

УДК: 550.34.01, 550.8.05, 504.064

OECD: 1.05.GC, 1.06.GU

Роль демпфирования вибраций в предотвращении деформаций тоннелей метрополитена под воздействием динамических нагрузок

Андрианов С.В.^{1*}, Мингалева Т.А.²

¹Заведующий лабораторией геофизики,

²Старший научный сотрудник

^{1,2}АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Исследование посвящено изучению роли демпфирования вибраций в предотвращении деформаций тоннелей метрополитена под воздействием динамических нагрузок. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и долговечности подземных сооружений, особенно в условиях водонасыщенных песчаных грунтов, склонных к разжижению. Целью исследования является установление зависимостей между параметрами вибрационного воздействия и осадками тоннельной обделки. В работе использованы методы геодезического мониторинга и вибродиагностики, включая измерение виброускорений на рельсах и обделке тоннеля. Результаты показали, что зоны минимального затухания вибраций коррелируют с участками максимальных осадков, что подтверждает взаимосвязь между динамическими нагрузками и деформациями. Выявлено, что вертикальные виброускорения играют ключевую роль в передаче вибрационной энергии. На основе полученных данных предложены рекомендации для прогнозирования деформаций и разработки защитных мер.

Ключевые слова: тоннель, динамическая нагрузка, геодезический мониторинг, разжижение грунта, виброускорение, осадка, метрополитен

The role of vibration damping in preventing deformation of subway tunnels under dynamic loads

Andrianov S.V.^{1*}, Mingaleva T.A.²

¹Head of the Geophysics Laboratory, ²Senior Researcher

^{1,2}Joint stock company scientific, research, design and surveying institute
«Lenmetroprotrans», St. Petersburg, Russia

Abstract

The study is devoted to investigating the role of vibration damping in preventing deformations of subway tunnels under dynamic loads. The relevance of the work is determined by the necessity to ensure the safety and durability of underground structures, especially in water-saturated sandy soils prone to liquefaction. The aim of the research is to establish the relationships between the parameters of vibrational impact and the settlement of the tunnel lining. The study employed methods of geodetic monitoring and vibration diagnostics, including measurements of vibration acceleration on the rails and the tunnel lining. The results showed that zones of minimal vibration attenuation correlate with areas of maximum sag, which confirms the relationship between

*E-mail: andrianovsemen@gmail.com (Андрианов С.В.)

dynamic loads and deformations. It was revealed that vertical vibration accelerations play a key role in the transmission of vibrational energy. Based on the data obtained, recommendations are proposed for predicting deformations and developing protective measures.

Keywords: tunnel, dynamic load, geodetic monitoring, soil liquefaction, vibration accelerations, sag, subway

Введение

Тоннели занимают значимое место в транспортной инфраструктуре, при этом значительная часть эксплуатируемых во всем мире тоннелей, функционирующих на протяжении десятилетий, имеют разные типы обделки [1]. С развитием транспортной инфраструктуры в городских тоннелях метро возникают повреждения: трещины в бетоне и обделке, а также просачивание воды. Это происходит из-за сложных геологических условий, климатических изменений и нагрузок от транспорта [2] – [3]. Деградация и повреждение обделки снижают структурную целостность тоннелей, что негативно влияет на безопасность их эксплуатации [4].

Механическая устойчивость тоннеля в значительной степени определяется состоянием трещин в обделке. Традиционно оценка устойчивости осуществляется посредством визуального осмотра трещин [5], однако данный подход не позволяет достоверно прогнозировать разрушение конструкции, поскольку связь между поверхностными трещинами и нестабильностью обделки остается неоднозначной. В связи с этим актуальной задачей является разработка альтернативных методов диагностики.

В научной литературе рассматриваются различные неразрушающие методы контроля, такие как магнитный, ультразвуковой и георадарный методы [6] – [8]. Однако их применение ограничено получением локальных данных о состоянии конструкции, в то время как комплексная оценка тоннеля сопряжена с высокими временными и финансовыми затратами [9].

В последние годы внимание исследователей привлекли методы оценки состояния конструкций на основе анализа их вибрационных характеристик [4], [10]–[12]. Тем не менее, применение методов вынужденных колебаний для диагностики крупногабаритных сооружений сопряжено с существенными трудностями, включая необходимость использования мощных вибровозбудителей [13]. Более перспективным представляется подход, основанный на регистрации фоновых вибраций обделки [14]–[15], поскольку её устойчивость коррелирует с прочностью и жёсткостью, которые, в свою очередь, определяют динамические свойства конструкции. Повреждения обделки приводят к изменению её механических характеристик, что отражается в спектрах вибраций.

Вибрационные воздействия вызывают в обделке дополнительные динамические напряжения. Как показывает многолетний опыт эксплуатации метрополитенов, тоннельные конструкции, обжатые окружающим грунтом, способны воспринимать такие нагрузки. Однако длительное циклическое воздействие даже незначительной амплитуды может снижать трещиностойкость (особенно в зоне швов) и долговечность сооружений.

Динамические воздействия изменяют поведение грунтового массива. В несвязных грунтах циклические нагрузки вызывают уплотнение, а в водонасыщенных – рост порового давления, снижающего эффективные напряжения. Это может привести к разжижению грунта (рисунок 1 [16]) и увеличению деформаций, провоцируя осадки тоннеля. Однако механизм возбуждения вибраций в грунте и его реакция на динамические воздействия остаются недостаточно изученными. Проблема усугубляется отсутствием

экспериментальных данных о диссипативных свойствах грунтов в естественных условиях трасс метрополитена, а также о их циклической прочности.

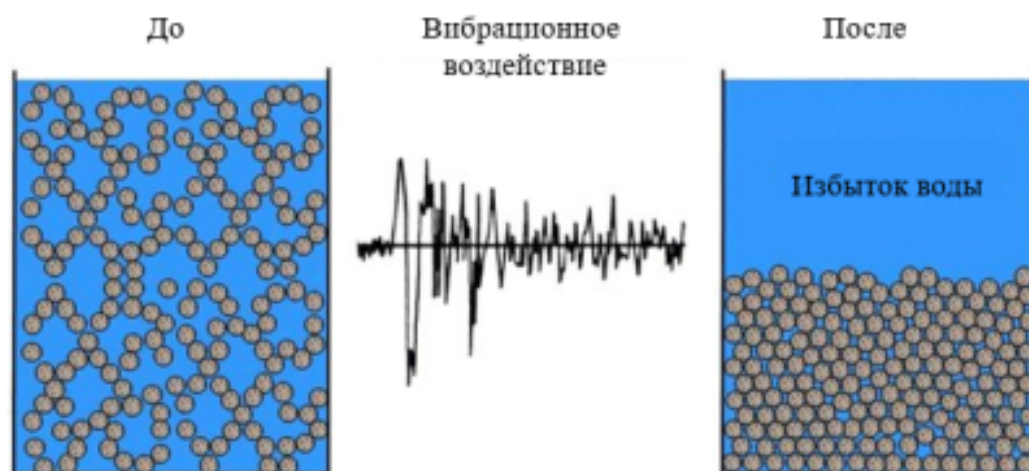


Рисунок 1 – Процесс разжижения грунта (адаптировано из [16])

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения влияния вибрационных воздействий на деформационное поведение тоннельных конструкций, особенно в условиях водонасыщенных песчаных грунтов, склонных к разжижению. Подвижной состав метрополитена генерирует динамические нагрузки, передающиеся через рельсовую систему и путевую плиту на обделку, а затем – на окружающий грунт. В зонах с повышенной склонностью грунтов к разжижению это может привести к значительным осадкам, смещениям сооружений, снижению несущей способности основания и даже к аварийным ситуациям. Таким образом, исследование взаимосвязи между уровнем вибраций и величиной осадок имеет важное значение для обеспечения надежности подземных сооружений.

Целью работы является установление качественных и количественных зависимостей между параметрами вибрационного воздействия и осадками тоннельной обделки.

1 Характеристики объекта исследования

Объектом исследования является участок перегонного тоннеля метрополитена протяженностью около 1000 пог.м. Тоннель относится к категории неглубокого заложения и находится на глубине 3-7 м от дневной поверхности. Конструкция тоннеля выполнена из чугунной обделки диаметром 5,49 м (внутренний диаметр – 5,1 м), каждое кольцо которой состоит из 8 тубингов шириной по 1 м. На некоторых участках пути предусмотрено усиление обделки металлоизоляцией. В районе станции обделка выполнена из сборного железобетона.

Геологические условия участка характеризуются распространением водонасыщенных песчаных отложений с различной степенью зернистости, перемежающихся прослоями суглинистых грунтов, что обуславливает повышенную чувствительность массива к динамическим нагрузкам.

Безбалластная система пути, смонтированная в тоннельной выработке, базируется на железобетонной путевой плите, обеспечивающей высокую геометрическую стабильность рельсошпальной решетки. Однако данный конструктивный тип демонстрирует пониженную эффективность в части демпфирования акустических колебаний и вибрационного воздействия по сравнению с традиционными балластными системами [17].

На данном участке выявлены следующие дефекты: трещины, оголение арматуры, сколы, каверны, коррозионные повреждения, течи, выщелачивание бетона и вынос грунта (рисунок 2). Эти дефекты могут влиять на динамическое поведение тоннеля, изменяя его реакцию на внешние воздействия.

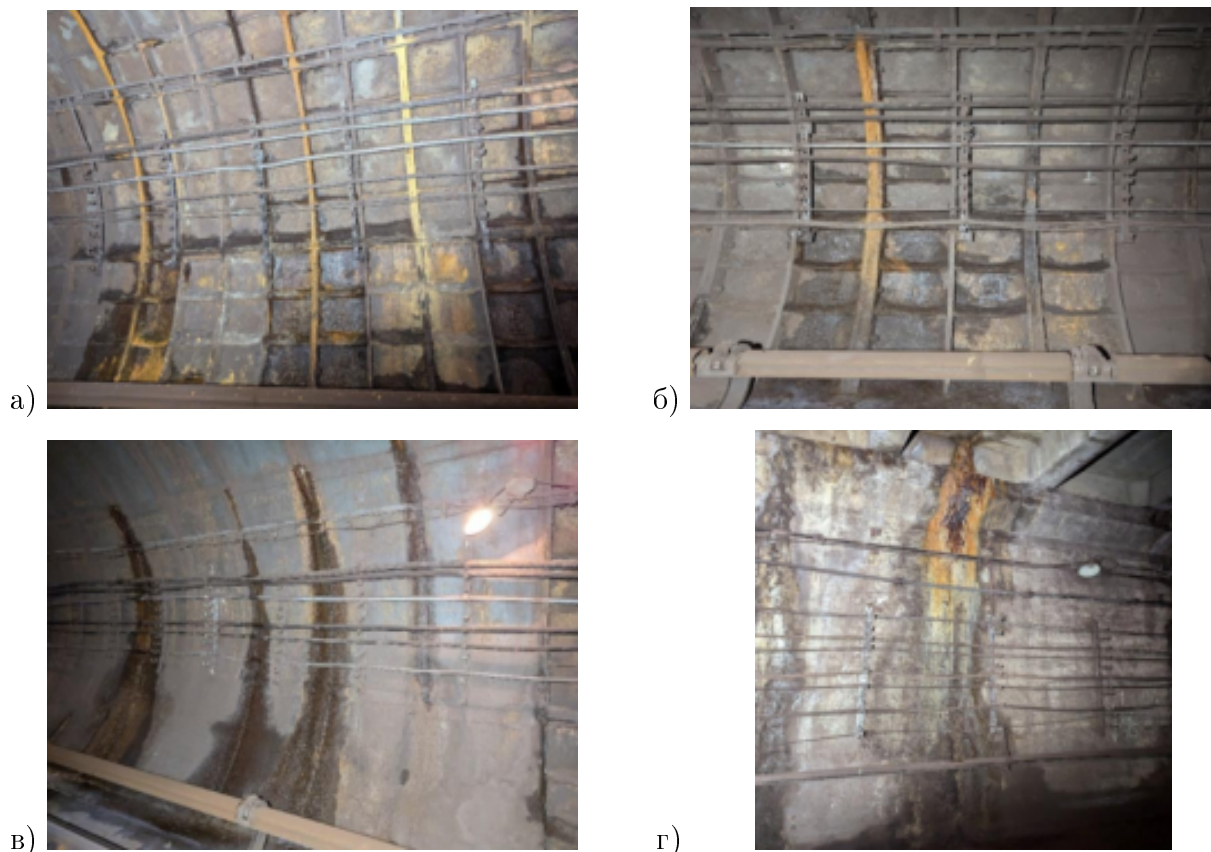


Рисунок 2 – Характерные дефекты обделки тоннеля на исследуемом перегоне (коррозионные повреждения, течи, намокание конструкции): а, б – участки с чугунной обделкой; в – участок с металлоизоляцией; г – участок со сборной железобетонной обделкой

Участок был выбран для исследования по следующим причинам: наличие явно выраженных дефектов, регулярная интенсивная эксплуатация тоннеля, изученные грунтовые условия и доступ к внутреннему пространству для установки измерительного оборудования.

Водопроявления через край металлоизоляции свидетельствуют о циклическом изменении горизонтального диаметра тоннеля, волновом раскрытии-закрытии швов и подсосе грунтовой воды. Такие процессы могут быть связаны в том числе с вибрационным воздействием от проходящих поездов [18]. На амплитуду вынужденных колебаний обделок, как показывает анализ литературных источников, существенное влияние оказывают скорость движения поездов, а также и их нагрузка.

2 Анализ осадок тоннеля на основе данных геодезического мониторинга

Исследование осадочных деформаций тоннеля проводилось на основе геодезического мониторинга за период с декабря 2020 г. по июнь 2024 г. Основной целью работы являлась оценка состояния тоннельной обделки и выявление участков, требующих усиленного контроля или ремонтных вмешательств.

Исходное положение тоннеля в абсолютных отметках (рисунок 3) демонстрирует

сопоставление начальных и проектных значений, что служит базой для последующего анализа динамики деформаций.

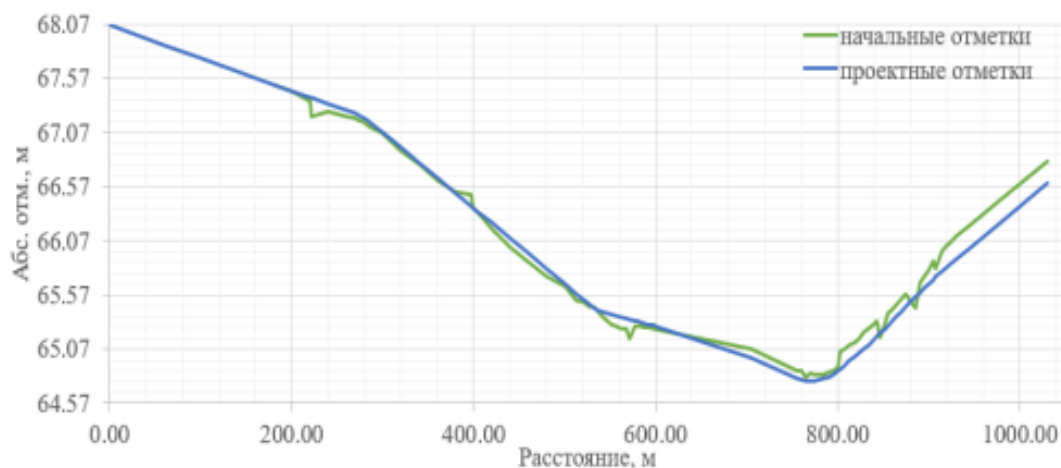


Рисунок 3 – Исходное положение тоннеля в абсолютных отметках (сравнение начальных и проектных значений)

Сравнение данных за 2020 и 2024 гг. позволило выявить значительные изменения в геометрии тоннеля, которые могут оказывать влияние на вибрационные характеристики конструкции. В частности, увеличение осадок может способствовать росту виброускорений как на обделке, так и на рельсовом пути, что требует дополнительного изучения взаимосвязи между деформациями и динамическими нагрузками. Аналогичные деформационные изменения были зарегистрированы на параллельном пути, что свидетельствует о возможном преобладающем влиянии геологических факторов на формирование осадочных деформаций тоннельных конструкций.

Результаты мониторинга показали неоднородное распределение осадок по длине тоннеля. Наибольшие деформации зафиксированы на интервале 270-400 м, где максимальное отклонение достигло -70 мм (рисунок 4). При этом участки 0-100 м и 700-1025 м характеризуются относительной стабильностью, с колебаниями вблизи нулевых значений. Локальные минимумы осадок выделены в пяти зонах: 240 м (-43 мм), 310 м (-66 мм), 410 м (-43 мм), 490 м (-26 мм) и 565 м (-25 мм). Такое распределение указывает на возможную связь деформаций с неоднородностью грунтовых условий или изменением напряжённого состояния обделки.

Особое внимание привлекает участок на расстоянии 310 м от начала исследуемой трассы. Мониторинг вертикальных осадок (рисунок 5) выявил устойчивую тенденцию к увеличению деформаций: за период наблюдений отклонение от начальной отметки возросло с -68 мм до -132 мм, что составило -64 мм. Несмотря на кратковременную стабилизацию в сентябре 2021 – феврале 2022 гг., общий тренд остаётся негативным. Подобная динамика требует немедленного принятия мер, включая усиление конструкций и регулярный контроль, чтобы исключить риск аварийных ситуаций.

Наблюдаемые деформации могут быть обусловлены совокупностью факторов, таких как сезонные колебания грунтовых вод, техногенные воздействия или изменение механических свойств окружающего массива.



Рисунок 4 – График отклонения деформационных и путевых реперов на рассматриваемом участке в период с декабря 2020г по июнь 2024г

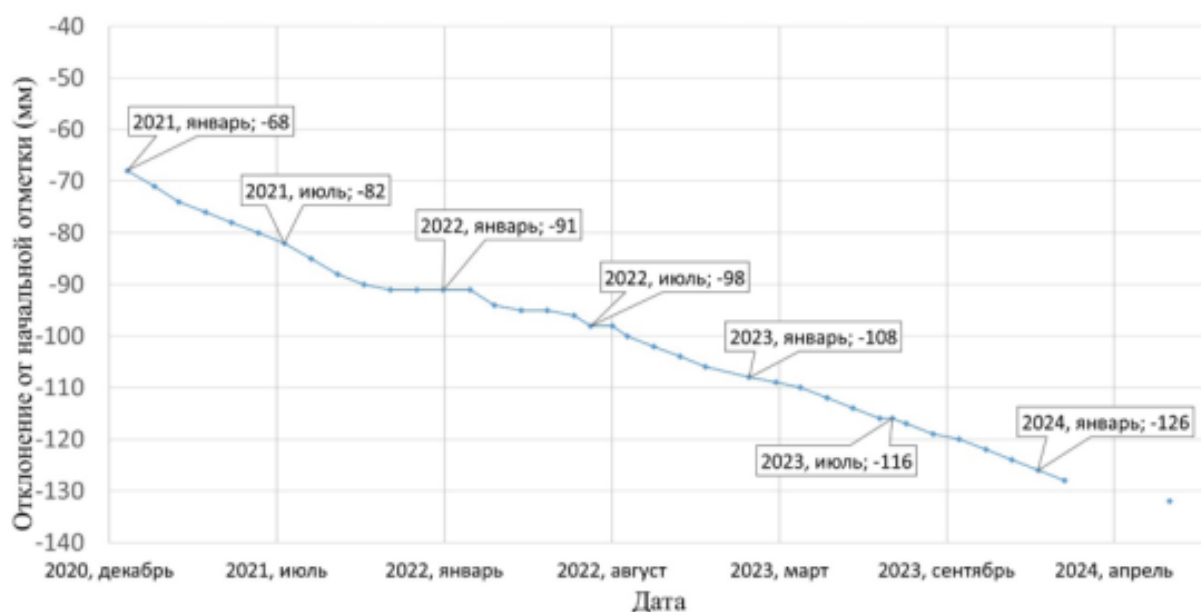


Рисунок 5 – График мониторинга вертикальных осадок участка тоннеля на расстоянии 310 м от начала исследуемого участка перегона тоннеля

3 Исследования динамических характеристик «рельс-обделка»

В процессе эксплуатации тоннелей метро в их несущих конструкциях возникают колебания, вызванные динамическим воздействием подвижного состава на верхнее строение пути. Передача вибраций особенно ощутима в местах контакта «колесо-рельс», где имеются конструктивные особенности: стыки, стрелочные переводы, кривые участки. На уровень вибраций также влияет техническое состояние верхнего строения пути и подвижного состава. Амплитуда динамического усилия зависит от скорости движения, загрузки составов, жесткости основания и геометрии пути.

Для измерения вибраций использовался переносной регистратор-анализатор динамических параметров MEPA MIC-355M (ООО "НПП "Мера") и трехкомпонентные акселерометры PCB PIEZOTRONICS модели 354C03 (PCB PIEZOTRONICS, Inc.), установленные на рельсе, поверхности путевой плиты и обделке тоннеля (N - вдоль тоннеля, E - поперек тоннеля и Z - вертикальная компонента, рисунок 6). Измерения проводились в ночное время с шагом 20 м по длине тоннеля. Крепление датчиков осуществлялось специальной восковой мастикой, а источником вибраций служил безынерционный молот. Полученные данные позволяют оценить эффективность различных конструкций верхнего строения пути и демпфирование вибраций.

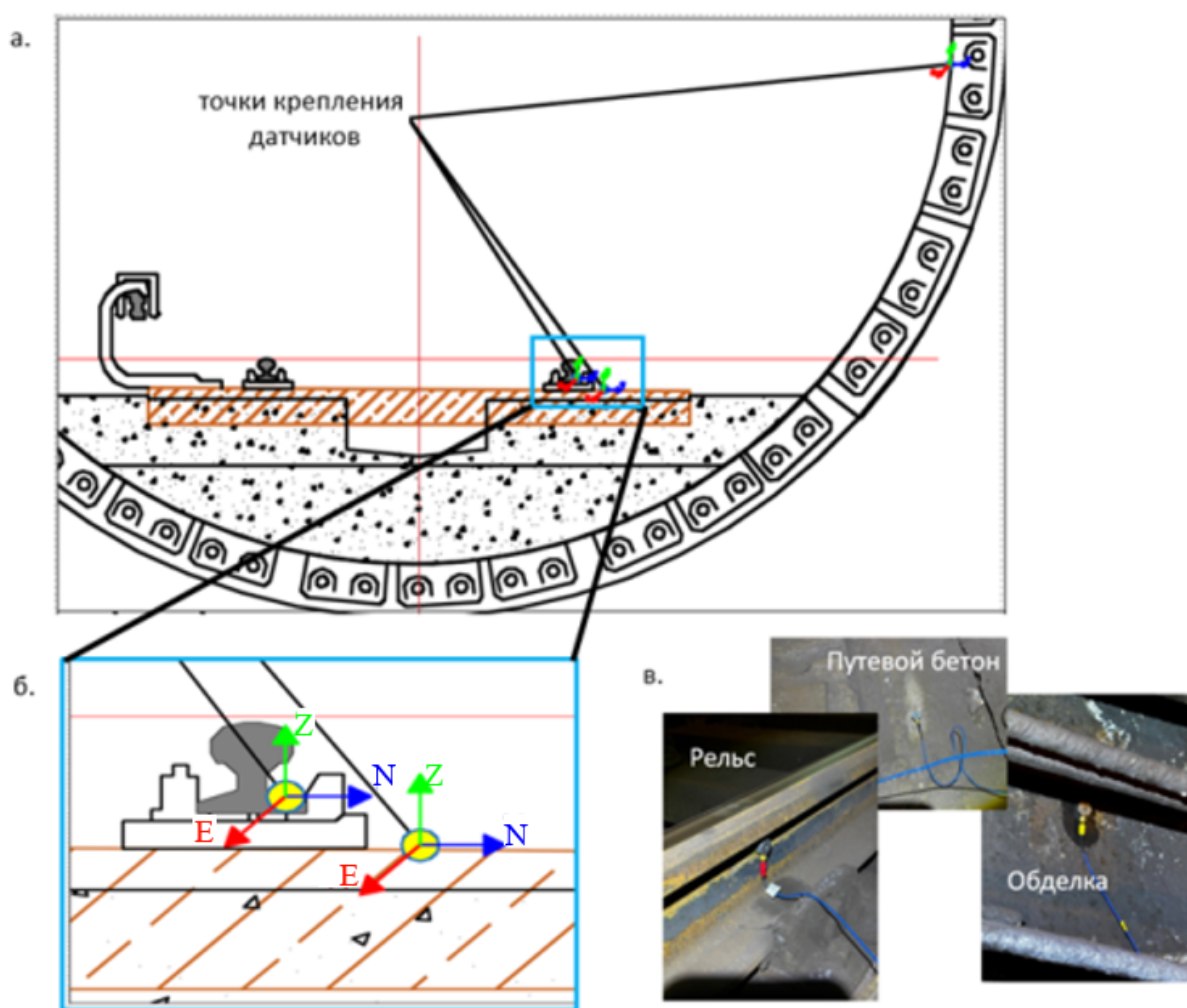
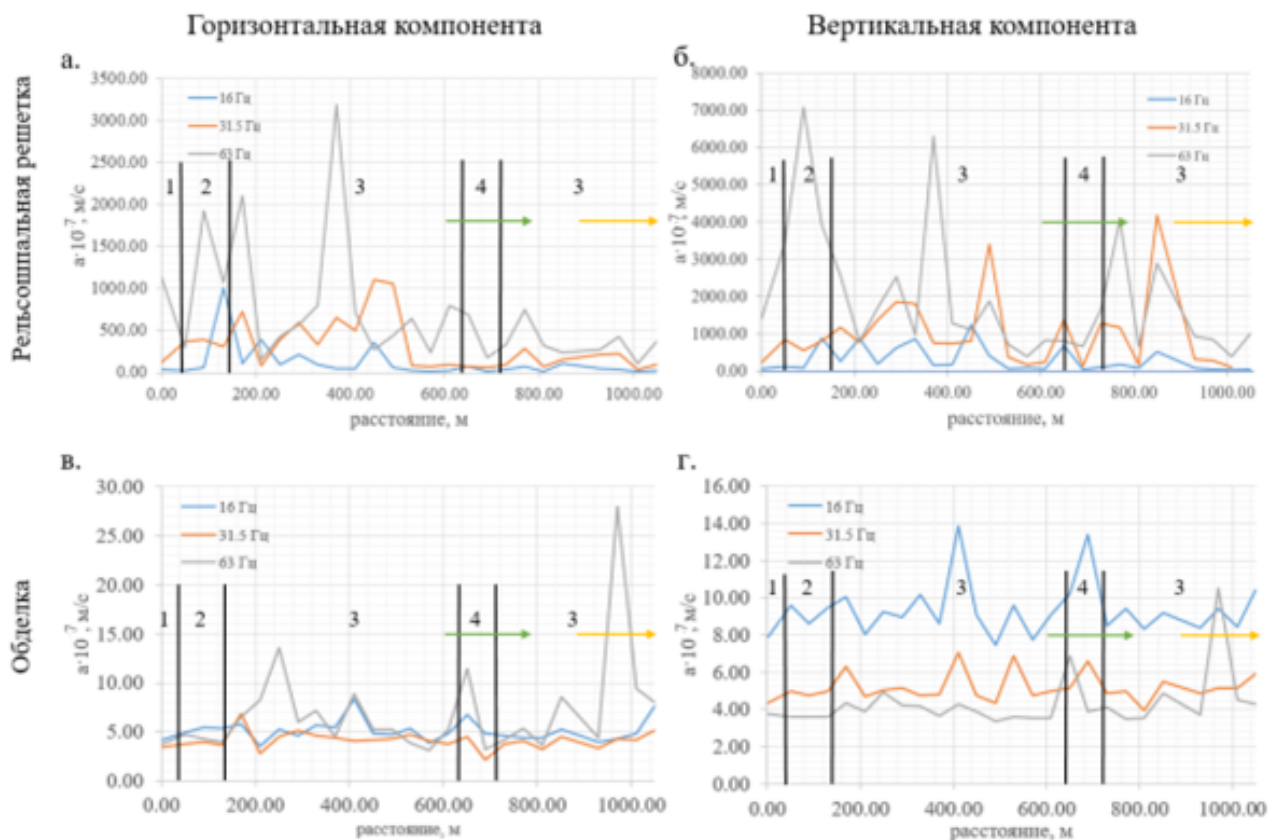


Рисунок 6 – Схема крепления датчиков: а - общий вид, б - установка пьезодатчиков на подошве рельса, шпале (опоре) для измерения виброскорости; в - внешний вид датчиков, установленных на рельсе, путевом бетоне и обделке

По аналогичной методике были выполнены натурные измерения вибраций на рельсе и обделке в дневное время, во время проезда электропоездов на различных участках тоннеля (в зоне температурного шва и на участке без стыков рельсов), с целью наблюдения за фактическим вибрационным воздействием на обделку тоннеля от движения электропоезда, движущегося с максимальной установленной скоростью (до 60 км/ч).

Динамические нагрузки, возникающие при движении поезда, передаются через рельсошпальную решетку на обделку и далее в окружающий грунтовый массив.

Согласно установленным закономерностям, скорость затухания колебаний находится в обратной зависимости от их частотных характеристик. Результаты экспериментальных исследований показали максимальную эффективность передачи колебательной энергии в частотном диапазоне 100-125 Гц. Для анализа вибрационных воздействий использовались октавные полосы с соответствующими среднегеометрическими частотами 31,5 и 63 Гц (далее октавные полосы 31,5 и 63 Гц), что обусловлено регистрацией максимальных амплитуд вынужденных колебаний обделки именно в указанных диапазонах при прохождении электропоездов. В ходе дальнейших исследований основное внимание уделялось частотным диапазонам в октавных полосах частот 16, 31,5 и 63 Гц [19] в поперечном (Е) и вертикальном (Z) направлениях. Продольная составляющая вибраций не рассматривалась ввиду ее незначительного влияния, подтвержденного результатами натурных измерений. Полученные значения виброускорений представлены на рисунке 7.



Условные обозначения: 1 – станция метро; 2 – сборная железобетонная обделка; 3 – чугунная обделка; 4 – металл. изоляция; зеленая стрелка – поворот тоннеля, оранжевая стрелка – крутой поворот тоннеля

Рисунок 7 – Распределение виброускорений по горизонтальной (Е) и вертикальной (Z) компонентам для рельсошпальной решетки (а, б) и обделки (в, г) в зависимости от расстояния

Результаты измерений демонстрируют значительную вариабельность виброускорения в зависимости от точки измерения и частотного диапазона. Наибольшие значения зафиксированы в районе рельсошпальной решетки, где вертикальная компонента достигает $7083,42 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$ в октавной полосе частот 63 Гц, что свидетельствует о высокой чувствительности рельсовой системы к ударным воздействиям в этом частотном диапазоне. Горизонтальная компонента на рельсах также показывает существенные колебания, особенно в октавной полосе с среднегеометрической частотой 16 Гц, где в

отдельных точках (например, на расстоянии 130 м) наблюдается резкий рост амплитуды.

При переходе к обделке тоннеля анализ данных выявляет локальные максимумы, например, на октавной полосе с среднегеометрической частотой 63 Гц на расстоянии 970 м ($27,9910^{-7}$ м/с²), которые могут указывать на наличие зон с измененными динамическими характеристиками.

Частотный анализ данных показывает, что реакция конструкции существенно зависит от частоты возбуждения. На рельсах наблюдается выраженный рост амплитуды с увеличением частоты от 16 Гц до 63 Гц. В то же время на обделке такая зависимость менее выражена, что может объясняться фильтрующими свойствами тоннельной конструкции и различными механизмами передачи колебаний на разных частотах.

Полученные результаты согласуются с теоретическими представлениями о динамике тоннельных конструкций и подтверждают эффективность метода для диагностики их состояния. Выявленные локальные особенности вибрационного отклика могут служить индикаторами изменений в конструкции.

Вибрации, возбуждаемые ударной импульсной нагрузкой, использовались для вычисления передаточных функций между точками установки датчиков в системе «рельсошпальная решетка-обделка». Передаточные функции вычислялись следующим образом:

- усреднялись вибрации, зарегистрированные при нескольких ударах;
- вычислялись спектры Фурье колебаний в различных точках (с помощью WinПОС (НПП «МЕРА»);
- вычислялась передаточные функции между заданными точками измерения как отношение модулей спектров колебаний в этих точках.

Вычисление передаточных функций (коэффициентов передачи) «рельсошпальная решетка-обделка» для каждой точки измерения, горизонтального и вертикального направлений (Е и Z) и каждой октавной полосы осуществлялось по формуле:

$$k_p = \frac{a}{a}, \quad (1)$$

где $a_{\text{обделка}}$ – среднеквадратичное значение виброускорения на обделке в выбранной точке измерения, направлении и октавной полосе, м/с²; $a_{\text{рельс}}$ – аналогичное значение виброускорения на рельсошпальной решетке, м/с².

Для большей наглядности от передаточной функции была взята обратная величина – коэффициент затухания вибраций от рельсошпальной решетки к обделке ($1/k_p$).

Результаты обработки и анализа измерительной информации приведены на рисунках 8 и 9.

4 Результаты комплексного анализа

Для обобщенного анализа были выбраны все полученные параметры вибрационного режима участка тоннеля. На рисунках 8 и 9 показаны совмещенные графики амплитуд осадок участков тоннелей по данным геодезического мониторинга за 4 года (черный график) и величины затухания вибрационного воздействия вдоль тоннеля в октавных полосах с соответствующими среднегеометрическими частотами 16, 31,5 и 63 Гц (синий, зеленый и красный графики соответственно). Сверху на рисунках приведены совмещенные результаты измерений, полученных в направлении поперек тоннеля (рисунок 8), снизу по вертикальной компоненте (рисунок 9).



Условные обозначения: 1 - станция метро; 2 - сборная железобетонная обделка; 3 - чугунная обделка; 4 - металл изоляция; зеленая стрелка - поворот тоннеля, оранжевая стрелка - крутой поворот тоннеля

Рисунок 8 – Графики коэффициента затухания вибрации от рельсошпальной решетки к обделке и величины осадок тоннеля для горизонтальной составляющей



Условные обозначения: 1 - станция метро; 2 - сборная железобетонная обделка; 3 - чугунная обделка; 4 - металл изоляция; зеленая стрелка - поворот тоннеля, оранжевая стрелка - крутой поворот тоннеля

Рисунок 9 – Графики коэффициента затухания вибрации от рельсошпальной решетки к обделке и величины осадок тоннеля для вертикальной составляющей

Сравнительный анализ графиков затухания вибраций от рельсошпальной решетки к обделке на октавных полосах с соответствующими среднегеометрическими частотами 16, 31,5 и 63 Гц с результатами геодезического мониторинга осадок тоннеля за четырёхлетний период выявил практически полное соответствие участков аномального поведения. Наблюдается устойчивая корреляция между зонами минимального затухания вертикальных (K_z) и поперечных (K_e) вибраций и участками максимальных осадок тоннеля. Эти участки характеризуются наибольшим воздействием низкочастотных колебаний на обделку и окружающий грунтовый массив, что подтверждается геодезическими измерениями.

Распределение коэффициентов затухания вдоль тоннеля показывает значительную пространственную изменчивость. В зонах сильных осадок, таких как интервал 270-400 м, наблюдается снижение значений коэффициентов затухания. Например, на отметке 320 м в октавной полосе с среднегеометрической частотой 16 Гц горизонтальный коэффициент K_e составляет всего 2,20, а вертикальный K_z - 3,90, что свидетельствует о слабом гашении вибрации и возможной резонансной передаче энергии на конструкцию. Вблизи локальных минимумов, таких как 200 м и 410 м, также зафиксированы пониженные значения коэффициентов, коррелирующие с увеличением деформационных отклонений.

На участках, демонстрирующих минимальные деформационные изменения, наблюдаются сложные распределения коэффициентов затухания. В частности, на интервале 700-1025 м, имеющем криволинейные участки трассы, наблюдается увеличение коэффициента вертикального затухания K_z до 1000 в октавной полосе с среднегеометрической частотой 63 Гц. При этом в пределах поворотов наблюдается общая тенденция по снижению коэффициентов затухания. Данный факт может быть обусловлен изменением конструктивной схемы тоннеля за счет введения дополнительных элементов жесткости в зонах криволинейных сопряжений. Подобное конструктивное решение, вероятно, приводит к оптимизации распределения динамических нагрузок по обделке, что находит отражение в существенном снижении деформационных проявлений.

Полученные данные согласуются с теоретическими представлениями о влиянии пространственной жесткости конструкции на процессы виброгашения (например, [20]), где увеличение конструктивной жесткости способствует более равномерному распределению динамических воздействий и снижению локальных деформационных процессов.

Подобная ситуация наблюдается и в начале изучаемого участка (0-100 м), где при октавной полосе с среднегеометрической частотой 16 Гц пониженные значения коэффициентов затухания вибрации свидетельствуют о пониженной эффективности виброгашения. Однако, в отличие от других участков с аналогичными параметрами, здесь отсутствуют значительные деформации, что связано с меньшими скоростями движения поездов на станции по сравнению с перегонными участками. Кроме того, конструктивные особенности станционного узла, включая возможное наличие дополнительных усиливающих элементов, создают принципиально иные условия взаимодействия системы "рельсошпальная решетка-обделка-грунтовый массив".

Таким образом, проведенный анализ подтверждает наличие устойчивой связи между коэффициентами затухания вибрации и деформационными процессами в тоннеле. Полученные результаты имеют практическое значение для прогнозирования развития деформаций и разработки мер по обеспечению долговременной устойчивости конструкции и снижения вибрационного воздействия. Дальнейшие исследования целесообразно направить на детальное моделирование динамического взаимодействия элементов системы с учетом нелинейных свойств грунтов.

На основе полученных данных, в целях минимизации дальнейших деформаций тоннельной конструкции, предложены рекомендации, в общем уменьшающие вибрационное

воздействие от движения электропоездов (установка резиновых прокладок между рельсами и шпалами, использование бесстыковых путей, своевременный ремонт и обслуживание подвижного состава, введение ограничений на скорость движения поездов на проблемных участках тоннелей).

Заключение

Проведенное исследование позволило установить ключевые закономерности влияния вибрационных нагрузок на деформации тоннелей метрополитена. Результаты показали, что зоны минимального затухания вибраций коррелируют с участками максимальных осадок, подтверждая взаимосвязь между динамическими воздействиями и деформациями. Вертикальные виброускорения играют значительную роль в передаче вибрационной энергии, особенно в диапазонах частот 16–63 Гц, что было получено в ходе натурных наблюдений за фактическим вибрационным воздействием на обделку тоннеля от движения электропоезда. Выявлено, что водонасыщенные песчаные грунты склонны к разжижению под действием циклических нагрузок.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых тоннелей и реконструкции существующих, а также для оптимизации эксплуатационных режимов метрополитена.

Внедрение предложенных мер позволит снизить затраты на ремонт и обслуживание тоннелей за счет своевременного выявления и устранения деформаций. Экономический эффект достигается за счет увеличения срока службы конструкций и минимизации риска аварийных ситуаций.

Исследование подтвердило актуальность и эффективность применения вибродиагностики для обеспечения безопасности и долговечности тоннелей метрополитена. Дальнейшие исследования рекомендуется направить на изучение долгосрочных эффектов вибрационных воздействий и разработку адаптивных систем защиты.

Список использованных источников

1. Soheyli M.R., Akhaveissy A.H., Mirhosseini S.M. Large-scale experimental and numerical study of blast acceleration created by close-in buried explosion on underground tunnel lining // Shock and Vibration. 2016. Vol. 2016. Article ID 8918050. 9 p. DOI: 10.1155/2016/8918050.
2. Hu J., Bian X. Experimental and numerical studies on dynamic responses of tunnel and soils due to train traffic loads // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 128. P. 104628.
3. Liu Y., Li H., Wang Y., Men Y., Xu Q. Damage detection of tunnel based on the high-density cross-sectional curvature obtained using strain data from BOTDA sensors // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 158. P. 107728.
4. Hou R., Li T., Zhang Z. et al. Experimental study on modal analysis and vibration response of tunnel structures under different damage conditions due to subway train loads // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. P. 3022. DOI: 10.1038/s41598-025-87004-9.
5. Hayashi Y., Imai J., Yoshiduka M., Suzuki M., Shigeta Y., Nakagawa K. Restoration measures of tunnel experienced large deformation due to natural disaster // Doboku Gakkai Ronbunshu. 2004. N 756. P. 61-74.
6. Amalia N., Husaini M., Ngurah K., Probo N., Widodo W. Identification and monitoring of subsurface structure of tunnel using electromagnetic method // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1861. P. 030047. DOI: 10.1063/1.4990934.

7. Poncetti B.L., Ruiz D.V., Assis L.S.d., Machado L.B., Silva T.B.d., Akinlalu A.A., Futai M.M. Tunnel Inspection Review: Normative Practices and Non-Destructive Method Advancements for Tunnels with Concrete Cover // *Applied Mechanics*. 2025. Vol. 6. P. 41. DOI: 10.3390/applmech6020041.
8. Андрианов С.В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 5. С. 124-132. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.
9. Park S., Choi S. Development of methodology for estimating the effective properties of containment buildings: Mid-Term Report KINS/HR-836. Korea Institute of Nuclear Safety, 2008.
10. Zhou Q., Zhang Q., Sun M., Huang X., Huang Z., Wen X., Qiu Y. Measuring Vibrations of Subway Tunnel Structures with Cracks // *Buildings*. 2024. Vol. 14. P. 2660. DOI: 10.3390/buildings14092660.
11. Gu Z., Wei H., Liu Z., Zhang M. Dynamic Response Mechanism of Silt Ground under Vibration Load // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. P. 10335. DOI: 10.3390/su141610335.
12. Zhang J., Yan Q., Sun M., Li B., Chen W., Chen H. Experimental study on the vibration damping of two parallel shield tunnels connected by an assembled transverse passage // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 107. P. 103659. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103659.
13. Peeters B., Maeck J., De Roeck G. Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects // *Smart Materials and Structures*. 2001. Vol. 10, N 3. P. 518-527. DOI: 10.1088/0964-1726/10/3/314.
14. Gao Y., Jiang Y., Li B. Voids delineation behind tunnel lining based on the vibration intensity of microtremors // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 51. P. 338-345. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.036.
15. Андрианов С.В., Мингалева Т.А. Диагностика состояния тоннельных конструкций посредством анализа спектра собственных колебаний. Двадцать шестая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. Пермь: ГИ УрО РАН, 2025. 210 с.
16. Xue X., Liu E. Seismic liquefaction potential assessed by neural networks // *Environmental Earth Sciences*. 2017. Vol. 76. P. 192. DOI: 10.1007/s12665-017-6523-y.
17. Савин А. В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения // *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике*. 2017. №1 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-konstruktsii-puti-dlya-vysokoskorostnogo-dvizheniya> (дата обращения: 25.06.2025).
18. Yang W., Chen Z., Xu Z.-Y., Yan Q., He C., Kai W. Dynamic response of shield tunnels and surrounding soil induced by train vibratio // *Rock Soil Mech*. 2018. Vol. 39. P. 537–545.
19. СП 23-105-2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена.
20. Yang W., Zhang C., Liu D., Tu J., Yan Q., Fang Y., He C. The effect of cross sectional shape on the dynamic response of tunnels under train-induced vibration loads // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 90. P. 231–238. DOI: 10.1016/j.tust.2019.05.006.

References

1. Soheyli M.R., Akhaveissy A.H., Mirhosseini S.M. Large-scale experimental and numerical study of blast acceleration created by close-in buried explosion on underground

tunnel lining // Shock and Vibration. 2016. Vol. 2016. Article ID 8918050. 9 p. DOI: 10.1155/2016/8918050.

2. Hu J., Bian X. Experimental and numerical studies on dynamic responses of tunnel and soils due to train traffic loads // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 128. P. 104628.

3. Liu Y., Li H., Wang Y., Men Y., Xu Q. Damage detection of tunnel based on the high-density cross-sectional curvature obtained using strain data from BOTDA sensors // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. Vol. 158. P. 107728.

4. Hou R., Li T., Zhang Z. et al. Experimental study on modal analysis and vibration response of tunnel structures under different damage conditions due to subway train loads // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. P. 3022. DOI: 10.1038/s41598-025-87004-9.

5. Hayashi Y., Imai J., Yoshiduka M., Suzuki M., Shigeta Y., Nakagawa K. Restoration measures of tunnel experienced large deformation due to natural disaster // Doboku Gakkai Ronbunshu. 2004. N 756. P. 61-74.

6. Amalia N., Husaini M., Ngurah K., Probo N., Widodo W. Identification and monitoring of subsurface structure of tunnel using electromagnetic method // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1861. P. 030047. DOI: 10.1063/1.4990934.

7. Poncetti B.L., Ruiz D.V., Assis L.S.d., Machado L.B., Silva T.B.d., Akinlalu A.A., Futai M.M. Tunnel Inspection Review: Normative Practices and Non-Destructive Method Advancements for Tunnels with Concrete Cover // Applied Mechanics. 2025. Vol. 6. P. 41. DOI: 10.3390/applmech6020041.

8. Andrianov S.V. Monitoring the condition of the behind-lining space in mine workings using the ground-penetrating radar method. Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (Mining Informational and Analytical Bulletin), 2019, no. 5, pp. 124-132. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

9. Park S., Choi S. Development of methodology for estimating the effective properties of containment buildings: Mid-Term Report KINS/HR-836. Korea Institute of Nuclear Safety, 2008.

10. Zhou Q., Zhang Q., Sun M., Huang X., Huang Z., Wen X., Qiu Y. Measuring Vibrations of Subway Tunnel Structures with Cracks // Buildings. 2024. Vol. 14. P. 2660. DOI: 10.3390/buildings14092660.

11. Gu Z., Wei H., Liu Z., Zhang M. Dynamic Response Mechanism of Silt Ground under Vibration Load // Sustainability. 2022. Vol. 14. P. 10335. DOI: 10.3390/su141610335.

12. Zhang J., Yan Q., Sun M., Li B., Chen W., Chen H. Experimental study on the vibration damping of two parallel shield tunnels connected by an assembled transverse passage // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 107. P. 103659. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103659.

13. Peeters B., Maeck J., De Roeck G. Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects // Smart Materials and Structures. 2001. Vol. 10, N 3. P. 518-527. DOI: 10.1088/0964-1726/10/3/314.

14. Gao Y., Jiang Y., Li B. Voids delineation behind tunnel lining based on the vibration intensity of microtremors // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 51. P. 338-345. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.036.

15. Andrianov S.V., Mingaleva T.A. Diagnostics of tunnel structures condition through analysis of natural vibration spectrum. Twenty-sixth Ural Youth Scientific School on Geophysics: Collection of scientific papers. Perm: GI UrO RAN, 2025. 210 p.

16. Xue X., Liu E. Seismic liquefaction potential assessed by neural networks // Environmental Earth Sciences. 2017. Vol. 76. P. 192. DOI: 10.1007/s12665-017-6523-y.

17. Savin A.V. Selection of track structure for high-speed traffic. Transport Rossiyskoy

Federatsii (Transport of the Russian Federation: Journal on Science, Practice, and Economics), 2017, no. 1 (68). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vybor_konstruktsii-puti-dlya-vysokoskorostnogo-dvizheniya (accessed: 25.06.2025).

18. Yang W., Chen Z., Xu Z.-Y., Yan Q., He C., Kai W. Dynamic response of shield tunnels and surrounding soil induced by train vibratio // Rock Soil Mech. 2018. Vol. 39. P. 537–545.

19. SP 23-105-2004. Vibration assessment during design, construction and operation of metro facilities.

20. Yang W., Zhang C., Liu D., Tu J., Yan Q., Fang Y., He C. The effect of cross sectional shape on the dynamic response of tunnels under train-induced vibration loads // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 90. P. 231–238. DOI: 10.1016/j.tust.2019.05.006.