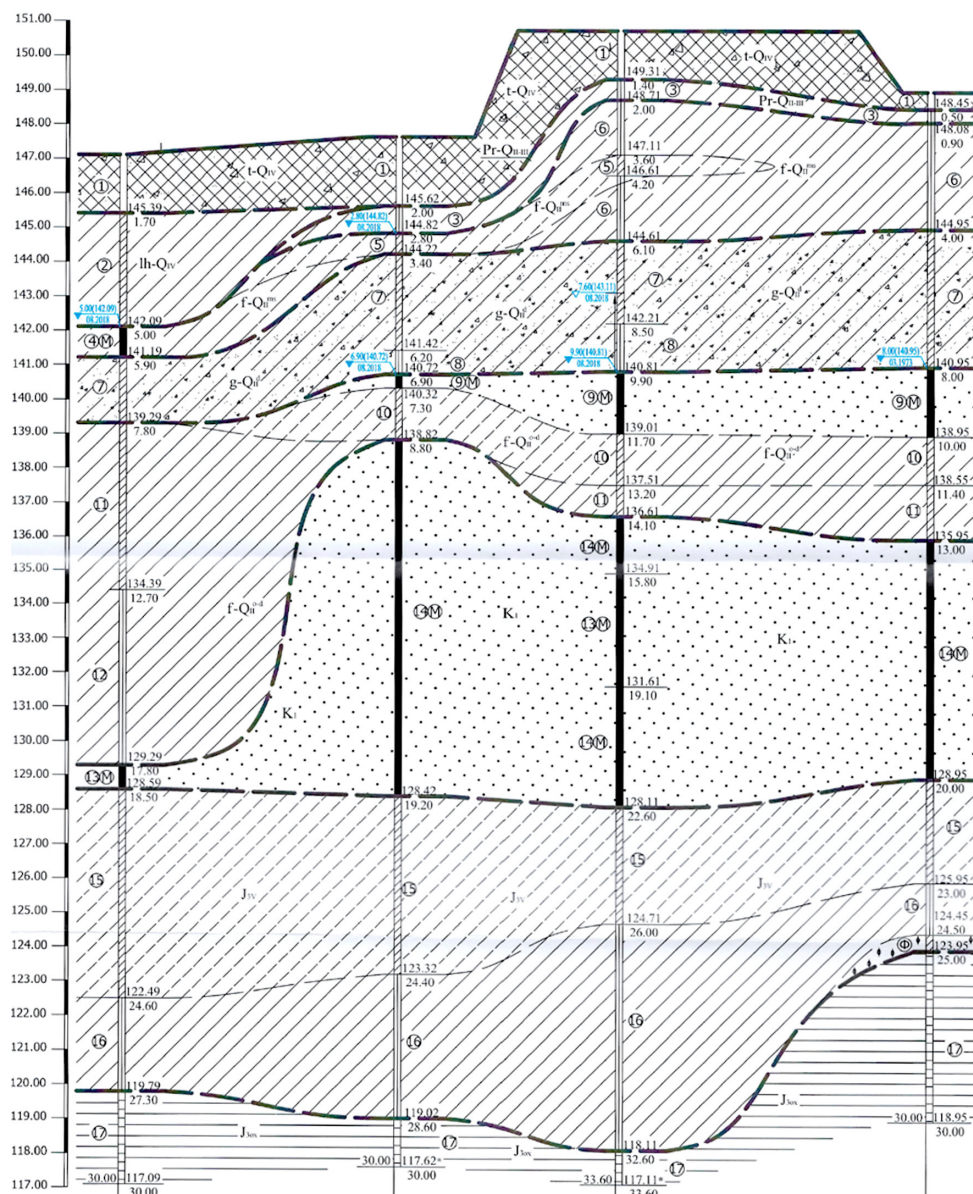
Рис. 3. Выщелачивание и разрушение бетонной конструкции плиты перекрытия в результате эрозии гидроизоляции



Таблица 1

Классификация дефектов (согласно ГОСТ Р 57208–2016)

№ п/п	Вид дефекта	Возможные причины появления	Возможные последствия
1	Сколы бетона в стеновых блоках и плитах перекрытия, в том числе на некоторых участках с обнажением арматуры	Механическое воздействие	Снижение несущей способности пропорционально уменьшению площади сечения
2	Выщелачивания на стеновых блоках и плитах перекрытия перегонного тоннеля. Мокрые пятна на стеновых блоках. Капез. Активные течи	Нарушение гидроизоляции	Разрушение бетона конструкций, коррозия металла и арматуры. Снижение эксплуатационных характеристик объектов
3	Уступы в стыках плит перекрытий перегонного тоннеля величиной до 30 мм	Ошибки при изготовлении и монтаже	Степень снижения несущей способности определяется расчетом
4	Трещины в плитах перекрытия величиной раскрытия до 0,2 мм	Усадка в результате принятого режима тепловлажностной обработки состава бетонной смеси, свойств цемента и т. п.	На несущую способность не влияют. Могут снизить долговечность
5	Нарушение заделки швов в стеновых блоках и плитах перекрытия	При эксплуатации тоннелей и метрополитенов (в том числе вибрационные воздействия от подвижного состава)	Водообводненность конструкций и снижение эксплуатационных характеристик объекта



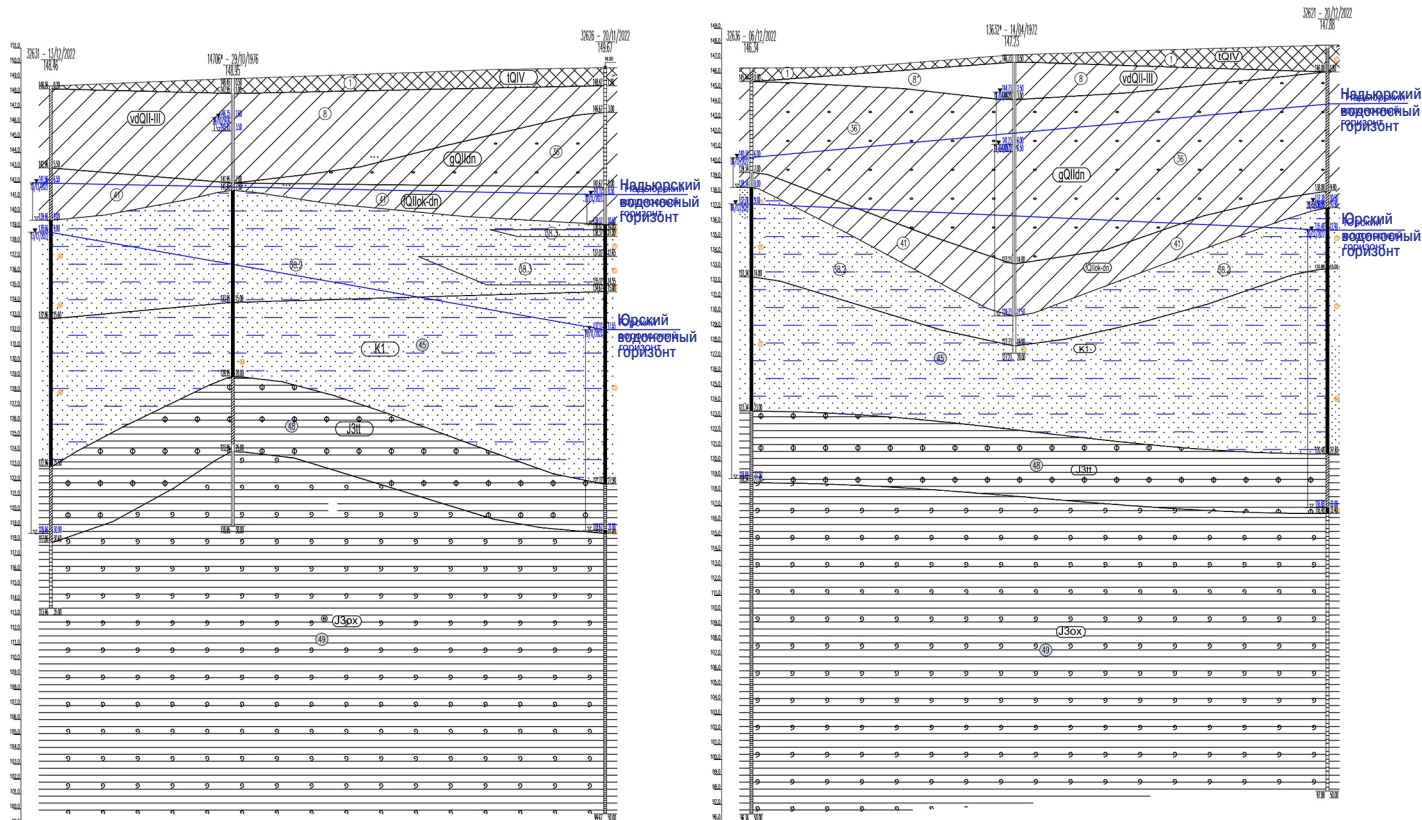


Рис. 5. Инженерно-геологический разрез участка перегонного тоннеля между станциями на период времени t_2

Из представленных разрезов следует, что уровень водоносного горизонта менялся с течением времени, что значительно повлияло на физико-механические свойства пород и развитие дефектов в несущих конструкциях тоннеля, прежде всего на изменение геометрии обделки перегонного тоннеля.

Для определения скорости понижения и восстановления водопритока были проведены расчеты фильтрационных свойств водоносного горизонта вблизи перегонного тоннеля (табл. 2).

По данным наблюдений за состоянием уровня водоносного горизонта вблизи перегонного тоннеля было выявлено изменение гидрологического режима (рис. 6, 7). Из представленных графиков следует, что в течение продолжительного периода времени уровень водоносного горизонта изменялся в диапазоне значений от 2 до 16 м.

В рамках обследования технического состояния проблемных участков перегонных тоннелей были произведены натурные измерения фактических геометрических размеров конструкций тоннеля. Измерения фактических размеров исследуемых конструкций проводились ручным лазерным дальномером «Leica DISTO D2». Точность измерений: $\pm 1,5$ мм. По результатам измерений были выявлены отклонения фактических геометрических размеров обделки от проектных, значения которых превышают 50 мм в рассматриваемых пикетах (рис. 8). Выделенная область на рис. 8, а представляет собой негабаритный

участок обделки тоннеля метрополитена, который может сформировать развитие потенциальной аварийной ситуации. Выделенная красным цветом область на рис. 8, б представляет собой негабаритный участок обделки тоннеля метрополитена до процесса усиления основания лотковой зоны, которая может сформировать развитие потенциальной аварийной ситуации, а синим цветом выделены результаты измерений после процесса усиления основания лотковой зоны, что позволило сократить деформацию со 100 до 40 мм.

Таблица 2

Характеристика водоносного горизонта

Характеристика	Значение
Водоносный горизонт	Напорный
Мощность горизонта, Н м	17,8
Радиус скважины, м	0,063
Продолжительность откачки, сут	0,5
Дебит, м ³ /сут	64,8
Статический уровень, м	7,2
Динамический уровень, м	23,45
Понижение уровня, м	16,25

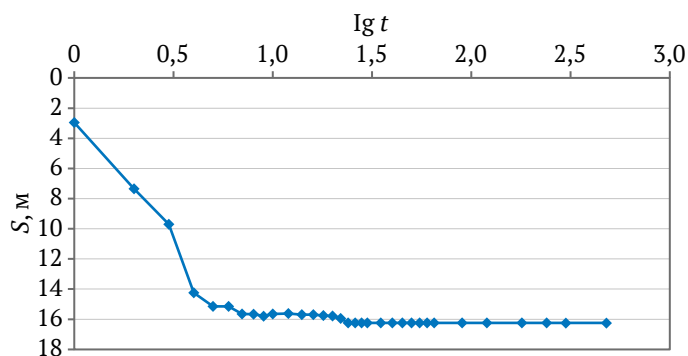


Рис. 6. График прослеживания понижения уровня в скважине

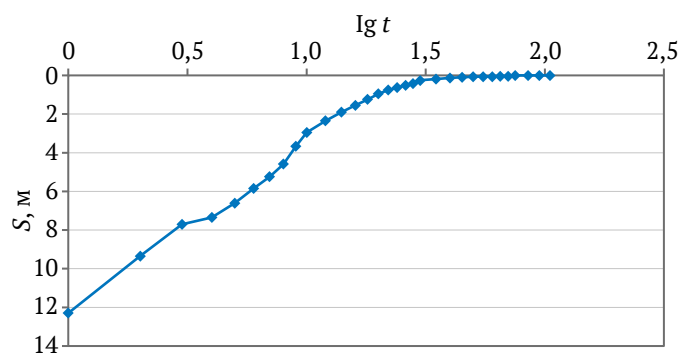
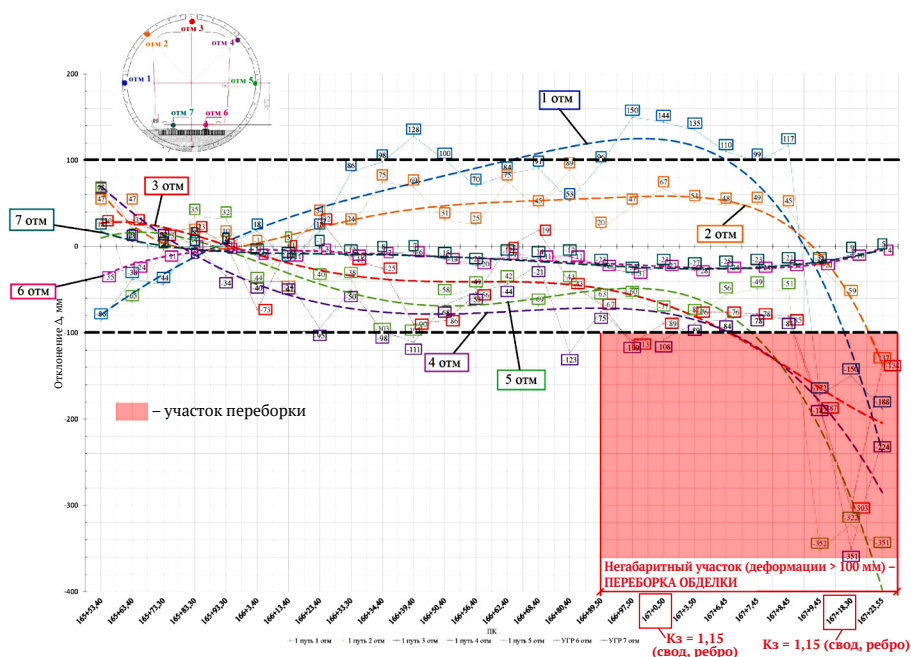
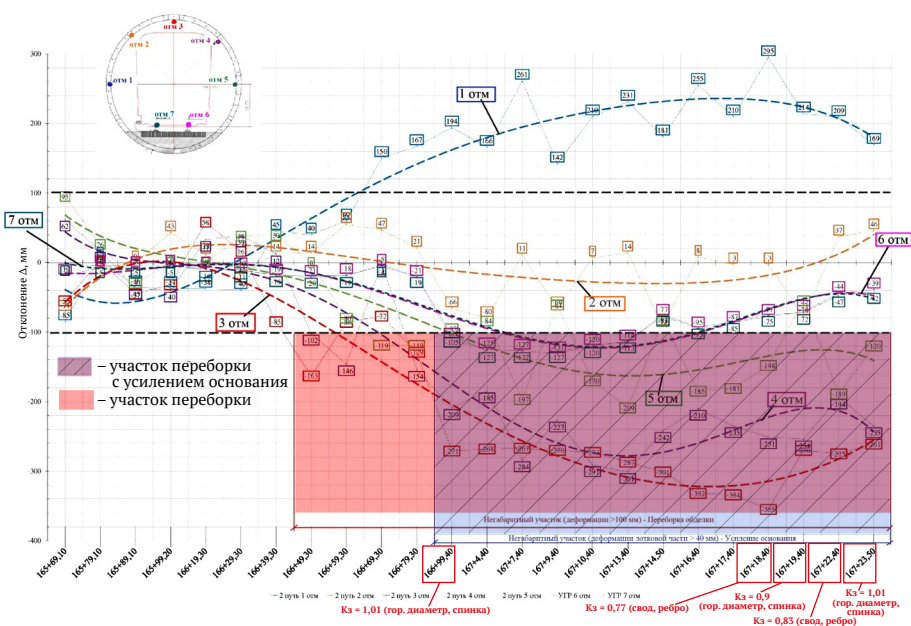


Рис. 7. График прослеживания восстановления уровня в скважине



а



б

Рис. 8. График деформации обделки:
а – первого пути (левого перегонного тоннеля); б – второго пути (правого перегонного тоннеля)

Из рис. 8 следует, что деформационные процессы, обусловленные увеличением притока подземных вод к обделке тоннеля, приводят к трещинообразованию в конструкции чугунного тюбинга, что, в свою очередь, способствует формированию течей и вывалу грунта во внутреннее пространство тоннеля, в том числе и на путевые участки.

По результатам натурного обследования была составлена карта дефектов обделки, фрагмент которой приведен на рис. 9.

Выводы

Выявленные изменения конструкции обделки тоннеля показали, что 60% течей приурочено к местам расположения технологических швов. Тело тюбинга также начинает фильтровать воду, усугубляются процессы выщелачивания с появлением мокрых пятен. Так как вмещающий породный массив сложен слабыми неустойчивыми грунтами, вынос грунтовых масс в пространство тоннеля может повлечь его осадку, что, в свою очередь, вызовет деформации и оседания земной поверхности. Таким образом, наблюдается ярко выраженное снижение уровня экологической

и геотехнической безопасности перегонного тоннеля метрополитена.

Полученные результаты исследований, включающие в себя анализ дефектов в конструкциях тоннелей под действием гидрогеологических факторов, являются основой для дальнейшего определения приемлемых рисков и разработки методики обеспечения экологически безопасной эксплуатации городских транспортных тоннелей метрополитена.

В дальнейшем планируется создание модели геомеханических воздействий на сооружения метрополитена. Моделирование позволит оценить, насколько такие геомеханические проявления, как карстовые процессы, осадки земной поверхности, пучение грунта, изменение режима грунтовых вод, участвуют в формировании напряженно-деформированного состояния сборной обделки перегонных тоннелей. Моделирование предполагается проводить трехмерным численным методом в программном пакете ANSYS Workbench. Сравнение результатов, полученных при моделировании с экспериментальными данными, позволит оценить достоверность предлагаемой методики.

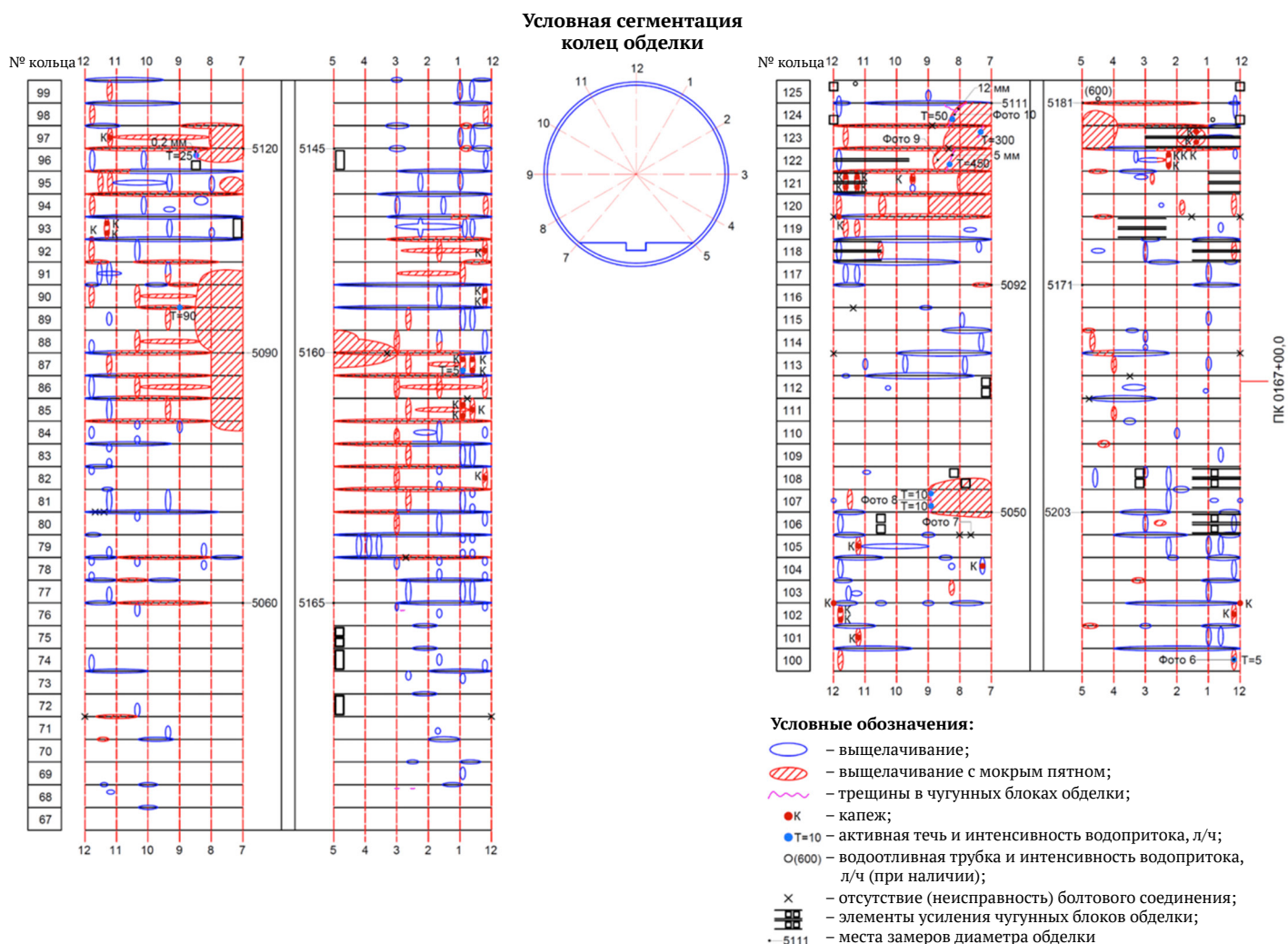


Рис. 9. Карта дефектов обделки, полученных в результате натурного обследования действующих объектов (ПК167+00,0)



Список литературы / References

1. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(1):7–16. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16>
Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(1):7–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16>
2. Куликова Е.Ю. Управление безопасностью и риском в подземном строительстве как сложный информационный процесс. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2–1):134–143. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-134-143>
Kulikova E. Yu. Safety and risk management in underground construction as a complex information process. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2–1):134–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-134-143>
3. He X. C., Xu Y. S., Shen S. L., Zhou A. N. Geological environment problems during metro shield tunnelling in Shenzhen, China. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020;13(2):87. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5071-z>
4. Xu Y. S., Shen J. S., Zhou A. N., Arulrajah A. Geological and hydrogeological environment with geohazards during underground construction in Hangzhou: a review. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018;11:544. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3894-7>
5. Lin X.-T., Chen R.-P., Wu H.-N., Cheng H.-Zh. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunnelling undercrossing with oblique angle. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019;89:78–90. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.021>
6. Merisalu J., Sundell J., Rosén L. Probabilistic cost-benefit analysis for mitigating hydrogeological risks in underground construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023;131(7):104815. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104815>
7. Конюхов Д.С. Критериальный анализ современных технологий подземного строительства. *Геотехника*. 2021;(1):40–55.
Konyukhov D. S. Criteria analysis of modern technologies of underground construction. *Geotekhnika*. 2021;(1):40–55. (In Russ.)
8. Конюхов Д.С. Анализ параметров механизированной проходки тоннелей для определения характеристик перебора грунта. *Горные науки и технологии*. 2022;7(1):49–56. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>
Konyukhov D. S. Analysis of mechanized tunneling parameters to determine the overcutting characteristics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):49–56. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>
9. Lebedev M. O. Choosing a calculation method for stress-strain of supports and lining of transport tunnels. In: *16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018)*. 5–7 November 2018, Hong Kong. Pp. 678–687.
10. Bourget A. P. F., Chiriotti E., Patrinieri E. Evolution of risk management during an underground project's life cycle. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (Eds). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: CRC Press; 2019. Pp. 4375–4385. <https://doi.org/10.1201/9780429424441-463>
11. Mahdi S., Gastebled O., Ningre H., Senechal M. Grand Paris Express, Line 15 East – predictive damage analysis combining continuous settlement trough modeling, risk management, automated vulnerability checks and visualization in GIS. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (Eds). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: CRC Press; 2019. Pp. 5855–5864. <https://doi.org/10.1201/9780429424441-619>
12. Hongjun W. Earth human settlement ecosystem and underground space research. *Procedia Engineering*. 2016;165:765–781. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.774>
13. Гарбер В.А. Нештатные ситуации в подземных транспортных сооружениях. *Подземные горизонты*. 2018;(16):20–25.
Garber V. A. Abnormal situations at underground transport facilities. *Podzemnye Gorizonty*. 2018; (16):20–25. (In Russ.)
14. Куликова Е.Ю. Методические основы повышения эколого-технологической надежности городских подземных сооружений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6–1):176–185. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185>
Kulikova E. Yu. Methodical principles for improving the ecological and technological reliability of urban underground structures. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6–1):176–185. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185>
15. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962(4):042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>



16. Kim D.Y., Farrokh E., Song M.K., Hyun K.S. Cutting tool wear evaluation for soft ground TBMs. In: *Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Surface challenges – Underground solutions*. 9–15th June 2017, Bergen, Norway. Bergen; 2017.
17. Потапова Е.В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. *Горные науки и технологии*. 2021;(6):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>
18. Kuepferle J., Roettger A., Thesen W., Alber M. Wear prediction for soft-ground tunneling tools – a new approach regarding the dominant influencing factors in the tribological system of tunneling tools. In: *Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Surface challenges – Underground solutions*. 9–15th June 2017, Bergen, Norway. Bergen; 2017.

Информация об авторе

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

Information about the author

Sergey A. Zhukov – CEO, Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian federation; ORCID [0009-0007-6492-6696](https://orcid.org/0009-0007-6492-6696); e-mail fragrante@mail.ru

Поступила в редакцию 04.04.2024
Поступила после рецензирования 26.05.2024
Принята к публикации 05.06.2024

Received 04.04.2024
Revised 26.05.2024
Accepted 05.06.2024