

Обзорная статья  
УДК 004.8:624.1  
doi: 10.46684/2687-1033.2025.2.203-211  
EDN SCUPMB

## Проблематика искусственного интеллекта на Всемирном тоннельном конгрессе 2024 года: обзор

**Д.С. Конюхов**

Мосинжпроект; г. Москва, Россия; gidrotehnik@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8635-232X>

### АННОТАЦИЯ

На 50-м Всемирном тоннельном конгрессе нашел отражение современный уровень исследований в области подземного строительства, в том числе в сфере искусственного интеллекта на основе цифровизации.

В основу обзора положены опубликованные материалы конгресса. Тематика искусственного интеллекта отражена в отдельном разделе.

Представленную на конгрессе совокупность докладов можно подразделить на следующие несколько направлений: работа тоннелепроходческих машин; изучение деформаций грунтов и сооружений, мониторинг; обучающие методы; цифровые методы проектирования, строительства и управления эксплуатацией.

Предложена интеллектуальная система поддержки принятия решений по обслуживанию конструктивных дефектов тоннелей с использованием графа знаний и глубокого обучения, представлено экспериментальное исследование применения гиперспектральных изображений для оценки прочности бетона на сжатие. Описано прогнозирование качества окружающих пород на основе неполного набора данных из нескольких источников и применения деревьев простейшей байесовской сети. Рассмотрены проектирование, выбор модели и количественная оценка неопределенности при кондиционировании грунта для механизированной щитовой проходки с применением машинного обучения. Предложен энергоэффективный алгоритм управления вентиляцией тоннеля, сочетающий использование динамической нейронной сети и нечеткого управления. Особое внимание уделено оценке производительности тоннелепроходческих машин и выявлению дефектов эксплуатируемых подземных объектов. В целом сфера представленных исследований в области искусственного интеллекта (машинного обучения) применительно к освоению подземного пространства сравнительно узкая и оставляет много аспектов неохваченными.

**Ключевые слова:** дефекты эксплуатируемых тоннелей; искусственный интеллект; компьютерное обучение; подземное пространство; тоннелепроходческая машина; транспортные тоннели; характеристики грунтов; эффективность строительства тоннелей

**Для цитирования:** Конюхов Д.С. Проблематика искусственного интеллекта на Всемирном тоннельном конгрессе 2024 года: обзор // Техник транспорта: образование и практика. 2025. Т. 6. Вып. 2. С. 203–211. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2025.2.203-211>. EDN SCUPMB.

Review article

### Problematics of Artificial Intelligence at the World Tunnelling Congress 2024: Review

**Dmitrij S. Konyuhov**

Mosinzhprouekt; Moscow, Russian Federation; gidrotehnik@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8635-232X>

### ABSTRACT

The 50th World Tunnelling Congress reflects the state of the art in underground construction research, including artificial intelligence based on digitalisation.

The review is based on the published proceedings of the Congress. The subject of artificial intelligence is reflected in a separate section.

The set of reports presented at the Congress can be divided into the following several areas: operation of tunnel boring machines; study of ground and structure deformations, monitoring; training methods; digital methods of design, construction and operation management

© Д.С. Конюхов, 2025

An intelligent decision support system for the maintenance of structural defects in tunnels using knowledge graph and deep learning is proposed, and an experimental study of the application of hyperspectral images to assess the compressive strength of concrete is presented. Prediction of surrounding rock quality based on an incomplete data set from multiple sources and the application of simple Bayesian network trees is described. The design, model selection and uncertainty quantification of soil conditioning for mechanised tunnel sinking using machine learning are discussed. An energy-efficient tunnel ventilation control algorithm combining the application of dynamic neural network and fuzzy control is recommended. Special attention is paid to the performance evaluation of tunnel boring machines and defect detection of operating underground facilities. In general, the scope of the presented research in the field of artificial intelligence (machine learning) as applied to the development of underground space is relatively narrow and leaves many aspects uncovered.

**Keywords:** defects of operated tunnels; artificial intelligence; computer learning; underground space; tunnel boring machine; transport tunnels; soil characteristics; tunnel construction efficiency

**For citation:** Konyuhov D.S. Problematics of Artificial Intelligence at the World Tunnelling Congress 2024: Review. *Transport technician: education and practice*. 2025;6(2).203-211. (In Russ.). <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2025.2.203-211>. EDN SCUPMB.

## ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация все более интенсивно внедряется в освоение подземного пространства, включая тоннелестроение и эксплуатацию тоннелей. Это нашло свое отражение в представленных на 50-м Всемирном тоннельном конгрессе в 2024 г. в КНР (г. Шэньчжэнь) докладах, выступлениях, презентациях и т.д. Данные конгрессы с полным правом можно признать профессиональной фиксацией уровня научно-технического развития в своей отрасли, они охватывают все ее аспекты. В частности, на Конгрессе–2024 рассматривался 21 такой раздел, включая связанные с цифровизацией, и в их числе — по проблеме искусственного интеллекта (ИИ) с применением методов и инструментария машинного моделирования.

Авторитет всемирных тоннельных конгрессов привлекает к участию в них известных ученых, исследователей, наиболее продвинутых в развитии страны и действующие коллективы. В 2024 г. в работе конгресса приняли участие более 60 стран, на 5 секциях было представлено более 300 презентаций. Все принятые Программным комитетом статьи опубликованы на 3729 страницах в трудах конгресса [1], что позволяет на этой основе оценить общее состояние, уровень научно-технического прогресса в освоении подземного пространства.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В упомянутых трудах конгресса отдельным разделом представлена тематика, посвященная ИИ [1]. Здесь размещены поступившие из 14 стран 19 статей 68 авторов (в том числе 36 — из КНР). Указанные статьи отражают уровень и состояние

разработанности проблем соответствующей тематики как в теоретическом, так и в методическом аспектах, а также опыт и результаты внедрения в области освоения подземного пространства.

Общая направленность материалов, опубликованных в трудах конгресса и связанных с тематикой ИИ (машинного обучения — МО), обусловлена стремлением решать машинными методами задачи по обработке «больших данных»: прогнозирование, распознавание образов, классификация, управление в реальном масштабе времени и т.п.

Результаты краткого обзора отдельных публикаций из упомянутого раздела трудов конгресса [1] приводятся далее.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Представленную на конгрессе совокупность докладов можно подразделить на следующие несколько направлений.

### Работа тоннелепроходческих машин

Целью исследования специалистов из Италии и Мексики [2] является прогнозирование параметров тоннелепроходческих машин (ТПМ) для применения на этапе проектирования с помощью так называемого фильтра Калмана (Unscented Kalman Filter), который может быть использован инженерами. В качестве отправной точки принят подход, основанный на усредненных формулах (полуэмпирических и аналитических), дающих руководство по управлению диапазонами значений на основе стохастического метода. Методология применена на практическом примере в четырех тоннелях высокоскоростной железной дороги на севере Италии. Предложена методология, которая может

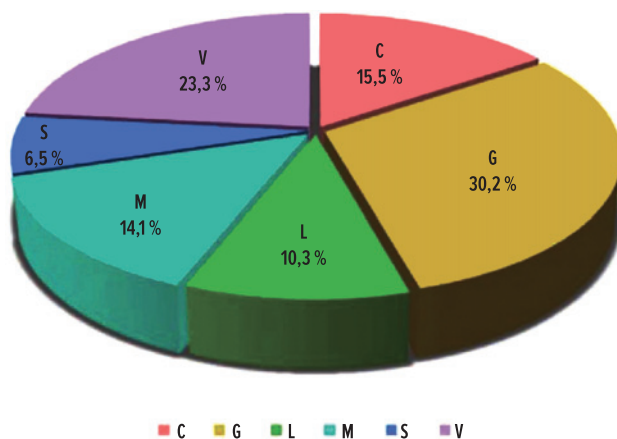
быть использована проектировщиками для эффективного прогнозирования параметров ТПМ на этапе проектирования в отсутствие полевых данных.

Поскольку замена поврежденных или изношенных дисковых фрез на ТПМ приводит к значительным затратам и простоям, влияя на использование ТПМ и темпы проходки, точная оценка срока службы дисковых фрез имеет решающее значение для эффективного использования ТПМ в тоннельных проектах. Группой исследователей из Южной Кореи предложена новая модель прогнозирования на основе МО, предназначенная для прогнозирования износа дисковых фрез с учетом длины хода отдельных фрез [3]. Учитывая 9 факторов, вызывающих износ, разработанная модель продемонстрировала исключительную точность прогнозирования для длины проходки с одним кольцом.

Группа южнокорейских исследователей изучала прогнозирование износа дисковой фрезы с учетом грунтовых условий и рабочих параметров ТПМ [4] с помощью МО. С этой целью выполнили предварительную обработку информации (выбор входных переменных, выделение устойчивых состояний и разбиение данных на части). Рекомендовано учитывать температуру смазки фрезы (с задней и передней сторон), крутящий момент, скорость опережения и давление подачи. Созданы модели прогнозирования с применением шести алгоритмов управляемого машинного обучения под надзором и сопоставлена их средняя эффективность предсказания, которое рекомендовано выполнять с помощью модели CatBoost [5], продемонстрировавшей относительно высокую точность предсказания для тестовых данных (показатель  $R^2 = 0,88$ ).

Группа российских и китайских вузовских исследователей изучала возможность применения алгоритмов МО для прогнозирования скорости движения щитового комплекса в тоннеле [6]. Показано, что методы МО могут использоваться для точного прогнозирования скорости движения ТПМ, позволяя повысить эффективность проходки тоннеля. К вводимым данным были применены несколько алгоритмов МО, включая линейные регрессионные модели, модели деревьев решений и нейронные сети (НС) для прогнозирования скорости движения ТПМ.

В связи с расширением работ по освоению подземного пространства, прокладке транспортных тоннелей, увеличению объемов проходки с помощью ТПМ раскрываются новые возможности и потребности совершенствования техники и технологии тоннелестроения. К их числу относится, в частности, прогнозирование производительности ТПМ в разных горных породах. Несмотря на широкое использование ТПМ в тоннельных проектах, точная оценка производительности ТПМ, особенно в различных геологических условиях, по-прежнему



**Рис. 1.** Структура базы данных горных пород:

C — окаменелые глины, аргиллит, мергель, сланец, филлит, аргиллит; S — песчаник, алевролит, конгломерат, кварцит; L — известняк, мел, доломит, мрамор; M — метаморфические породы, такие как гнейс и сланец; G — магматические породы, такие как гранит и диорит; V — вулканические породы, такие как базальт, туф, андезит

представляет собой сложную задачу. Существующие классификации горных пород основаны на требованиях и показателях устойчивости тоннеля и конструкции крепи. Для оценки производительности ТПМ нужен учет другого набора показателей. Их выявление и отбор в современных условиях реальных на базе сбора, накопления и анализа больших массивов данных по производительности ТПМ в разных горно-геологических условиях и построения соответствующих прогнозных моделей. Группа ученых из Ирана, США и Германии представила на конгрессе [7] исследование различных экспериментальных моделей для прогнозирования скорости проходки с применением ТПМ на основе разных систем классификации горных пород, в том числе учитывающих в качестве исходных данных прочность при одноосном сжатии, показатель нарушенности породы, шаг трещин и поверхности сопряжения, а также категории литологии, позволяющих с помощью регрессионного анализа на базе МО получить уравнение для индекса проходки по конкретному горному массиву. В исследовании рассматривалась база данных, охватывавшая шесть типов горных пород, доли которых показаны на рис. 1.

### Изучение деформаций грунтов и сооружений. Мониторинг

В публикации австралийских и индийских исследователей [8] описывается анализ работы контролируемых алгоритмов МО для классификации деформаций в тоннелях. Из экспериментов следует, что наилучшую эффективность показали алгоритмы, основанные на функционале: повышение точности предсказания составило 14–26 %.



Рис. 2. Система исследования путевых устройств на рельсовом ходу

Китайскими учеными для классификации и сегментации трещин в тоннелях с повышенной точностью и эффективностью предлагается [9] двухэтапный метод на основе глубокого МО. На первом этапе разработана модель автоматической классификации изображений тоннелей с использованием нейронной сети DenseNet-169. Предложенная модель сегментации трещин на втором этапе основана на алгоритме DeepLabV3+ [10] устранения фона и повышения качества выделения собственно трещин. Предлагаемый метод объединяет классификацию и сегментацию тоннельных изображений, поэтому отобранные на первом этапе изображения, содержащие трещины, сегментируются на втором этапе для повышения точности и эффективности обнаружения. Повышенные характеристики двухэтапного метода подтверждены экспериментами.

Поскольку в современных условиях эксплуатации крупномасштабных тоннелей обслуживание тоннельных конструкций является важным вопросом и требует принятия сложных решений, особенно связанных с быстрым обнаружением и анализом конструктивных дефектов, и вследствие того что традиционные методы визуального осмотра и принятия решений, основанные на опыте, характеризуются низкой эффективностью и субъективизмом, исследователями из Китая представлена интеллектуальная система поддержки принятия решений в отношении строительных дефектов тоннелей, позволяющая реализовать автоматическое принятие решений по работе с ними [11]. Построена модель глубокого МО для обнаружения структурных дефектов тоннеля на базе семейства моделей обнаружения объектов YOLOv8 [12], которая дает возможность быстро определить категорию и местоположение дефекта, выявленного с помощью специального оборудования, смонтиро-

ванного на подвижном составе (рис. 2), на изображении с помощью контролируемого обучения.

Затем строится граф знаний (ГЗ) для хранения соответствующих знаний о техническом обслуживании, существующих в неструктурированном (стандартном) формате. Кроме того, в ГЗ могут быть добавлены структурированные данные, отражающие состояние конструкции тоннеля (например, местоположение дефекта). В исследовании построена интеллектуальная система поддержки принятия решений для обслуживания структурных дефектов тоннеля.

Результаты исследования ученых из Норвегии и Непала по прогнозированию утечек и оценке состояния после цементации в тоннеле<sup>1</sup> головной части гидроэлектростанции показали [13], что методы МО могут быть успешно применены для оценки потенциала проникновения воды в тоннели головной части гидроэнергетических проектов.

Стратегия технического обслуживания и плановые проверки играют важнейшую роль в управлении крупномасштабными инфраструктурами, построенными в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН), где расположено более 80 км подземных тоннелей с ускорителями частиц и пучковыми линиями. Большинство тоннелей недоступны во время работы пучка. Во время инспекций тоннелей были замечены признаки старения их дефектов, особенно в тоннелях, построенных много десятилетий назад. В целях обеспечения безопасности персонала ЦЕРН и продления срока службы тоннелей ЦЕРН необходимо внедрить интеллектуальные средства мониторинга для автоматизации сбора данных и проведения удаленных проверок.

В публикации исследователей из Швейцарии, Ирландии и США [14] представлен обзор передовых технологий мониторинга, которые приме-

<sup>1</sup> Космин В.В., Космина А.А. Тоннель или туннель? Как правильно пишется это слово // Метро и тоннели. 2018. № 1. С. 26–27.

няются для обследования подземных тоннелей в ЦЕРН. Описываются самые современные инструменты мониторинга, роботизированная навесная съемка, беспилотные летательные аппараты и волоконно-оптические датчики. Анализ проводится с помощью технологий ИИ, МО, глубокого обучения на основе графики и фотограмметрии. Практическая применимость включенных в обзор методик проверена в подземных зонах ЦЕРН, что позволило получить инструментальные данные для управления активами тоннелей ЦЕРН. В целом использование автоматизированных и дистанционных средств мониторинга дает возможность собирать и обрабатывать большие массивы данных, сводя к минимуму субъективность визуального осмотра инженерами и преодолевая ограниченный доступ к территориям ЦЕРН. Внедрение рассмотренных технологий мониторинга со временем улучшило проверку объектов ЦЕРН и позволило лучше планировать ремонтные работы.

В исследовании авторов из КНР [15] представлена технология гиперспектральной визуализации для быстрого определения прочности обделки с помощью машинного зрения. Эта технология включает сбор спектральных данных образцов с различной прочностью с помощью двух гиперспектральных камер с разной длиной волны и применение алгоритмов МО для установления прочности бетона на сжатие. Итоги обработки показали, что удовлетворительные результаты были достигнуты как без предварительной обработки, так и с помощью изолированной предварительной обработки по методу Савицкого – Голя [16]. Кроме того, в ходе исследования изучено влияние различных спектральных диапазонов длин волн на оценку прочности бетона на сжатие. В результате открыты новые возможности для неразрушающего контроля прочности конструкций тоннельной обделки.

В представленном исследовании [17] китайских специалистов для распознавания и сегментации признаков нарушений, таких как трещины, слабые прослойки и утечки в забоях горных тоннелей, применена новая усовершенствованная модель Swin Transformer (ST) [18, 19]. Результаты проведенных тестов с использованием нового набора изображений показали, что эффективность распознавания и сегментации, достигнутая улучшенной моделью ST, заметно превосходит показатели ряда рассмотренных обычных моделей. В целях количественной сегментации особенностей горных пород и геологических эскизов модель ST служит основой для создания набора данных Tunnel Face Feature (TFF), составленного из нескольких источников. Этот набор данных включает параметры горных пород, физико-механические параметры и параметры конструкции тоннеля. Тем не менее из-за временных и пространственных ограничений,

связанных с получением информации на месте строительства тоннелей, одновременное получение всех параметров становится сложной задачей. Для решения проблемы неполноты наборов данных TFF разработана простейшая байесовская сеть.

С целью классификации окружающих пород и анализа механических параметров китайскими исследователями создан [20] обширный массив данных из 5220 образцов, включающий параметры бурения, категории прочности окружающих пород и механические параметры на основе проектов строительства тоннелей высокоскоростных железных дорог Чжэнчжоу – Ваньчжоу и Ичан – Синьшань. Предварительно была разработана стандартизированная методология очистки данных и поиска признаков, учитывающая многомасштабные характеристики распределения параметров бурения в забое тоннеля. Затем применен типичный алгоритм МО для построения интеллектуальной модели классификации окружающей породы. Вслед за этим разработаны теоретические модели для механических параметров. Результат показал, что точность интеллектуальной классификации окружающих пород II, III, IV и V классов может превышать 90 %. Кроме того, ошибка идентификации одноосной прочности на сжатие и модуля упругости окружающей породы также находилась в пределах допустимого диапазона, с лучшей производительностью в более твердых породах.

### Обучающие методы

Исходя из представления о том, что облака точек, полученные в результате сканирования, являются ценными цифровыми активами для обследования и оценки тоннельных конструкций, сегментация отсканированных облаков точек служит необходимым условием для измерения деформации сегментов. Эффективное средство при этом — глубокое 3D-обучение (DL). С этой целью группа китайских исследователей создала аннотированный высококачественный и объемный набор данных облаков точек для последующего обучения и оценки пространственных DL-моделей [21]. Для сравнения влияния различных методов дополнения данных и параметров сети проведены эксперименты с использованием популярной пространственной сети DL PointNet++ [22]. Предложенный метод автоматической сегментации дает возможность повысить эффективность обработки облака точек тоннельных колец и облегчить контроль деформации сегментов.

Для решения задачи снижения рисков, связанных со значительными капитальными затратами и сложным планированием при строительстве тоннелей, исследователями из Ирана и США разработаны десять различных вычислительных методов, включающих модели управляемого и неуправляемого обучения, основанные на статисти-

ке, машинном обучении, нечетких, генетических подходах и алгоритмах глубокого обучения [23]. Модели были реализованы на основе обширной базы данных, охватывающей пять характеристик (скорость вращения фрезы, скорость проходки, нагрузка на фрезу, прочность на одноосное сжатие и качество породы). Сведения, использованные в моделях, собраны и сгенерированы из специализированной базы данных, содержащей множество участков тоннелей из пяти отобранных проектов, охватывающих широкий спектр литологических единиц с различной прочностью на сжатие осадочных, магматических и метаморфических пород. Результаты анализа выявили значительные корреляции между переменными геомеханическими свойствами пород и параметрами рабочей машины с производительностью ТПМ. Результаты применения предложенных моделей показали удовлетворительную и надежную точность: все модели имели значение  $R^2 > 0,70$ , а значения функции потерь приближались к нулю.

Китайскими исследователями продемонстрирован [24] систематический набор интеллектуальных методов МО для улучшения физических свойств грунта при щитовой его разработке с упором на данные, алгоритмы и приложения. Кроме того, предложена стратегия количественной оценки неопределенности на основе активного обучения, чтобы понять надежность результатов прогнозирования модели без знания истинного значения. Результаты показывают, что: 1) разработка признаков и выбор моделей МО создают основу и методологию для автоматизированного исследования улучшения физических свойств грунта в грунтовом пригрузе в отношении данных и алгоритмов; 2) МО для улучшения физических свойств грунта должно полностью учитывать влияние исторических параметров их улучшения на результаты прогнозирования; 3) стратегия количественной оценки неопределенности на базе активного обучения обладает исключительными возможностями в определении надежности результатов прогнозирования модели. Это может эффективно расширить применение МО для автоматизации проходки щитовых тоннелей с пригрузом.

### **Цифровые методы проектирования, строительства и управления эксплуатацией**

С развитием технологий МО и интеллектуального управления технология беспилотного движения проходческих щитов постепенно переходит из лабораторных условий в инженерную сферу. Группой китайских исследователей на этой основе предложен [25] цифровой режим бережливого строительства тоннеля посредством оптимизации процессов, материалов, оборудования, персонала и пространства, отслеживания и оценки эффекта в

режиме реального времени, анализа причин и координации различных аспектов для обеспечения того, чтобы все строительство всегда находилось в состоянии эффективной работы. По сравнению с традиционным режимом строительства он позволяет значительно снизить влияние различных человеческих факторов, сократить трудозатраты, ускорить процесс строительства, уменьшить загрязнение окружающей среды и механические потери в процессе строительства, а также повысить безопасность, качество и эффективность проекта.

Авторы из Японии изучили методы проектирования в традиционной проходке тоннелей для рационального и экономичного выбора опорных конструкций и оптимального ведения взрывных работ с использованием алгоритма МО [26]. В качестве входных переменных используются данные измерений при бурении (MWD) зарядных скважин в забое, относимые к «большим данными» и автоматически собираемые с интервалом в несколько сантиметров буровыми установками с компьютерным управлением. Предложенный метод, применяющий количественные сведения измерений при бурении, может реализовать эти проекты с большей последовательностью и быстротой, чем традиционные способы, в которых решение принимается на базе субъективных наблюдений инженера за внешним видом горной массы. Описан пример анализа геотехнической информации и данных измерений при бурении, полученных в рамках реального проекта строительства тоннеля. Построенный нейросетевой алгоритм дал возможность использовать классификацию горного массива в качестве основы для выбора обделки тоннеля, получить классификацию горных пород, согласующуюся с интерпретацией геологом более чем на 70 %. Используя усредненные данные MWD по каждой скважине и результаты их статистического анализа, подтверждено, что объем взрывчатого вещества был спрогнозирован с точностью 90 %. Построены алгоритмы МО, в которых объективные переменные классификации горной массы в забое тоннеля и требуемый объем взрывчатого вещества для взрыва оценивались по переменным данным MWD, исследована точность алгоритмов.

Китайскими исследователями представлен новый энергоэффективный алгоритм управления вентиляцией тоннелей [27], сочетающий динамические НС и методы нечеткого управления. В предложенном алгоритме используются нелинейные нейронные сети с авторегрессией и аналогичные сети с авторегрессией и внешним входом для прогнозирования скорости транспортного потока и концентрации угарного газа в тоннеле в следующий момент времени, таким образом заранее определяя состояние окружающей среды в тоннеле. Создана модель расчета энергопотребления

для тоннельных вентиляторов. Результаты демонстрируют экономию энергии на уровне 14,4 % по сравнению с традиционным алгоритмом нечеткого управления, который опирается на фактические измеренные значения угарного газа в качестве входных данных. Утверждается, что интеграция динамических НС и нечеткого управления в регулировании вентиляции в тоннеле представляет собой перспективный подход к повышению энергоэффективности тоннелей.

На конгрессе были также представлены и некоторые другие исследования в рассматриваемой области.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные в трудах Международного тоннельного конгресса 2024 г. материалы отражают современное состояние разработок в области ИИ в освоении подземного пространства. Они в целом сконцентрированы на следующих направлениях, связанных преимущественно с обработкой больших массивов информации:

- совершенствование работы тоннелепроходческих машин методами прогнозирования технико-экономических характеристик их в целом и в разрезе отдельных компонент, таких, например, как щитовые (дисковые) фрезы, с учетом параметров ТПМ и показателей грунтов;
- прогнозирование и подбор скорости проходки тоннеля с применением ТПМ;
- удаленный контроль состояния конструкции тоннелей, выявление конструктивных дефектов и их классификация;
- энергоэффективное управление вентиляцией тоннелей;
- набор интеллектуальных методов МО для улучшения физических свойств грунта при щитовой его разработке и т.п.

В рамках этих направлений на основе анализа эффективности алгоритмов прогнозирования классов деформации в тоннелях, автоматической классификации и сегментации трещин в тоннелях с помощью алгоритмов глубокого обучения предложена интеллектуальная система поддержки принятия решений по обслуживанию конструктивных дефектов тоннелей с использованием

графа знаний и глубокого обучения, представлено экспериментальное исследование применения гиперспектральных изображений для оценки прочности бетона на сжатие.

Проблематика оценки грунтов исследована в связи с интеллектуализацией классификации окружающих горных пород и анализом механических их параметров исходя из параметров бурения тоннелей. Показано прогнозирование качества окружающих пород на основе неполного набора данных из нескольких источников и применения деревьев в простейшей байесовской сети. Описаны проектирование, выбор модели и количественная оценка неопределенности при кондиционировании грунта для механизированной щитовой проходки с применением МО.

В рамках повышения эффективности эксплуатации тоннелей предложен энергоэффективный алгоритм управления вентиляцией тоннеля, сочетающий применение динамической НС и нечеткого управления. Показана методика интеллектуализации управления активами подземных сооружений на примере исследовательских тоннелей ядерного ускорителя, а также описаны исследование и практика цифрового бережливого режима строительства тоннелей на основе технологии щитовой проходки. Специальное внимание уделено оценке производительности тоннелепроходческих машин и выявлению дефектов эксплуатируемых подземных объектов. В частности, на базе подхода с использованием фильтра Калмана дана оценка параметров таких машин; предложена оригинальная модель компьютерного обучения для оценки срока службы дисковых резцов в тоннелепроходческой машине с учетом индивидуальной длины хода резцов; с помощью алгоритмов компьютерного обучения выполнено прогнозирование скорости движения такой машины, износа дисковой фрезы с учетом грунтовых условий и рабочих ее параметров. Описана модель прогнозирования производительности тоннелепроходческой машины в твердых породах на основе методов ИИ.

В целом сфера представленных на 50-м конгрессе Всемирной тоннельной организации исследований в области искусственного интеллекта (машинного обучения) применительно к освоению подземного пространства сравнительно узкая и оставила ряд аспектов неохваченными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tunnelling for a Better Life. Taylor & Francis, 2024. Pp. 2995–3299.
2. Iasiello C., Rodríguez-Sánchez J. TBM machine parameters estimation: From design approach to on-field results. A concrete

example based on Kalman Filter approach // Tunnelling for a Better Life. 2024. Pp. 3023–3028.

3. Kim D., Shin Y., Kim D., Lee C., Kwon K. et al. A novel machine-learning model for estimating disc cutter life in TBMs considering

individual cutter travel lengths // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3053–3058.

4. Kang Y.S., Park S.J., Hwang J.H., Hong J.P., Ko T.Y. Prediction of disc cutter wear considering ground conditions and TBM operating parameters // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3037–3043.

5. CatBoost in Machine Learning // *GeeksforGeeks*. 2025. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/catboost-ml>

6. Miller M., Fang Y., Luo H., Wang Y., Xu G. et al. Forecasting the driving speed of the TBM using machine learning Algorithms // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3067–3072.

7. Dardashti A., Rostami J., Ajalloeian R., Hassanpour J., Salimi A. Development of a hard rock TBM performance prediction model using RMR input parameters // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 2995–3004.

8. Dewangan A., Sahoo D.R., Karlovsek J. Performance analysis of supervised algorithms on encoded data for predicting tunnel strain classes // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3005–3013.

9. Feng Y., Zhang X., Feng S., Zhao Y., Chen Y. Automatic classification and segmentation of tunnel cracks based on deep learning and visual explanations // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3014–3022.

10. Wang Y., Yang L., Liu X., Yan P. An improved semantic segmentation algorithm for high-resolution remote sensing images based on DeepLabv3+ // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-024-60375-1

11. Jia F., Xue Y., Zhang Q., Qu L. An intelligent decision support system for tunnel structural defects maintenance with combining knowledge graph and deep learning // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3029–3036.

12. Ultralytics YOLOv8 // Хабр. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/710016>

13. Katuwal T.B., Panthi K.K., Basnet C.B., Adhikari S. Leakage prediction and post-grouting assessment in headrace tunnel of a hydropower project // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3044–3052.

14. Murro V.D., Ouyang A., Osborne J.A., Li Z. Intelligent tunnel asset management of CERN underground facilities // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3073–3078.

15. Wang C., Huang H., Zhou M., Zhu S. Hyperspectral imaging features for concrete compressive strength assessment: Experimental study // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3104–3112.

16. Никонов А.В., Давлетшин Р.В., Яковлева Н.И., Лазарев П.С. Фильтрация методом Савицкого – Голя спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств // *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4. № 2. С. 198–205. EDN VXBTOI.

17. Wu C., Huang H., Tong H., Zhou M., Zhang L. et al. Investigation on surrounding rock quality prediction based on incomplete multi-source dataset and tree-augmented naive Bayesian network // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3131–3138.

18. Обзор архитектуры Swin Transformer // Хабр. 2022. URL: <https://habr.com/ru/articles/599057>

19. Liu Z., Lin Y., Cao Y., Hu H., Wei Y. et al. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows // 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2021. Pp. 9992–10002. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00986

20. Wang M., Zhao S., Yi W., Peng X. Intelligent surrounding rock classification and mechanical parameters analysis method based on drilling parameters of tunnels // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3122–3130.

21. Lin W., Sheil B., Xie X., Li K., Niu G. Segment segmentation of tunnel ring point clouds using 3D deep learning // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3059–3066.

22. Qi C.R., Yi L., Su H., Guibas L.J. PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1706.02413

23. Samadi H., Hassanpour J., Rostami J., Moghbeli A. Assessment of TBM performance in different types of rocks using supervised learning techniques // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3095–3103.

24. Yuan X., Wang S., Qu T. Machine learning-informed soil conditioning for mechanized shield tunneling feature engineering, model selection, and uncertainty quantification // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3139–3145.

25. Pei L., Wu H., Hu M., Lu J., Wu B. et al. Research and practice of digital lean construction mode of tunnelling based on shield self-driving technology // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3079–3085.

26. Sakai K., Miyayama S., Yamagami M. Study on machine learning method for supporting conventional tunnel engineering judgement // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3086–3094.

27. Wang H., Li Z., Zhang Y., Zhang J. An energy-efficient tunnel ventilation control algorithm combining dynamic neural network and fuzzy control // *Tunnelling for a Better Life*. 2024. Pp. 3113–3121.

## REFERENCES

1. *Tunnelling for a Better Life*. Taylor & Francis, 2024;2995-3299.

2. Iasiello C., Rodríguez-Sánchez J. TBM machine parameters estimation: From design approach to on-field results. A concrete example based on Kalman Filter approach. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3023-3028.

3. Kim D., Shin Y., Kim D., Lee C., Kwon K. et al. A novel machine-learning model for estimating disc cutter life in TBMs considering individual cutter travel lengths. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3053-3058.

4. Kang Y.S., Park S.J., Hwang J.H., Hong J.P., Ko T.Y. Prediction of disc cutter wear considering ground conditions and TBM operating parameters. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3037-3043.

5. CatBoost in Machine Learning. *GeeksforGeeks*. 2025. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/catboost-ml>

6. Miller M., Fang Y., Luo H., Wang Y., Xu G. et al. Forecasting the driving speed of the TBM using machine learning Algorithms. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3067-3072.

7. Dardashti A., Rostami J., Ajalloeian R., Hassanpour J., Salimi A. Development of a hard rock TBM performance prediction model using RMR input parameters. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;2995-3004.

8. Dewangan A., Sahoo D.R., Karlovsek J. Performance analysis of supervised algorithms on encoded data for predicting tunnel strain classes. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3005-3013.

9. Feng Y., Zhang X., Feng S., Zhao Y., Chen Y. Automatic classification and segmentation of tunnel cracks based on deep learning and visual explanations. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3014-3022.

10. Wang Y., Yang L., Liu X., Yan P. An improved semantic segmentation algorithm for high-resolution remote sensing images based on DeepLabv3+. *Scientific Reports*. 2024;14(1). DOI: 10.1038/s41598-024-60375-1
11. Jia F., Xue Y., Zhang Q., Qu L. An intelligent decision support system for tunnel structural defects maintenance with combining knowledge graph and deep learning. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3029-3036.
12. Ultralytics YOLOv8. *Habr*. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/710016> (In Russ.).
13. Katuwal T.B., Panthi K.K., Basnet C.B., Adhikari S. Leakage prediction and post-grouting assessment in headrace tunnel of a hydropower project. *Tunnelling for a Better Life*. 2024; 3044-3052.
14. Murro V.D., Ouyang A., Osborne J.A., Li Z. Intelligent tunnel asset management of CERN underground facilities. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3073-3078.
15. Wang C., Huang H., Zhou M., Zhu S. Hyperspectral imaging features for concrete compressive strength assessment: Experimental study. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3104-3112.
16. Nikonov A.V., Davletshin R.V., Iakovleva N.I., Lazarev P.S. Savitzky-Golay smoothing method of FPA photodiodes spectral response. *Advances in Applied Physics*. 2016;4(2):198-205. EDN VXBTOI. (In Russ.).
17. Wu C., Huang H., Tong H., Zhou M., Zhang L. et al. Investigation on surrounding rock quality prediction based on incomplete multi-source dataset and tree-augmented naive Bayesian network. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3131-3138.
18. Overview of Swin Transformer architecture. *Habr*. 2022. URL: <https://habr.com/ru/articles/599057> (In Russ.).
19. Liu Z., Lin Y., Cao Y., Hu H., Wei Y. et al. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows. 2021 *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2021;9992-10002. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00986
20. Wang M., Zhao S., Yi W., Peng X. Intelligent surrounding rock classification and mechanical parameters analysis method based on drilling parameters of tunnels. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3122-3130.
21. Lin W., Sheil B., Xie X., Li K., Niu G. Segment segmentation of tunnel ring point clouds using 3D deep learning. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3059-3066.
22. Qi C.R., Yi L., Su H., Guibas L.J. *PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space*. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1706.02413
23. Samadi H., Hassanpour J., Rostami J., Moghbeli A. Assessment of TBM performance in different types of rocks using supervised learning techniques. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3095-3103.
24. Yuan X., Wang S., Qu T. Machine learning-informed soil conditioning for mechanized shield tunneling feature engineering, model selection, and uncertainty quantification. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3139-3145.
25. Pei L., Wu H., Hu M., Lu J., Wu B. et al. Research and practice of digital lean construction mode of tunnelling based on shield self-driving technology. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3079-3085.
26. Sakai K., Miyanaga S., Yamagami M. Study on machine learning method for supporting conventional tunnel engineering judgement. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3086-3094.
27. Wang H., Li Z., Zhang Y., Zhang J. An energy-efficient tunnel ventilation control algorithm combining dynamic neural network and fuzzy control. *Tunnelling for a Better Life*. 2024;3113-3121.

## Об авторе

**Дмитрий Сергеевич Конохов** — доктор технических наук, доцент, руководитель отдела научно-технического сопровождения строительства; **Мосинжпроект**; 123056, Москва, ул. 2-я Брестская, д. 5; SPIN-код: 6441-3597, РИНЦ ID: 350235, Scopus: 6507981388, ResearcherID: C-2635-2019, ORCID: 0000-0001-8635-232X; gidrotehnik@inbox.ru.

## Bionotes

**Dmitrij S. Konyuhov** — Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Scientific and Technical Support for Construction; **Mosinzhpromekt**; 5 2-nd Brestskaya st., Moscow, 123056, Russian Federation; SPIN-code: 6441-3597, ID RSCI: 350235, Scopus: 6507981388, ResearcherID: C-2635-2019, ORCID: 0000-0001-8635-232X; gidrotehnik@inbox.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.01.2025; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 28.05.2025.  
The article was submitted 17.01.2025; approved after reviewing 21.02.2025; accepted for publication 28.05.2025.