

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 624.19:69.058.2
DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-46-63

Современные подходы к мониторингу деформаций транспортных тоннелей: технологии, принципы и направления развития

П.А. Егорычев, А.А. Игнатьев

Петр Алексеевич Егорычев, Алексей Александрович Игнатьев*
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
Москва, Российская Федерация
*petrbsk07@gmail.com, Alexassis@yandex.ru**

© П.А. Егорычев, А.А. Игнатьев, 2026

Статья посвящена изучению эволюции мониторинга транспортных тоннелей – от эпизодических геодезических наблюдений до современных цифровых систем. Актуальность исследования обусловлена старением значительной части тоннельного фонда, усложнением геотехнических условий и ростом требований к безопасности. На основе анализа передовой европейской школы выделены ключевые принципы мониторинга, включающие непрерывность, многоканальность, интеграцию с расчетными моделями и эксплуатацией. Рассмотрены стационарные комплексы мониторинга технического состояния конструкций, мобильные системы на основе наземного и мобильного лазерного сканирования, а также распределенные волоконно-оптические измерительные комплексы. Проведен сравнительный анализ методов мониторинга по показателям точности, пространственного охвата и режима работы. Показаны ключевые тенденции в отрасли: движение к режиму измерений в реальном времени, интеграция с цифровыми двойниками, внедрение машинного обучения. Представлены ограничения существующих решений: преобладание «фиксационного» мониторинга и формализация задач раннего обнаружения деформационных процессов. Обоснована необходимость перехода от мониторинга как «съемки состояния» к предиктивной безопасности и ориентированному управлению жизненным циклом тоннелей, в том числе в свете цифровой трансформации отрасли.

Ключевые слова: мониторинг тоннелей, европейская школа, раннее предупреждение деформаций, лазерное сканирование, волоконно-оптические датчики, цифровой двойник

Для цитирования:
Егорычев П.А., Игнатьев А.А. Современные подходы к мониторингу деформаций транспортных тоннелей: технологии, принципы и направления развития // *Умные композиты в строительстве.* 2026. Т. 7, вып. 3. С. 46-63. URL: https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-46-63

SCIENTIFIC ARTICLE
DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-46-63

Modern approaches to monitoring deformations of transport tunnels: technologies, principles and development trends

P.A. Egorychev, A.A. Ignatev

Petr Alekseevich Egorychev, Aleksei Aleksandrovich Ignatev*
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation
*petrbsk07@gmail.com, Alexassis@yandex.ru**

© P.A. Egorychev, A.A. Ignatev, 2026

The article examines the evolution of transport tunnel monitoring – from episodic geodetic observations to modern digital systems. The relevance of the study is due to the aging of a significant part of the tunnel stock, the increasing complexity of geotechnical conditions, and the growing safety requirements for infrastructure. Based on an analysis of the advanced European school, key monitoring principles have been identified, including continuity, multi-channel data acquisition, integration with computational models, and operational feedback. Stationary structural health monitoring (SHM) systems, mobile systems based on terrestrial and mobile laser scanning, as well as distributed fiber-optic sensing systems are examined. A comparative analysis of monitoring methods is conducted in terms of accuracy, spatial coverage, and operating mode. Key trends in the industry are shown: the move toward real-time measurements, integration with digital twins, and the implementation of machine learning. The limitations of existing solutions are presented: the predominance of "fixation" monitoring and the formalization of tasks related to the early detection of deformation processes. The necessity of transitioning from monitoring as a "state survey" to predictive safety and lifecycle-oriented management of tunnels, including in the context of the digital transformation of the industry, is substantiated.

Keywords: tunnel monitoring, European school, early deformation warning, laser scanning, fiber-optic sensors, digital twin

For citation:
Egorychev P.A., Ignatev A.A. Modern approaches to monitoring deformations of transport tunnels: technologies, principles and development trends // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 3. P. 46-63. URL: https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-46-63

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения конструктивной и эксплуатационной безопасности перегонных тоннелей является одной из ключевых задач развития транспортной инфраструктуры. Старение значительной части тоннельного фонда нашей страны, усложнение геотехнических условий и рост интенсивности движения приводят к увеличению частоты повреждений [1, 2]. В отечественной практике мониторинг тоннелей исторически развивался как инструмент периодической фиксации фактического состояния в виде разовых геодезических измерений с визуальным обследованием в виде осмотров, что не всегда позволяет заблаговременно обнаружить зарождение деформационных процессов [1, 3].

Современный мониторинг уже не ограничивается отдельными геодезическими измерениями, а включает наземное лазерное сканирование (*TLS – Terrestrial Laser Scanning*), мобильное лазерное сканирование (*MLS – Mobile Laser Scanning*), распределенные волоконно-оптические системы, а также платформенные цифровые решения, ориентированные на непрерывное наблюдение за поведением тоннелей и окружающего массива. Аналогичная тенденция фиксируется и на мировом уровне: по мере истечения нормативного срока службы тоннельных сооружений вероятность возникновения структурных дефектов и отказов значительно возрастает, что определяет необходимость перехода от периодических осмотров к системному научно обоснованному мониторингу [4, 5].

При этом, обращаясь к опыту европейской школы, стоит отметить, что она демонстрирует переход к более технологичному уровню наблюдений: наземное и мобильное лазерное сканирование (*TLS/MLS*), распределенные волоконно-оптические датчики (*DFOS*), а также интеграция с цифровыми моделями инфраструктуры [4-9] обеспечивают возможность точной фиксации отклонений и деформаций. Опыт протяженных европейских тоннелей свидетельствует о том, что распределенные волоконно-оптические системы способны охватывать десятки километров обделки с миллиметровым пространственным разрешением [6, 7], тогда как мобильные сканирующие платформы обеспечивают получение сплошных *3D*-моделей поперечного сечения без остановки движения [5]. Все активнее обсуждается роль методов искусственного интеллекта и цифровых двойников как инструмента перехода к превентивному управлению состоянием тоннелей [4, 5].

В этой связи целью настоящего исследования является обзор подходов к мониторингу деформаций транспортных тоннелей, сопоставление основных технологических решений и выявление направлений перехода от дискретного контроля к непрерывному многоканальному наблюдению. Особое внимание уделяется сопоставлению работы европейской и китайской исследовательских школ, поскольку именно на их материале отчетливо проявляются как инженерно-прикладные, так и прорывные направления развития данной области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА

Эволюция мониторинга транспортных тоннелей

Первые транспортные тоннели XIX и начала XX века контролировались редкими геодезическими ходами по реперам, расположенным по контуру обделки, при этом диагностика сводилась к визуальной оценке трещин и протечек. Цель была достаточно прагматичной и заключалась в подтверждении того, что тоннель продолжает эффективно работать по истечении определенного количества лет после завершения строительства или какого-либо крупного происшествия [1, 4].

С ростом протяженности тоннелей и скоростей движения во второй половине XX столетия стали появляться станции мониторинга, конвергенционные цепочки (измерения сближения стен), встраиваемые тензодатчики. Мониторинг стал инструментом количественной проверки, где реальные деформации сверялись с проектными допусками [1, 4].

Качественный перелом произошел с внедрением наземного лазерного сканирования (*TLS*), позволившего получать полное облако точек поперечного сечения тоннеля за одну установку прибора. Впоследствии появились мобильные сканирующие системы *(MLS)*, устанавливаемые на платформах, спецпоездах, дорожной технике. Эти технологии устранили необходимость в многократной ручной разбивке, повысили производительность в десятки раз и обеспечили геометрическую модель всего ствола [10-12].

Параллельно развивалась система мониторинга технического состояния конструкций, когда в обделку и грунт стали закладывать датчики: инклинометры, струнные тензодатчики, а затем – распределенные волоконно-оптические кабели (DFOS). Последние обеспечивают непрерывный профиль деформации и температуры вдоль кабельного пути без необходимости дискретных точечных измерений [13].

Мониторинг транспортных тоннелей можно представить как последовательную смену парадигм: от точечных/ручных измерений (через пространственно-дискретные автоматизированные системы) – к непрерывным многомодальным платформам, интегрированным с цифровыми моделями и аналитическими инструментами принятия решений [3, 9, 11, 14]. На рис. 1 представлены фотографии перегонного тоннеля метрополитена и вид облака точек.

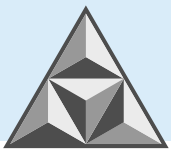
а(a) *б(b)*



Рис. 1. Перегонный тоннель метрополитена (*а*) и вид облака точек (*б*) [12]
Fig. 1. Running tunnel of a subway *(a)* and point cloud view *(b)* [12]

При более детальном рассмотрении эволюция мониторинга транспортных тоннелей связывается со сменой нескольких технологических поколений. На первом этапе контроль носил в основном эпизодический характер и опирался на ручные геодезические наблюдения, визуальные осмотры трещин и локальные конвергенционные измерения.

На втором этапе получили распространение автоматизированные тахеометрические наблюдения, стационарные деформационные датчики, инклинометрические и тензометрические комплексы, что обеспечило рост частоты измерений и переход к регулярному контролю.



Третье поколение связано с внедрением наземного и мобильного лазерного сканирования, распределенных волоконно-оптических систем и многоканальных комплексов мониторинга технического состояния, когда тоннель стал рассматриваться уже не как совокупность отдельных контрольных точек, а как пространственная деформационная система. Современный этап можно охарактеризовать переходом к цифровым платформам, объединяющим данные различных сенсоров, расчетные модели, *BIM*- и *GIS*-среду, а также средства автоматизированной интерпретации, что открывает возможность движения от фиксации состояния к прогностическому анализу его изменения.

Мобильные системы обычно представляют широкую, но дискретную картину, тогда как стационарные — картину непрерывную, но локальную. В совокупности обе парадигмы образуют взаимодополняющую архитектуру, где каждый тип сенсорной системы компенсирует ограничения другого [3, 9, 11, 14].

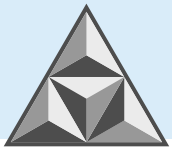
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ: МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА

На основе проведенного анализа изучены сравнительные характеристики основных методов мониторинга (табл. 1). Наблюдается принципиальное различие между дискретными (линейно-угловые измерения, нивелирование, наземное лазерное сканирование) и непрерывными методами исследования (волоконно-оптические системы, тензометры, инклинометры), а также между осуществляемыми стационарными и мобильными решениями.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов мониторинга тоннелей
Table 1. Comparative characteristics of tunnel monitoring methods

Метод	Принцип измерения	Точность, мм	Пространственное покрытие	Режим	Ключевые ограничения
Полигонометрия (автомат.)	Линейно-угловые измерения по маркам	0.5-2.0	Отдельные точки (десятки – сотни)	Дискретный	Прямая видимость; ограниченное число точек
Наземное лазерное сканирование (*TLS*)	Сканирование со штатива	1.0-10.0	Полный контур сечения (длина зависит от технол. окна)	Дискретный	Остановка движения; трудоемкая обработка
Мобильное лазерное сканирование (*MLS*)	Сканирование с движущейся платформы	5.0-15.0	Вся длина тоннеля за один проход	Дискретный, высокая производитель-ность	Точность ниже *TLS*; зависимость от навигации
Волоконно-оптические датчики (*DFOS*)	Преломление света в оптоволокне	2.0-20.0	Непрерывно вдоль волокна (десятки – сотни метров)	Непрерывный	Сложный монтаж; чувствительность к температуре
Контактные датчики (тензометры, инклинометры)	Электрическое / вибрационно-струнное преобразование	1.0-10.0	Локальные места (точки)	Непрерывный	Локальность; кабельная инфраструктура подключения

Мобильные комплексы особенно востребованы на протяженных перегонах панелей, где за один проход они формируют полную геометрическую модель, служащую для определения фактических отклонений контролируемых параметров от проектных и нормативных значений и оценки изменения состояния конструкции [13].



Современные системы мониторинга в настоящее время решают широкий круг задач:

– контроль соответствия параметров проектным и нормативным значениям;

– формирование хронологии деформационного поведения тоннеля;

– информирование о превышении пороговых показателей в тоннеле;

– выявление скрытых трендов и ранних признаков неблагоприятного развития процесса;

– интеграция данных сенсоров в единую цифровую среду;

– обновление цифровой модели сооружения;

– обоснование продления срока службы и назначение очередности ремонтных мероприятий [8, 14-16].

Таблица 2. Методы интеграции и анализа данных мониторинга
Table 2. Methods of integration and analysis of monitoring data

Метод интеграции / анализа	Принцип работы	Аналитические возможности	Ключевые ограничения
Мультисенсорные платформы мониторинга	Интеграция геодезических, лазерно-сканирующих, волоконно-оптических и эксплуатационных данных в единый контур	Высокие	Сложность интеграции и требования к инфраструктуре данных
Цифровой двойник тоннеля	Связь мониторинга с геометрической и расчетной моделью сооружения, сценарный анализ	Очень высокие	Ресурсоемкость и необходимость постоянного обновления
Методы интеллектуальной обработки данных мониторинга	Выявление скрытых закономерностей, прогноз и раннее предупреждение на основе временных рядов	Очень высокие	Чувствительность к качеству обучающей выборки и ограниченная нормативная формализация

В табл. 2 представлены методы анализа и принципы работы с данными мониторинга, включая текущие ограничения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принципы европейской школы мониторинга

Европейская школа мониторинга тоннелей использует несколько принципов работы, представленных в табл. 3, где выделяются ключевые принципы, а также примеры их практической реализации и нормативные источники. Комплексность и многоканальность наблюдений предполагают совместное применение нескольких методов – как правило, *TLS/MLS*, *DFOS* и расчетных моделей [3, 4, 8, 15].

При этом непрерывность и системность означает, что мониторинг является неотъемлемой частью жизненного цикла тоннеля. Крупнейшие европейские тоннели *Готард, Лечберг, Бренер* были оснащены стационарными системами еще на стадии строительства и работают в круглосуточном автоматическом режиме [8, 9]. Причинно-следственная логика предполагает, что каждое измерение должно быть объяснено через физическую модель конструкции [11, 17].

Таблица 3. Принципы европейской школы мониторинга тоннелей [4, 8, 18]
Table 3. Principles of the European school of tunnel monitoring [4, 8, 18]

Принцип	Содержание	Примеры реализации / Источник
Непрерывность и системность	Мониторинг – неотъемлемая часть тоннеля; ведется с момента строительства до вывода его из эксплуатации	*Готард, Лечберг, Brenner* [8, 9]
Многоканальность	Параллельное использование *TLS/MLS*, *DFOS*, *InSAR*, *FEM* и *SHM* для компенсации ограничений каждого метода	*DZSF* [9], *ASTRA 84012* [15]
Интеграция с расчетными моделями	Данные мониторинга верифицируются через МКЭ-модели; отклонения объясняются физически	*SCADA*, *CRM*, *BIM* [11, 17]
Нормативное закрепление	Мониторинг регламентирован на уровне отраслевых стандартов и технических требований	*ASTRA 84012* [15], *ITA*
Риск-ориентированность	Пороговые значения увязаны с уровнями риска для пользователей и инфраструктуры	*Buchmayer & Bergmeister* [8]

Наиболее последовательно эта логика реализована в альпийской практике мониторинга, сформировавшейся на крупных тоннельных объектах Швейцарии, Австрии и Германии. Для данной школы характерно сочетание автоматизированных тахеометров, конвергенционных систем, инклинометров, пьезометров, распределенных волоконно-оптических линий и данных лазерного сканирования в составе единого измерительного контура. Важной особенностью является и то, что мониторинг рассматривается не как автономная измерительная подсистема, а как часть общего цикла управления тоннельным объектом, которая находится в корреляции с расчетной моделью, эксплуатационными регламентами и инженерной интерпретацией поведения конструкции [8, 9].

Для протяженных тоннелей именно такая многоканальная схема особенно важна, поскольку локально точные, но пространственно разрозненные измерения уже не обеспечивают всей полноты картины. В этой связи в европейской практике большое значение приобретают методы, позволяющие получать сплошную или квазисплошную информацию о геометрии сооружения и распределении деформаций вдоль обделки (прежде всего, наземное и мобильное лазерное сканирование, а также распределенные волоконно-оптические системы) [14].

Практика требует, чтобы результаты были понятны эксплуатирующему персоналу [14]. Накопление данных и формализация опыта превращает результаты, полученные в рамках реализации каждой программы мониторинга, в источник новых знаний.

Эти знания систематизируются в отраслевых документах, например, в стандарте *ASTRA 84012* и рекомендациях Международной тоннельной ассоциации (*ITA*) [15]. Однако даже в рамках этих принципов мониторинг остается, в первую очередь, инструментом высококачественной фиксации деформаций, а не формализованным механизмом раннего предупреждения.

Современные системы мониторинга и их возможности

По мере развития цифровых платформ все более важным становится не только наличие отдельных датчиков, но и архитектура системы в целом. Современный комплекс мониторинга тоннеля, как правило, включает первичные сенсоры, каналы передачи данных, регистрирующие вычислительные модули и среду хранения, аналитический блок и интерфейс поддержки эксплуатационных решений. В базовом варианте такая система функционирует как средство фиксации и отображения измерений, однако в более зрелых вариантах она дополняется *BIM*-моделью, цифровым двойником, сценариями оповещений, а также алгоритмами автоматизированной диагностики и раннего выделения аномальных состояний [3, 8, 10, 18].

В этой связи весьма показательным является движение от разрозненных подсистем к платформенному подходу, при котором мобильные и стационарные средства мониторинга работают не параллельно, а в едином информационном контуре. Стационарные датчики обеспечивают непрерывное наблюдение за локальными зонами, а мобильные сканирующие комплексы представляют периодически обновляемую пространственную картину по всей длине тоннеля. Совместное использование этих подсистем позволяет одновременно отслеживать как локальные изменения, так и общий деформационный рисунок сооружений [3, 11, 19].

На рис. 2 показано, как выглядит архитектура современной комплексной системы мониторинга железнодорожного тоннеля – от размещения *FBG*-датчиков деформации и видеодальномеров по поперечному сечению до сбора, передачи и обработки данных на облачном сервере с формированием предупреждений.

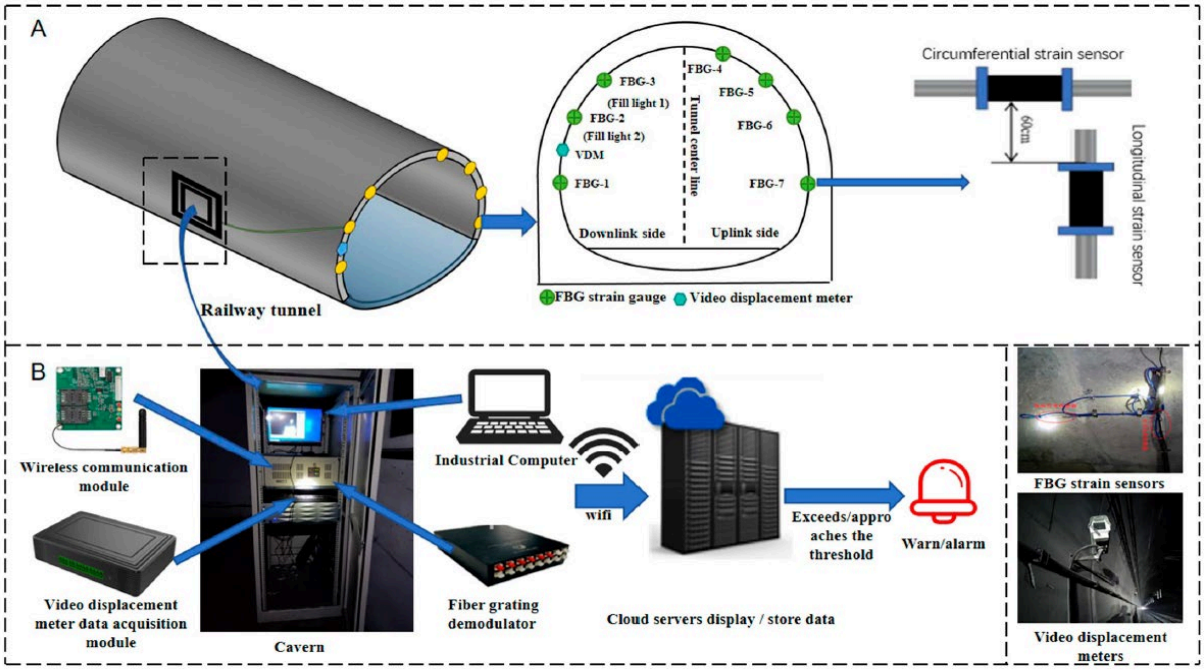


Рис. 2. Архитектура комплексной системы мониторинга тоннеля: размещение *FBG*-датчиков деформации и видеодальномеров (*VDM*) по сечению и система сбора, передачи и обработки данных (от сенсорного уровня до облачного сервера и системы предупреждений) [20]

Fig. 2. Architecture of an integrated tunnel monitoring system: layout of *FBG* strain sensors and video displacement meters (*VDM*) across the cross-section and the data acquisition, transmission and processing chain (from sensor level to cloud server and warning system) [20]

Системы рассматривают тоннельную обделку не как набор отдельных точек, а как протяженный объект с контролем по множеству сечений.

На рис. 3 представлена схема размещения *FBG*-датчиков деформации и температуры по сечениям тоннеля и пример их полевой установки на поверхности вторичной обделки.

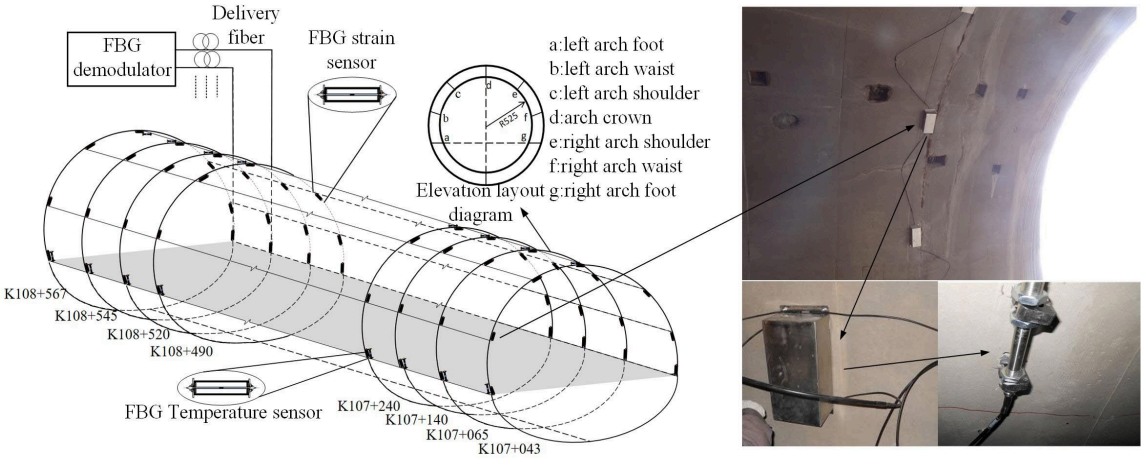


Рис. 3. Схема размещения *FBG*-датчиков деформации и температуры по сечениям тоннеля и пример их полевой установки на поверхности вторичной обделки [20]
Fig. 3. Layout of FBG strain and temperature sensors across tunnel cross-sections and an example of their field installation on the surface of the secondary lining [20]

Передовые тоннели Европы оснащаются комплексами, по объему данных сопоставимыми с системами в авиации. Это автоматизированные тахеометры, лазерные сканеры, контактные датчики, распределенная оптика, вибросенсоры. Стационарные компоненты фиксируют поведение конструкции, а мобильные компоненты обеспечивают регулярный «скрининг» (см. рис. 4) по всей длине тоннеля [3, 5, 7].

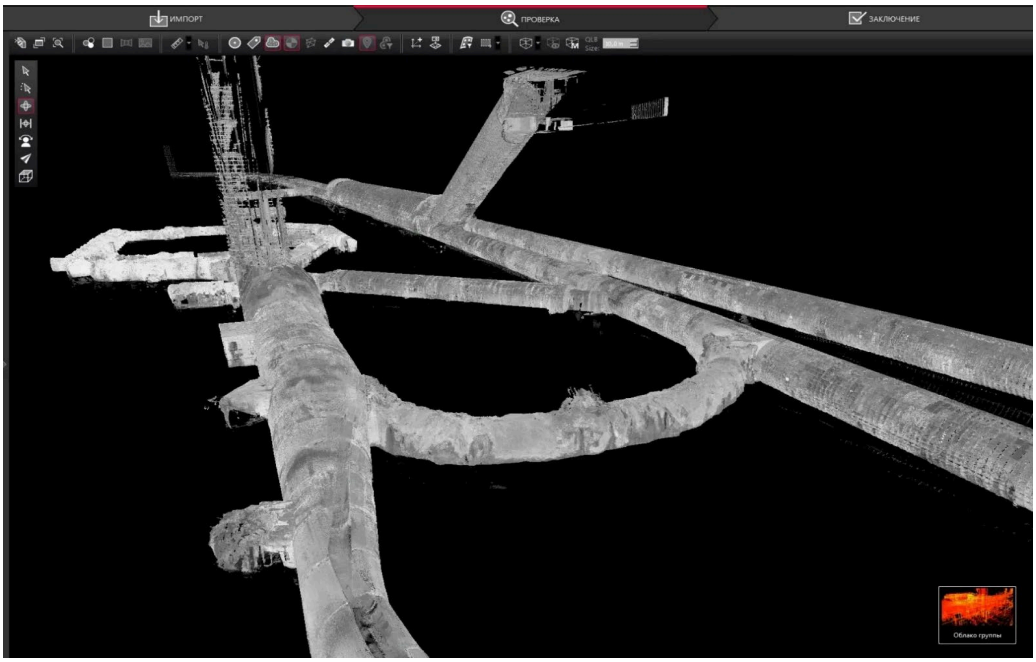


Рис. 4. *3D*-модель узла разветвления тоннелей по данным лазерного сканирования (вид сверху) [23]
Fig. 4. *3D* model of a tunnel junction node based on laser scanning data (top view) [23]

Сбор данных осуществляется регистрирующими модулями по проводным или беспроводным каналам связи на облачные платформы мониторинга технического состояния сооружений [3, 8]. На платформах данные накапливаются, автоматически обрабатываются, отображаются на *BIM*-модели тоннеля (и прилегающей застройки) и используются для интеллектуальной диагностики и прогноза его состояния.

На рис. 4 приведен характерный пример – *3D*-модель узла разветвления тоннелей по данным лазерного сканирования.

Тенденции развития и риски при реализации направления

Анализ проведенных ранее исследований выявил устойчивые тенденции [9, 11, 21]:

– стремление к режиму реального времени – от недель к часам и минутам между измерениями;

– интеграция результатов мониторинга в цифровые двойники, где деформации связываются с геометрией, материалами, нагрузками;

– применение машинного обучения и сценарного моделирования для интерпретации данных [22];

– поворот к подходу, увязывающему мониторинг с оценкой риска для пользователей и экономики [8, 15].

Вместе с тем обнаружены и существенные ограничения. «Раннее предупреждение» остается неформализованным, когда сигнал подается при превышении порога, но неясно, с каким интервалом до наступления опасного состояния он должен формироваться и какое минимальное «время на реакцию» нужно обеспечивать. Пороговые значения задаются статично и не адаптируются к индивидуальному поведению тоннеля. В результате связь между мониторингом и эксплуатационными решениями строится преимущественно на опыте конкретных специалистов, а не на формализованной системе сценариев реагирования [23]. На рис. 5 показан пример облака точек тоннеля большого сечения с монолитной обделкой, полученного по данным лазерного сканирования.

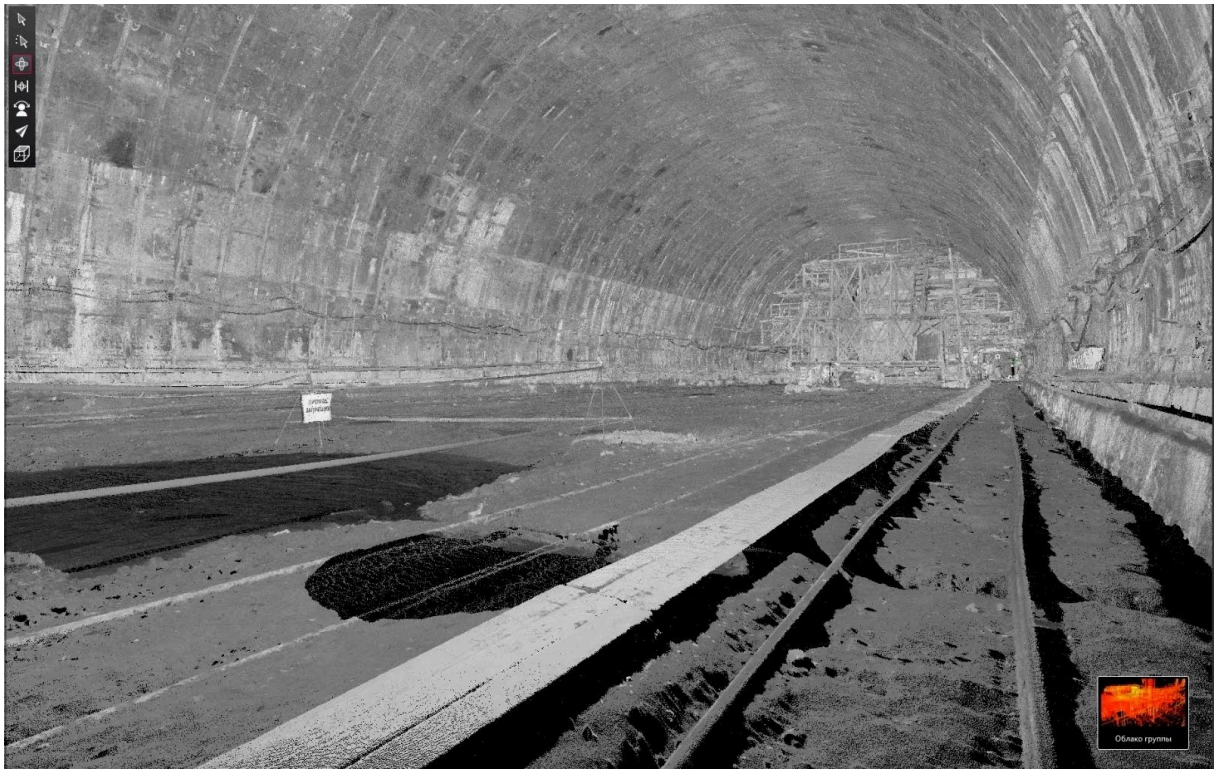


Рис. 5. Облако точек тоннеля большого сечения с монолитной обделкой (по данным лазерного сканирования) [12]
Fig. 5. Point cloud of a large-section tunnel with monolithic lining (based on laser scanning data) [12]

В отсутствие формализованных методов раннего предупреждения мониторинг нередко фиксирует уже развившиеся дефекты обделки (рис. 6), а не предшествующие им деформации.



Рис. 6. Фрагмент обделки транспортного тоннеля с развившимися трещинами и локальным разрушением бетона после длительной эксплуатации [24]
Fig. 6. Section of a transport tunnel lining with developed cracks and local concrete spalling after long-term operation [24]

Необходима методологическая база, позволяющая интерпретировать данные мониторинга в терминах технического риска и остаточного ресурса конструкции [3, 11, 19].

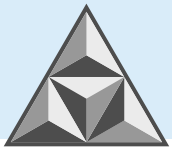
Китайская школа и их инновационные подходы

Наряду с европейской школой, в последние годы быстро развивается и китайское направление исследований, для которого характерно смещение акцента от преимущественно измерительной функции мониторинга к обработке больших массивов данных и прогностической аналитике. Если европейская школа исторически формировалась как система высокоточного инженерного контроля и интеграции с расчетами, то в китайских работах более заметную роль играют мультисенсорные платформы, цифровые двойники тоннелей и методы интеллектуальной обработки временных рядов деформаций [22].

В этой группе работ особое место занимают модели глубокого обучения, ориентированные на анализ деформационных рядов: *LSTM (Long Short-Term Memory* – сети долгой краткосрочной памяти), *Bi-LSTM-AM (Bidirectional Long Short-Term Memory with Attention Mechanism* – двунаправленные сети долгой краткосрочной памяти с механизмом внимания), GRU (*Gated Recurrent Unit* – рекуррентные сети с управляющими затворами) и *TCN* (*Temporal Convolutional Network* – временные сверточные сети). Модели используются для выявления нелинейных закономерностей в рядах конвергенции и иных контролируемых параметров, а также прогноза их дальнейшего развития [25-28].

Характерно, что в ряде современных исследований такие решения рассматриваются уже не как вспомогательный аналитический инструмент, а как ключевой компонент системы раннего предупреждения – *data-driven* ядро, принимающее решение об уровне тревоги на основании не пороговых значений, а прогнозируемого тренда. Это знаменует концептуальный сдвиг в инженерной практике мониторинга [25-28].

При всей технологической привлекательности указанного направления необходимо учитывать и его ограничения. Алгоритмы машинного обучения предъявляют высокие требования к полноте и качеству исторических данных, чувствительны к составу обучающей выборки и пока недостаточно стандартизированы в нормативной базе. Тем не менее именно



это направление представляет собой одно из наиболее заметных отличий современной китайской школы мониторинга и задает переход к новому этапу цифрового наблюдения за техническим состоянием тоннелей.

Российский опыт мониторинга состояния тоннелей

Российский тоннельный фонд включает как новые сооружения, так и тоннели, характеризуемые расчетным сроком службы [1, 2]. Для ряда линий метро и железнодорожных тоннелей вопрос продления ресурса и безопасной эксплуатации на горизонте 10-20 лет становится не абстрактной задачей, а фактором реальной угрозы возникновения недопустимых рисков для пассажиров и инфраструктуры. Классические методики мониторинга, ориентированные на эпизодическую фиксацию и реактивные ремонты, уже не обеспечивают требуемого качества управления рисками [8, 9].

На уровне государственной политики эту повестку усиливает Распоряжение Правительства РФ № 3883-р, в котором напрямую берется курс на внедрение информационного моделирования, работу с большими массивами данных, пространственный анализ и цифровые системы поддержки решений. На этом фоне появляются проекты крупных цифровых платформ мониторинга транспортной инфраструктуры, которые становятся полигонами для отработки новых подходов [10, 17, 29, 30].

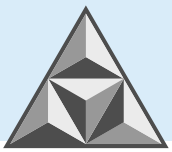
При этом мониторинг перестает быть вспомогательной функцией и является значимым инструментом управления жизненным циклом тоннеля, охватывая этапы от проектирования и строительства до контролируемого вывода из эксплуатации. Переход от разрозненных визуальных осмотров к непрерывной работе цифрового двойника означает смену логики управления, когда инфраструктура уже не просто фиксирует факт старения постфактум, а позволяет прогнозировать траекторию деформаций, заблаговременно выявлять зоны повышенного риска и планировать предупредительные мероприятия до вхождения в критическое состояние.

ВЫВОДЫ

Обзор исследований показывает, что мониторинг транспортных тоннелей находится на пороге качественного перехода. Европейская школа создала мощный технологический фундамент, где системы, сочетающие стационарные комплексы оценки состояния, мобильные сканирующие платформы и распределенную волоконно-оптическую инфраструктуру, способны с высокой точностью и в режиме, близком к реальному времени, фиксировать деформации конструкций. На этом фоне российские проекты цифровых платформ мониторинга транспортной инфраструктуры находятся пока на стадии формирования.

Формализация задач раннего обнаружения аномалий и их увязка с эксплуатационными решениями остаются нереализованным направлением развития мониторинга тоннелей. Действующие системы ограничиваются сигналами о превышении заданных статичных порогов и не адаптируют критерии к индивидуальному деформационному поведению конкретного тоннеля, не задают горизонт заблаговременного предупреждения относительно опасных состояний и не опираются на формализованные сценарии реагирования.

Для российского тоннельного фонда, значительная часть которого приближается к расчетному сроку службы, такой разрыв особенно критичен, так как возможности длительных остановок на ремонт объективно ограничены. В этих условиях возникает запрос на переход от



реактивного управления безопасностью к предиктивному, где мониторинг рассматривается как инструмент риск-ориентированного управления жизненным циклом тоннеля, а не как вспомогательная сервисная функция. Разработка методов прогнозирования и обнаружения критических состояний на основе первичных деформационных импульсов и их интерпретации в эксплуатационном аспекте представляется необходимым условием для преодоления указанного разрыва и внедрения воспроизводимых процедур управления рисками на уровне сети тоннелей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

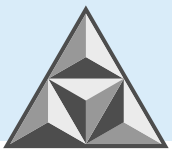
1. **Волохов Е.М., Новоженин С.Ю., Бак Нгуен Суан.** Современные системы контроля сдвижений и деформаций при строительстве подземных сооружений // *Записки Горного института*. 2012. Т. 199. С. 253-259. URL: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5854 (дата обращения: 06.05.2026).
2. **Лебедев М.О., Безродный К.П., Шляев С.А.** Долгосрочный геотехнический мониторинг в тоннелях как инструмент прогнозирования // *Underground Expert*. 2023. URL: https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/dolgosrochnyj-geotehnicheskim-monitoring (дата обращения: 06.05.2026).
3. **Емельянов М.В.** Особенности разработки перспективных систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений // *Строительная наука и образование*. 2024. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrabotki-perspektivnyh-sistem-monitoringa-nesuschih-konstruktsiy-zdaniy-i-sooruzheniy (дата обращения: 06.05.2026).
4. **Jiang Y. Zhutian Pan, Xuepeng Zhang.** Tunnel infrastructure health management: A state-of-the-art review on defect development mechanism and robot-aided inspection system // *Smart Underground Engineering*. 2025. Vol. 1. Iss. 1. P. 26-39. DOI: 10.1016/j.sue.2025.05.003.
5. **Apoji D., Soga K., Sheil B.B.** Shaping the future of tunneling with data and emerging technologies // *Data-Centric Engineering*. 2023. Vol. 4. P. e29. DOI: 10.1017/dce.2023.24.
6. **Zhang X., Zhu H., Jiang X., Broere W.** Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 16. No. 9. P. 3841-3863. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.01.008.
7. **Monsberger C.M., Bauer P., Buchmayer F., Lienhart W.** Large-scale distributed fiber optic sensing network for short and long-term integrity monitoring of tunnel linings // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2022. Vol. 12. No. 6. P. 1317–1327. DOI: 10.1007/s13349-022-00560-w.
8. **Buchmayer F., Bergmeister K.** Überwachung und Monitoring als lebenszyklus-begleitende Instrumente bei Infrastrukturtunneln // *Beton- und Stahlbetonbau*. 2021. Bd. 116. H. S2. S. 58-67. DOI: 10.1002/best.202100055.
9. **Cheng G., Wang Z., Li G., Shi B., Wu J., Cao D., Nie Y.** Advanced research and engineering application of tunnel structural health monitoring leveraging spatiotemporally continuous fiber optic sensing information // *Photonics*. 2025. Vol. 12 (9). P. 855. DOI: 10.3390/photonics12090855.
10. **Пастушков В.Г., Вайтович А.Н., Костюкович О.В., Янковский Л.В.** Практика применения автоматизированной системы мониторинга технического состояния транспортных объектов // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2021. № 4. С. 77-90. DOI: 10.15593/24111678/2021.04.09.
11. **Chen W., Tan X.-Y., Yang J.** Review of state-of-the-art in structural health monitoring of tunnel engineering // *Smart Underground Engineering*. 2025. No. 1 (1). P. 40-50. DOI: 10.1016/j.sue.2025.05.004.
12. **Liu Y., Li J.** Full-section deformation monitoring of high altitude fault tunnels using 3D laser scanner // *Advances in Civil Engineering*. 2022. Art. 4967037. DOI: 10.1155/2022/4967037.
13. DZSF. Forschungsbericht 64/2024: Sensorbasierte Technologien im Bahnsystem: Markt- und Technologieanalyse. Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung, 2024. URL: https://www.dzsf.bund.de (дата обращения: 06.05.2026).
14. **Колотовичев Ю.А., Шахраманьян А.М.** Автоматизированный мониторинг деформации несущих конструкций «Екатеринбург Арены» // *Вестник МГСУ*. 2022. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330.
15. ASTRA 84012. Überwachung des baulichen Zustands von Kunstbauten – Tunnel. Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern, 2023–2025. URL: https://www.astra.admin.ch (дата обращения: 06.05.2026).

16. **Huang H., Zhang D., Wang C., Tang A.** A review of defects in urban metro tunnels // *Underground Space*. 2021. No. 6 (3). P. 243-264. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.01.004.
17. **Перминов Н.А.** Моделирование и мониторинг конструктивной безопасности уникальных подземных объектов крупного города в сложных грунтовых условиях // *Construction and Geotechnics*. 2021. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03.
18. **Sun Z., Jayasinghe S., Sidiq A., Shahrivar F., Mahmoodian M.** Approach towards the development of digital twin for structural health monitoring of civil infrastructure: A comprehensive review // *Sensors*. 2024. Vol. 25. No. 1. P. 59. DOI: 10.3390/s25010059.
19. **Afrazi M., Armaghani D.J., Afrazi H., Fattahi H., Samui P.** Real-time monitoring of tunnel structures using digital twin and artificial intelligence: A short overview // *Deep Underground Science and Engineering*. 2025. Vol. 5 (2). P. 315-330. DOI: 10.1002/dug2.70029.
20. **Li J., Liu C., Zhang Y., Gu X.** Structural health monitoring of subway tunnel based on fiber Bragg grating sensors and video displacement meters // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2024. Vol. 38. No. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7644.
21. **Machado L.B., Santos R., Vega Ruiz D., Bittencourt T.** Advancements of digital twin technology for bridges and tunnels: A systematic literature review // *Journal of Infrastructure Systems*. 2025. No. 31 (4). DOI: 10.1061/JITSE4.ISENG-2745.
22. **Sheil B.B., Suryasentana S.K., Mooney M.A., Zhu H.** Machine learning to inform tunneling operations: recent advances and future trends // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2022. No. 175 (5). P. 412-428. DOI: 10.1680/jgeen.20.00011.
23. **Que H., Gao H., Shan W., Yang X., Zhao R.** Deformation measurement of tunnel cross-section by mobile laser scanning system // *Sensors*. 2024. Vol. 24. No 22. P. 7297. DOI: 10.3390/s24227297.
24. **Kuang G., Li B., Mo S., Hu X., Li L.** Review on machine learning-based defect detection on shield tunnel lining // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2022. Vol. 66. No. 3. P. 943-957. DOI: 10.3311/PPci.19859.
25. **Ma L., Lin F., Du Y., Ren S., Long N.** Tunnel surrounding rock deformation prediction via WOA-LSTM model // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 29170. DOI: 10.1038/s41598-024-79059-x.
26. **Zhang X., Minghao W., Feng Dan, Jingchun W.** Risk classification and early warning of large deformation of soft rock in tunnels based on CNN-LSTM model // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14 (1). Art. 29944. DOI: 10.1038/s41598-024-81816-x.
27. **Zhou S., Peng H., Zheng H., He X.** A deep learning method fusing multiscale temporal features for metro tunnel deformation advanced prediction // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2026. Vol. 40. No. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7244.
28. **Yang Z., Cheng Z., Wu D.** Deep learning driven prediction and comparative study of surrounding rock deformation in high speed railway tunnels // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 24104. DOI: 10.1038/s41598-025-09791-5.
29. **Кочетков А.В., Семенова Н.С., Иванов А.Ф., Чижиков И.А.** Применение беспилотных летательных аппаратов для исследования объектов транспортной инфраструктуры // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3. Вып. 4. С. 28-38. DOI 10.52957/27821919_2022_4_28.
30. **Богуславский Л.А., Проваторова Г.В.** Применение искусственного интеллекта в проектировании автомобильных дорог // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6. Вып. 4. С. 67-79. DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79.

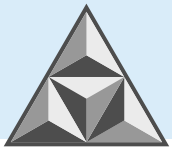
Поступила в редакцию05.06.2026
Одобрена после рецензирования 03.07.2026
Принята к опубликованию 25.08.2026

REFERENCES

1. **Volokhov, E.M., Novozhenin, S.Iu. and Bac, Nguen Suan** (2012), Modern displacement and deformation control systems in underground construction, *Journal of Mining Institute*, vol. 199, pp. 253-259. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5854 (accessed 06.05.2026) (in Russian).



2. **Lebedev, M.O., Bezrodnii, K.P. and Shliaev, S.A.** (2023), Long-term geotechnical monitoring in tunnels as a forecasting tool, *Underground Expert*. Available at: https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/dolgosrochnyj-geotehnicheskim-monitoring (accessed 06.05.2026) (in Russian).
3. **Emelianov, M.V.** (2024), Features of developing advanced monitoring systems for load-bearing structures of buildings and structures, *Construction Science and Education*. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrabotki-perspektivnyh-sistem-monitoringa-nesuschih-konstruktsiy-zdaniy-i-sooruzheniy (accessed 06.05.2026) (in Russian).
4. **Jiang, Y., Zhutian, Pan and Xuepeng, Zhang** (2025), Tunnel infrastructure health management: A state-of-the-art review on defect development mechanism and robot-aided inspection system, *Smart Underground Engineering*, vol. 1, iss. 1, pp. 26-39. DOI: 10.1016/j.sue.2025.05.003.
5. **Apoji, D., Soga, K. and Sheil, B.B.** (2023), Shaping the future of tunneling with data and emerging technologies, *Data-Centric Engineering*, vol. 4, p. e29. DOI: 10.1017/dce.2023.24.
6. **Zhang, X., Zhu, H., Jiang, X. and Broere, W.** (2024), Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 16, no. 9, pp. 3841-3863. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.01.008.
7. **Monsberger, C.M., Bauer, P., Buchmayer, F. and Lienhart, W.** (2022), Large-scale distributed fiber optic sensing network for short and long-term integrity monitoring of tunnel linings, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 12, no. 6, pp. 1317-1327. DOI: 10.1007/s13349-022-00560-w.
8. **Buchmayer, F. and Bergmeister, K.** (2021), Überwachung und Monitoring als lebenszyklus-begleitende Instrumente bei Infrastrukturtunneln, *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 116 (S2), pp. 58-67. DOI: 10.1002/best.202100055.
9. **Cheng, G., Wang, Z., Li, G., Shi, B., Wu, J., Cao, D. and Nie, Y.** (2025), Advanced research and engineering application of tunnel structural health monitoring leveraging spatiotemporally continuous fiber optic sensing information, *Photonics*, vol. 12 (9), p. 855. DOI: 10.3390/photonics12090855.
10. **Pastushkov, V.G., Vaitovich, A.N., Kostiukovich, O.V. and Iankovskii, L.V.** (2021), Application practice of automated structural monitoring system for transport facilitie, *Transport. Transport Structures. Ecology*, no. 4, pp. 77-90 (in Russian). DOI: 10.15593/24111678/2021.04.09.
11. **Chen, W., Tan, X.-Y. and Yang, J.** (2025), Review of state-of-the-art in structural health monitoring of tunnel engineering, *Smart Underground Engineering*, no.1 (1), pp. 40-50. DOI: 10.1016/j.sue.2025.05.004.
12. **Liu, Y. and Li, J.** (2022), Full-section deformation monitoring of high altitude fault tunnels using 3D laser scanner, *Advances in Civil Engineering*, Art. 4967037. DOI: 10.1155/2022/4967037.
13. DZSF. (2024) Forschungsbericht 64/2024: Sensorbasierte Technologien im Bahnsystem: Markt- und Technologieanalyse. Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung. Available at: https://www.dzsf.bund.de (accessed 06.05.2026).
14. **Kolotovichev, Iu.A. and Shakhramanian, A.M.** (2022), Automated deformation monitoring of load-bearing structures of the Ekaterinburg Arena, *Vestnik MGSU* (in Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330.
15. ASTRA 84012. (2023–2025) Überwachung des baulichen Zustands von Kunstbauten — Tunnel. Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern. Available at: https://www.astra.admin.ch (accessed 06.05.2026).
16. **Huang, H., Zhang, D., Wang, C. and Tang, A.** (2021), A review of defects in urban metro tunnels, *Underground Space*, no. 6 (3), pp. 243-264. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.01.004.
17. **Perminov, N.A.** (2021), Modeling and monitoring of structural safety of unique underground facilities of large city drainage systems in complex soil conditions, *Construction and Geotechnics*. (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03
18. **Sun, Z., Jayasinghe, S., Sidiq, A., Shahrivar, F. and Mahmoodian, M.** (2024), Approach towards the development of digital twin for structural health monitoring of civil infrastructure: A comprehensive review, *Sensors*, vol. 25, no. 1, p. 59. DOI: 10.3390/s25010059.
19. **Afrazi, M., Armaghani, D.J., Afrazi, H., Fattahi, H. and Samui, P.** (2025), Real-time monitoring of tunnel structures using digital twin and artificial intelligence: A short overview, *Deep Underground Science and Engineering*, vol. 5 (2), pp. 315-330. DOI: 10.1002/dug2.70029.



20. **Li, J., Liu, C., Zhang, Y. and Gu, X.** (2024), Structural health monitoring of subway tunnel based on fiber Bragg grating sensors and video displacement meters, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 38, no. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7644.
21. **Machado, L.B., Santos, R., Vega Ruiz, D. and Bittencourt, T.** (2025), Advancements of digital twin technology for bridges and tunnels: A systematic literature review, *Journal of Infrastructure Systems*, no. 31 (4). DOI: 10.1061/JITSE4.ISENG-2745.
22. **Sheil, B.B., Suryasentana, S.K., Mooney, M.A. and Zhu, H.** (2022), Machine learning to inform tunnelling operations: recent advances and future trends, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, no. 175 (5), pp. 412-428. DOI: 10.1680/jgeen.20.00011.
23. **Que, H., Gao, H., Shan, W., Yang, X. and Zhao, R.** (2024), Deformation measurement of tunnel cross-section by mobile laser scanning system, *Sensor*s, vol. 24, no. 22, p. 7297. DOI: 10.3390/s24227297.
24. **Kuang, G., Li, B., Mo, S., Hu, X. and Li, L.** (2022), Review on machine learning-based defect detection on shield tunnel lining, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 66, no. 3, pp. 943-957. DOI: 10.3311/PPci.19859.
25. **Ma, L., Lin, F., Du, Y., Ren, S. and Long, N.** (2024), Tunnel surrounding rock deformation prediction via WOA-LSTM model, *Scientific Reports*, vol. 14, Art. 29170. DOI: 10.1038/s41598-024-79059-x.
26. **Zhang, X., Minghao, W., Feng, Dan and Jingchun, W.** (2024), Risk classification and early warning of large deformation of soft rock in tunnels based on CNN-LSTM model, *Scientific Reports*, vol. 14 (1), Art. 29944. DOI: 10.1038/s41598-024-81816-x.
27. **Zhou, S., Peng, H., Zheng, H. and He, X.** (2026), A deep learning method fusing multiscale temporal features for metro tunnel deformation advanced prediction, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 40, no. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7244.
28. **Yang, Z., Cheng, Z. and Wu, D.** (2025), Deep learning driven prediction and comparative study of surrounding rock deformation in high speed railway tunnels, *Scientific Reports*, 15, Art. 24104. DOI: 10.1038/s41598-025-09791-5.
29. **Kochetkov, A.V., Semenova, N.S., Ivanov, A.F. and Chizhikov, I.A.** (2022), Unmanned Aerial Vehicles Use for the Inspection of Transport Infrastructure Facilities, *Smart Composite in Construction*, vol. 3, iss. 4, pp. 28-38. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022 (in Russian). DOI: 10.52957/27821919_2022_4_28.
30. **Boguslavskii, L.A. and Provatorova, G.V.** (2025), The use of artificial intelligence within the design of automobile roads, *Smart Composite in Construction*, vol. 6, iss. 4, pp. 67-79 (in Russian). DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79.

Received 05.06.2026
Approved 03.07.2026
Accepted 25.08.2026