

УДК 625.7

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ ПРОГНОЗА ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЕ
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СТРОИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ**

Кобец Станислав Олегович
Председатель общественного объединения
«Экспертно-методический центр
строительного контроля и управления
строительством Красноярского края» (ЭМЦ СК)

Аннотация

В статье рассматриваются возможности применения методов машинного обучения для прогноза дефектообразования в дорожной одежде на основе данных строительного контроля и результатов эксплуатационных обследований автомобильных дорог. Показано, что в действующей практике прогнозирование состояния дорожных одежд чаще строится либо на результатах диагностики уже эксплуатируемых участков, либо на расчетных и экспертных зависимостях, при этом массивы данных строительного контроля используются ограниченно. Предлагается подход, при котором исходные параметры качества строительства, отклонения от проектных и нормативных требований, результаты лабораторных испытаний материалов и характеристики выполненных работ используются как признаки для построения прогнозных моделей риска возникновения дефектов покрытия. Отдельное внимание уделяется принципиальному ограничению: модели машинного обучения рассматриваются исключительно как инструмент поддержки инженерных решений при организации строительного контроля, приемке работ и планировании последующего мониторинга, а не как замена профессиональной инженерной оценки. Описаны возможные составы наборов данных, варианты

постановки задачи прогнозирования, базовые алгоритмы машинного обучения для работы с табличными инженерными данными, а также направления практического использования результатов моделирования в системе риск-ориентированного строительного контроля.

Ключевые слова: дорожная одежда, строительный контроль, эксплуатационные обследования, машинное обучение, прогноз дефектов, транспортная инфраструктура, риск-ориентированный контроль, качество строительства.

Введение

Современное строительство автомобильных дорог и иных объектов транспортной инфраструктуры характеризуется высокой стоимостью жизненного цикла, значительной зависимостью эксплуатационной надежности покрытий от качества выполнения работ и необходимостью принятия управленческих решений на основе больших массивов разнородных данных. При этом в практической деятельности заказчиков, служб строительного контроля и эксплуатирующих организаций данные о фактическом качестве устройства конструктивных слоев, результатах входного и операционного контроля, лабораторных испытаниях и выявленных отклонениях чаще всего существуют разрозненно и редко используются как единая аналитическая база для прогноза будущего состояния дорожной одежды.

Одновременно в дорожной отрасли активно развиваются подходы, связанные с интеллектуальным анализом данных, компьютерным зрением и алгоритмами искусственного интеллекта для оценки состояния дорожных покрытий. В научных публикациях рассматриваются автоматизированное обнаружение дефектов по изображениям, алгоритмы анализа состояния дорожного полотна, а также прогнозирование ухудшения эксплуатационного состояния дорожных одежд с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Однако большинство таких работ ориентировано либо на уже выявленные дефекты, либо на данные дорожной диагностики в период эксплуатации, тогда как причинно-следственная

связь между качеством строительства и последующим развитием дефектов раскрыта недостаточно полно.

В этой связи актуальной является задача разработки подхода, при котором результаты строительного контроля рассматриваются не только как средство приемки выполненных работ, но и как информационная основа для предиктивной оценки риска дефектообразования в дорожной одежде. Такой подход позволяет перейти от фиксации нарушений и дефектов постфактум к более раннему выявлению факторов риска и обоснованию профилактических управленческих решений.

Цель статьи — предложить концептуальную модель применения методов машинного обучения для прогноза дефектообразования в дорожной одежде на основе данных строительного контроля и эксплуатационных обследований, обосновать состав исходных данных, возможные варианты постановки задачи и направления практического использования результатов в системе риск-ориентированного управления качеством.

1. Существующие подходы к оценке состояния дорожных одежд и их ограничения

1.1. Традиционные методы оценки состояния

В действующей практике оценка технического состояния дорожных одежд и покрытий выполняется на основании диагностических обследований, визуальной фиксации дефектов, инструментальных измерений и применения нормативно установленных подходов к анализу транспортно-эксплуатационного состояния дорог. Такие подходы позволяют определить текущее состояние участка, выявить наличие дефектов, оценить ровность, колейность, сцепные качества и иные показатели, необходимые для принятия решений по содержанию, ремонту и реконструкции.

Однако традиционные методы в основном ориентированы на описание уже сложившегося состояния дорожной одежды. Даже если используются

эмпирические зависимости и экспертные оценки, они часто слабо учитывают детальные данные о фактическом качестве строительства, технологических отклонениях и результатах операционного контроля по каждому конструктивному слою.

1.2. Применение интеллектуальных методов в дорожной сфере

В последние годы в научной литературе активно рассматриваются возможности использования интеллектуальных алгоритмов для дорожной отрасли. Опубликованы работы, посвященные автоматизированному обнаружению дефектов дорожного покрытия по изображениям, применению сверточных нейронных сетей, а также алгоритмам анализа состояния дорожного полотна на основе данных наблюдений. Наряду с этим имеются исследования, в которых алгоритмы искусственного интеллекта применяются для прогнозирования ухудшения эксплуатационного состояния дорожных одежд.

Вместе с тем выявляется методический пробел: в большинстве работ алгоритмы анализируют либо визуальные признаки уже возникших повреждений, либо эксплуатационные параметры без полноценной интеграции с результатами строительного контроля. Это ограничивает возможность раннего прогноза дефектообразования именно как следствия определенных нарушений технологии, отклонений параметров материалов или недостатков контроля качества на этапе строительства.

1.3. Ограничения действующей модели анализа данных

В действующей модели управления качеством дорожного строительства можно выделить несколько ограничивающих факторов:

1. отсутствие единого структурированного массива данных, связывающего параметры строительного контроля с последующими результатами эксплуатации;
2. преобладание ручного экспертного анализа причин дефектов;

3. слабая формализация и цифровизация значительной части данных полевого и лабораторного контроля;
4. сложность учета большого числа взаимосвязанных факторов, включая материалы, технологию производства работ, климатические воздействия и интенсивность движения;
5. ограниченное использование предиктивных моделей при планировании контрольных мероприятий и профилактических решений.

Эти ограничения создают предпосылки для использования методов машинного обучения, способных выявлять скрытые закономерности в многомерных табличных данных и оценивать вероятность развития дефектов на основе накопленных наблюдений.

2. Концепция прогнозирования дефектообразования на основе данных строительного контроля

2.1. Общая логика подхода

Предлагаемый подход основывается на объединении двух контуров данных. Первый контур формируется на стадии строительства и включает показатели строительного контроля, исполнительной документации, результатов испытаний материалов и фактических технологических параметров. Второй контур относится к этапу эксплуатации и включает результаты обследований дорожной одежды, характеристики возникших дефектов, сроки их появления и динамику изменения технического состояния.

Логика модели состоит в установлении зависимости вида «как был построен участок» — «какие дефекты возникли в процессе эксплуатации и в какой срок». В отличие от подходов, ориентированных только на текущее распознавание дефектов, такая постановка позволяет анализировать причинно значимые признаки и формировать прогноз риска еще на ранних стадиях жизненного цикла объекта.

2.2. Возможный состав данных строительного контроля

В качестве признаков модели могут использоваться следующие группы данных:

1. проектные и конструктивные характеристики: категория дороги, тип дорожной одежды, толщина и состав слоев, вид грунтов основания, расчетная интенсивность движения;
2. показатели входного контроля материалов: характеристики щебня, песка, асфальтобетонных смесей, вяжущих, результаты лабораторных испытаний;
3. данные операционного контроля: фактическая толщина слоев, плотность, влажность, температурные условия укладки, соблюдение технологических интервалов;
4. данные приемочного контроля: протоколы испытаний, акты освидетельствования скрытых работ, результаты инструментальных замеров;
5. сведения об отклонениях и замечаниях строительного контроля: повторяемость нарушений, сроки устранения, характер несоответствий, наличие повторных предписаний.

Именно эта группа признаков представляет наибольший интерес с точки зрения новизны исследования, поскольку позволяет учитывать факторы качества строительства как потенциальные предикторы последующих эксплуатационных дефектов.

2.3. Возможный состав эксплуатационных данных

В качестве целевых переменных и результирующих показателей могут использоваться:

1. факт появления определенного дефекта в течение заданного периода после ввода объекта в эксплуатацию;

2. тип дефекта, например колейность, продольные и поперечные трещины, сетка трещин, выбоины, шелушение, просадки;
3. интенсивность дефекта или степень его развития;
4. интегральные показатели состояния покрытия по результатам диагностики;
5. срок до возникновения первого существенного дефекта.

Дополнительно в модель могут включаться эксплуатационные и внешние факторы, такие как интенсивность и состав транспортного потока, климатические условия, число циклов замораживания и оттаивания, а также особенности содержания дороги. Это необходимо для повышения объясняющей способности модели и снижения риска ошибочного приписывания дефектов только строительным причинам.

3. Постановка задачи машинного обучения и выбор моделей

3.1. Варианты постановки задачи

Применительно к дорожной одежде задача может быть сформулирована несколькими способами. Наиболее понятной для начального этапа является задача бинарной классификации: определить вероятность возникновения конкретного дефекта на участке в течение определенного срока эксплуатации. Вторым вариантом — многоклассовая классификация по типам наиболее вероятных дефектов. Третий вариант — регрессионная задача, в которой прогнозируется количественный показатель, например глубина колеи, площадь трещин или интегральный балл состояния покрытия.

Для практики строительного контроля особенно полезной является задача оценки вероятности дефектообразования по группам риска. В этом случае результат модели может быть интерпретирован не как абстрактное математическое значение, а как основание для назначения усиленного мониторинга, дополнительных испытаний или профилактических мероприятий на конкретных участках.

3.2. Предварительная обработка и подготовка данных

Перед обучением модели необходима структуризация данных, объединение информации из актов, журналов, протоколов испытаний и материалов эксплуатационных обследований в единый аналитический набор. На этом этапе требуется унификация наименований признаков, обработка пропусков, исключение дублирующих записей, кодирование категориальных параметров и при необходимости нормализация числовых величин.

Критически важным условием является корректная привязка результатов эксплуатационных обследований к конкретным участкам и строительным событиям. Без такой привязки модель рискует обучаться на разрозненных данных и терять практическую применимость для инженерных решений.

3.3. Выбор алгоритмов машинного обучения

Для задач такого типа целесообразно начинать с алгоритмов, хорошо работающих с табличными инженерными данными: логистическая регрессия как базовая модель, случайный лес, градиентный бустинг и иные ансамблевые методы. Именно такие подходы позволяют сопоставлять точность прогноза с интерпретируемостью результатов и в ряде исследований показывают высокую применимость для прогнозирования состояния дорожных одежд.

Использование сложных нейросетевых архитектур также возможно, однако на начальном этапе оно не всегда оправдано, поскольку в инженерной практике важны не только точность, но и объяснимость вывода модели. Для служб строительного контроля особенно значимо понимать, какие именно признаки влияют на рост риска дефектообразования: недостаточная плотность, отклонение по толщине слоя, нарушения температурного режима, повторяемые замечания по технологии или иные факторы.

3.4. Метрики качества и интерпретация результатов

Для классификационных задач могут применяться accuracy, precision, recall, F1-мера и AUC ROC; для регрессионных — MAE, RMSE и коэффициент детерминации. Однако с точки зрения инженерной практики недостаточно ограничиваться общими метриками качества: необходимо дополнительно анализировать важность признаков и устойчивость результатов на разных группах объектов.

Интерпретация модели может выполняться через анализ важности признаков и методы локального объяснения. Это позволяет не только получить прогноз, но и выявить наиболее критичные управляемые факторы качества, которые должны быть включены в систему риск-ориентированного строительного контроля и программы последующего мониторинга.

4. Практическое использование модели в системе строительного контроля

4.1. Поддержка инженерных решений на этапе приемки работ

Одним из наиболее перспективных направлений является использование результатов модели при анализе завершенных этапов работ и приемке конструктивных слоев. Если по совокупности параметров конкретный участок попадает в зону повышенного риска последующего дефектообразования, это может служить основанием для дополнительной проверки исполнительной документации, назначения повторных испытаний или усиления требований к последующему наблюдению.

4.2. Формирование риск-ориентированных чек-листов

Модель машинного обучения может использоваться не только для прогноза, но и для уточнения содержания чек-листов строительного контроля. Если анализ показывает, что отдельные параметры наиболее существенно влияют на дальнейшее состояние покрытия, именно эти позиции должны становиться приоритетными в полевом, лабораторном и документарном контроле.

Такой подход позволяет перейти от формально одинаковой глубины контроля по всем параметрам к более рациональному распределению ресурсов службы строительного контроля. В условиях ограниченного кадрового ресурса это особенно важно для линейных и протяженных объектов транспортной инфраструктуры.

4.3. Планирование эксплуатационного мониторинга

Прогнозные оценки риска могут использоваться и после ввода объекта в эксплуатацию. Участки, которые по результатам модели отнесены к группам повышенной вероятности дефектообразования, могут включаться в программы более частого мониторинга, целевых обследований и раннего профилактического ремонта.

Это создает предпосылки для более рационального управления жизненным циклом дорожной одежды и позволяет связать между собой строительный контроль, эксплуатационную диагностику и систему принятия решений по содержанию и ремонту автомобильных дорог.

5. Ограничения и принципы корректного применения методов машинного обучения

5.1. Ограничения исходных данных

Основным ограничением остается качество и полнота исходных данных. Если данные строительного контроля ведутся несистемно, представлены в разных форматах, не имеют единой структуры и не привязаны к эксплуатационным результатам, точность и надежность модели будут ограничены независимо от выбора алгоритма.

Дополнительной проблемой является влияние факторов, не сводимых только к качеству строительства. На развитие дефектов существенно воздействуют транспортная нагрузка, климатические условия, качество содержания, локальные

гидрогеологические особенности и иные внешние обстоятельства, которые должны быть по возможности учтены в модели.

5.2. Принцип приоритета инженерной оценки

В целях минимизации рисков при внедрении моделей машинного обучения в строительный контроль необходимо соблюдать принцип приоритета инженерной оценки. Результат алгоритма не должен рассматриваться как окончательное основание для приемки или браковки работ, назначения санкций подрядчику либо формулирования выводов о причинах дефектов без участия квалифицированного специалиста.

Модель должна использоваться как инструмент поддержки решений, выявляющий скрытые закономерности и формирующий предупреждающие сигналы для инженера строительного контроля. Окончательная интерпретация результатов, сопоставление их с нормативными требованиями и выбор управленческих решений должны оставаться за специалистом.

5.3. Перспективы дальнейших исследований

Перспективным направлением является создание типовых цифровых структур данных для служб строительного контроля, позволяющих в дальнейшем формировать единые отраслевые массивы наблюдений. Наряду с этим целесообразно развитие методик объяснимого машинного обучения, ориентированных на инженерную интерпретацию результатов и интеграцию с действующими системами диагностики автомобильных дорог.

Дополнительный научный и практический интерес представляет сравнение моделей, построенных только на эксплуатационных данных, с моделями, включающими параметры строительного контроля. Именно такое сравнение способно наиболее убедительно показать вклад качества строительства в последующее дефектообразование дорожной одежды.

Заключение

В статье предложен подход к применению методов машинного обучения для прогноза дефектообразования в дорожной одежде на основе объединения данных строительного контроля и эксплуатационных обследований автомобильных дорог. Показано, что существующие исследования подтверждают перспективность использования интеллектуальных алгоритмов в дорожной сфере, однако преимущественно ориентированы либо на автоматическое обнаружение уже возникших дефектов, либо на прогноз эксплуатационного состояния без глубокой интеграции с данными строительного контроля.

Использование параметров качества строительства, результатов лабораторного и операционного контроля, сведений об отклонениях и замечаниях как признаков прогнозной модели позволяет сформировать более ранний и практически ориентированный инструмент управления рисками дефектообразования. Такой инструмент может применяться для поддержки инженерных решений при приемке работ, формировании риск-ориентированных чек-листов, назначении дополнительного мониторинга и совершенствовании системы управления качеством в дорожном строительстве.

Ключевым условием успешной реализации данного подхода является цифровизация данных строительного контроля, обеспечение их структурированности, сопоставимости и прослеживаемости на всем жизненном цикле объекта. При этом методы машинного обучения должны рассматриваться как средство усиления аналитических возможностей инженера строительного контроля, а не как замена его профессиональной компетентности и ответственности.