 © Авторы статьи / Authors of the article

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ/CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1 EDN: PZBVWI

МЕТОДИКА ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕМОНТА И ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ В ГОРОДЕ МОСКВЕ

Научная статья

Никитаев М.М.[1,] *, Брежнева М.А.[2]
[1] ORCID : 0009-0003-2256-8676;
[2] ORCID : 0000-0002-1576-6899;
[1, 2] Автомобильные дороги, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mn[at]inbox.ru)

Предложена: 28.02.2026; Принята: 20.10.2026; Опубликована: 20.11.2026

Аннотация

Предложена методика выбора материалов и технологий ремонта асфальтобетонных покрытий в условиях города Москвы на основе связки определения дефектов в ходе мониторинга, анализа механизмов разрушения и рекомендаций по выбору материалов и наиболее подходящих технологий ремонта. В качестве исходных данных используются результаты инструментального обследования: продольная ровность (IRI), поперечная ровность (поперечный профиль/колейность), параметры трещиноватости (плотность/тип трещин), ремонтные карты (площадь и частота карточных ремонтов), геометрия дороги (уклоны/поперечный уклон/радиусы). Методика ориентирована на покрытия из щебеночно мастичного асфальтобетона (ЩМА-15 и ЩМА-20) и позволяет формировать технологические решения ускоренного ремонта (ночные «окна», укороченные технологические цепочки, быстро вводимые материалы, локальные усиления) с повышением долговечности за счет устранения механизма дефекта. Предложены решения для ускоренного ремонта (4–12 ч) с повышением долговечности на 2–3 года. Приведены конкретные примеры и расчетные показатели, пороговые значения принятия решений, таблицы соответствия «дефект-механизм-решение».

Ключевые слова: дефекты покрытия, ровность, трещины, ремонтные карты.

METHODOLOGY FOR SELECTING MATERIALS FOR REPAIRING AND INCREASING THE DURABILITY OF ROAD SURFACES IN MOSCOW

Research article

Nikitaev M.M.[1,] *, Brezhneva M.A.[2]
[1] ORCID : 0009-0003-2256-8676;
[2] ORCID : 0000-0002-1576-6899;
[1, 2] Automobile roads, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (mn[at]inbox.ru)

Suggested: 28.02.2026; Accepted: 20.10.2026; Published: 20.11.2026

Abstract

The paper proposes a methodology for selecting materials and repair technologies for asphalt concrete pavements in the conditions of the city of Moscow, based on the combination of defect detection during monitoring, analysis of failure mechanisms and recommendations for selecting materials and the most suitable repair technologies. The results of the instrumental survey are used as the initial data: longitudinal flatness (IRI), lateral flatness (lateral profile/rutting), parameters of fracturing (density/type of cracks), repair maps (area and frequency of card repairs), road geometry (slopes/lateral slope/radii). The method is focused on coatings made of crushed mastic asphalt concrete (ShMA-15 and ShMA-20) and allows for the formation of technological solutions for accelerated repair (night "windows", shortened technological chains, quickly introduced materials, and local reinforcements) with increased durability due to the elimination of the defect mechanism. Solutions for accelerated repair (4–12 h) with an increase in durability by 2–3 years are proposed. Specific examples and calculated indicators, threshold values for decision-making, and tables of correspondence between defects, mechanisms, and solutions are provided.

Keywords: coating defects, smoothness, cracks, repair maps.

Введение

В Москве свыше 1500 км дорог с щебеночно-мастичным асфальтобетоном (ЩМА): ЩМА-15 (щебень ≤15 мм) и ЩМА-20 (≤20 мм) для верхних слоев 2–6 см на магистралях. Смеси обеспечивают сдвигоустойчивость, водонепроницаемость и шероховатость (щебень 70–80%, битум 5,5–6,5%). Целью настоящей статьи является разработка и апробация методики обоснованного выбора материалов и технологий ремонта асфальтобетонных покрытий (преимущественно ЩМА-15 и ЩМА-20) в условиях города Москвы на основе последовательности: «наблюдаемый дефект → доминирующий механизм разрушения → требуемые свойства слоя → материал/технология», с учетом данных инструментального мониторинга (IRI, колейность/поперечный профиль, плотность трещин, плотность ремонтных карт), эксплуатационных факторов и технологических ограничений ускоренного ремонта.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Актуальность исследования обусловлена спецификой эксплуатации улично-дорожной сети Москвы: высокой интенсивностью движения и долей тяжёлого транспорта, режимом частых торможений/разгонов на примыканиях и пересечениях, повышенными температурными и влаготепловыми воздействиями (в том числе циклы «замораживание–оттаивание»), а также необходимостью минимизировать ограничение движения при выполнении работ. В таких условиях одинаковые внешние проявления дефектов (трещины, колея, выбоины, выкрашивание) могут иметь различный механизм возникновения (термический, отражённый, усталостный, сдвиговой, влагоповреждение и др.), поэтому выбор ремонта только «по виду дефекта» часто приводит к повторному разрушению, росту доли карточных ремонтов и ухудшению транспортно-эксплуатационных показателей [1], [2], [3], [4]. Требуется разработка методики, обеспечивающей переход от симптоматических решений к технически обоснованному назначению материалов и технологий под доминирующий механизм разрушения [5].

Основные транспортные показатели автомобильной дороги – это скорость, непрерывность, безопасность и удобство движения, пропускная способность и уровень загрузки дороги движением, допустимая осевая нагрузка, общая масса и габариты автомобилей, а также экологическая безопасность [6], [7]. К числу основных характеристик, позволяющих оценивать транспортно-эксплуатационное состояние дороги, относятся:

• ширина проезжей части, краевой укрепленной полосы обочины, продольные уклоны и радиус кривых в плане или профиле, расстояние видимости;

• прочность дорожной одежды проезжей части, краевой закрепительной и остановочной полос обочин;

• поверхность проезжей части, краевой укрепительной и остановочной (укрепленной связным материалом) полосы обочин;

• качество земляного полотна и его элементов;

• целостность и работоспособность водоотводных и дренажных сооружений;

• наличие и желаемое состояние элементов инженерного оборудования и обустройство дороги.

Для комплексной оценки транспортно-эксплуатационного состояния дороги предлагается использовать интегральный индекс состояния дороги (RCI) (рис. 1).



Рисунок 1 - Взаимосвязь показателей, учитываемых при определении интегрального индекса состояния дороги

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.1

Модели и методы

Методика принятия решений «дефект → механизм → материал/технология» состоит в последовательном выполнении следующих этапов:

Этап 1. На первом этапе необходимо собрать исходные данные:

1. Данные о транспортно-эксплуатационном состоянии участка: продольная и поперечная ровность, сцепление/шероховатость, трещины, ремонтные карты, выбоины, выкрашивание и прочие дефекты.

2. Условия эксплуатации: интенсивность и состав движения (доля тяжёлых транспортных средств, тормозные зоны, перекрёстки, остановки общественного транспорта), климатические воздействия (температурный диапазон, число переходов через 0 °C, длительность увлажнения), водно-тепловой режим (состояние водоотвода, наличие переувлажнения, дефекты обочин и кромок).

3. Технологические ограничения: допустимое «окно» работ, требование быстрого открытия движения, доступность техники.

Этап 2. На втором этапе проводится классификация дефектов для выбора решения. Прежде всего необходимо классифицировать дефекты, отделить «поверхностный дефект» от «конструктивного». Если дефект не затрагивает несущую способность, то применимы тонкие слои или поверхностные обработки. Если дефект обусловлен недостаточной несущей способностью основания или земляного полотна, то ремонт верхнего слоя без конструктивного усиления даёт краткосрочный эффект. Если есть усталостная сетка трещин, колея от слабого основания, просадки, массовые разрушения, то необходим ремонт. Целесообразно группировать дефекты по признаку управляемости верхним слоем:

 © Авторы статьи / Authors of the article

• функциональные дефекты верхнего слоя (сцепление, износ, текстура) – эффективно устраняются тонкослойными и поверхностными технологиями;

• структурные дефекты верхних слоёв (колея в асфальтобетоне, усталостная сетка в пределах слоёв покрытия) – требуют материалов с повышенной сдвигоустойчивостью и трещиностойкостью либо частичной замены слоя;

• отражённые и температурные трещины – требуют противотрещинных мер (прослойки, армирование, герметизация), иначе дефект быстро проявится через новый слой;

• дефекты, связанные с основанием и переувлажнением (водонасыщение, повторяемые выбоины, кромочные разрушения) – приоритет регенерации, восстановления дренажа и усиления.

Этап 3. Третий этап состоит в расчете интегрального индекса состояния дороги и определении приоритетов обслуживания.

Для каждого объекта i и показателя j измеренное значение показателя x_{ij} нормируется: делится на пороговое значение показателя T_{ij} для устранения различия в единицах измерения и сопоставимости показателей:

$$r_{ij} = \max\left(0, x_{ij}/T_{ij}\right). \quad (1)$$

Частные индексы состояния I_{ij} задаются убывающей экспоненциальной функцией, которая не имеет разрыва и, в отличие от линейной функции с отсечением, сохраняет различия между участками при значительном превышении порога:

$$I_{ij} = 100 \cdot e^{-ln_2 r_{ij}^{\beta_j}} \quad (2)$$

Параметр $\beta_j > 0$ управляет формой кривой, если $\beta_j = 1$, то $I_{ij} = 100.$ При $x_{ij} = T_{ij}$ индекс равен 50, а при двукратном превышении – 25. Такая шкала является аналитической, монотонной и ограниченной интервалом (0;100].

Веса частных индексов определяются по методу CRITIC (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation), который определяет веса частных индексов [8], [9]. CRITIC определяет объективные веса по двум свойствам столбца: контрастности (разбросу) и конфликтности с остальными критериями. Высокая положительная корреляция указывает на дублирование информации и уменьшает вес, а слабая или отрицательная связь повышает информационную меру.

Перед расчетом весов все измеренные значения x_{ij} также нормируются: $z_{ij} = 0$ соответствует благоприятному состоянию, $z_{ij} = 1$ – максимальной потребности в ремонте. Для показателей «больше – хуже» применяют формулу:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} \quad (3)$$

для показателей «меньше – хуже» – формулу:

$$z_{ij} = \frac{x_{j,\max} - x_{ij}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} \quad (4)$$

Информационная ценность показателя возрастает при большом разбросе между объектами и при низкой корреляции с другими показателями:

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^{m} \left(1 - r_{jk}\right), \quad (5)$$

где:

C_j – информационная ценность показателя;

σ_j – стандартное отклонение совокупности: $\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(z_{ij} - \bar{z}_j\right)^2}$;

$\bar{z}_j$ – среднее значение показателя: $\bar{z}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} z_{ij}$;

r_{jk} – коэффициент корреляции Пирсона: $r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(z_{ij}-\bar{z}_j)(z_{ik}-\bar{z}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(z_{ij}-\bar{z}_j)^2 \sum_{i=1}^{n}(z_{ik}-\bar{z}_k)^2}}$.

Вес частного показателя определяется как:

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^{m} C_j} \quad (6)$$

В состав интегрального индекса состояния дороги *RCI* (0–100, чем больше значение, тем лучше) входят *PCI* – индекс технического состояния покрытия и *PRI* – индекс эксплуатационного приоритета. Индекс технического состояния покрытия вычисляется по формуле:

$$PCI_i^* = \sum_{j=1}^{m} w_j I_{ij}, \quad w_j \geq 0, \sum_{j=1}^{m} w_j = 1. \quad (7)$$

В развёрнутом виде для 4 частных индексов:

$$PCI_i^* = w_{IRI} I_{i,IRI} + w_{RD} I_{i,RD} + w_{CD} I_{i,CD} + w_{PD} I_{i,PD}, \quad (8)$$

где:

$I_{i,IRI}$ – частный показатель продольной ровности;

$I_{i,RD}$ – частный показатель поперечной ровности или колейности;

$I_{i,CD}$ – частный показатель плотности трещин;

 © Авторы статьи / Authors of the article

$I_{i,PD}$ – частный показатель плотность ремонтных карт.

*PCI** изменяется от 0 до 100 баллов, причём большее значение соответствует лучшему состоянию. Индекс предназначен для сетевого ранжирования и назначения приоритета углублённой диагностики (он не является PCI по ASTM D6433 и поэтому обозначается звёздочкой).

Сравнение разных способов объединения частных индексов (табл. 1) показывает, что при назначении равных весов индекс *PCI** имеет завышенное значение по сравнению с весами, определенными по методу CRITIC. При задании $I_{i,IRI} = I_{i,RD} = 0,3$ и $I_{i,ICD} = I_{i,PD} = 0,2$ индекс *PCI** имеет наименьшее значение, что дает некоторое увеличение приоритета ремонта. Такие значения весов могут быть рекомендованы для применения в практической деятельности.

Таблица 1 - Сравнение разных способов объединения частных индексов

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.2

Метод	w_{IRI}	w_{RD}	w_{CD}	w_{PD}	Среднее значение *PCI**	Согласие рангов с CRITIC
CRITIC	0,173	0,394	0,254	0,180	73,408	1,000
Равные веса	0,250	0,250	0,250	0,250	76,333	0,976
0,3/0,3/0,2/0,2	0,300	0,300	0,200	0,200	72,654	0,982

Интенсивность движения, климат, дренаж и нагрузки не являются измерениями повреждения покрытия. Их предлагается объединять в индекс эксплуатационного приоритета *PRI*, который также изменяется от 0 до 100 баллов, но чем больше его значение, тем срочнее требуется ремонт:

$$PRI_i = 100\left[G_i + \left(1 - G_i\right)\sum_{k=1}^{p} \upsilon_k I_{ik}\right] \quad (9)$$

при условиях:

$$\sum_{k=1}^{p} \upsilon_k = 1, \upsilon_k \geq 0, \quad (10)$$

где:

PRI_i – индекс эксплуатационного приоритета участка, баллы;

p – количество факторов приоритета;

υ_k – вес фактора k;

I_{ik} – нормированное значение фактора;

G_i – индикатор безотлагательного вмешательства: $G_i = \begin{cases} 1, \text{ выявлено критическое нарушение}, \\ 0, \text{ критическое нарушение не выявлено} \end{cases}$

При $G_i = 1$ получаем $PRI_i = 100,$ то есть аварийное или нормативно недопустимое состояние не может быть компенсировано низкими значениями других факторов.

Развёрнутая формула для 4 частных индексов имеет вид:

$$PRI_i = 100\left[G_i + \left(1 - G_i\right)\left(\upsilon_T I_{iT} + \upsilon_C I_{iC} + \upsilon_D I_{iA} + \upsilon_R I_{iK}\right)\right] \quad (11)$$

Интенсивность движения представляет собой количество транспортных средств, прошедших через поперечное сечение дороги за единицу времени. Для проектных расчетов используют расчетную перспективную интенсивность и состав потока, что соответствует ГОСТ 33100–2023 и СП 34.13330.2021. Индекс интенсивности движения определяется как:

$$I_{iT} = \frac{N_i - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}}, \quad (12)$$

где:

N_i – интенсивность на участке i;

$N_{\min}, N_{\max}$ – минимальная и максимальная интенсивность в зафиксированной опорной выборке. Для защиты от выхода за диапазон используется выражение:

$$I_{iT} = \min\left(1, \max\left(0, \frac{N_i - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}}\right)\right), \quad (13)$$

Для неоднородного транспортного потока определяется приведенная интенсивность:

$$N_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^{M} k_j N_j, \quad (14)$$

где:

$N_{\text{пр}}$ – приведенная интенсивность, привед. авт./сут;

N_j – физическая интенсивность транспортных средств типа j, авт./сут;

k_j – коэффициент приведения транспортного средства типа j к расчетному легковому автомобилю;

M – число учитываемых типов транспортных средств.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Коэффициенты k_j следует принимать по СП 34.13330.202 (Приложение Ж). Для легковых автомобилей $k_j = 1,$ для грузовых автомобилей, автобусов и автопоездов k_j становится больше единицы, так как эти транспортные средства оказывают большее влияние на транспортный поток, чем легковой автомобиль.

Индекс климатической зоны I_{iC} учитывает влияние погодно-климатических условий. Дорожно-климатическую зону следует устанавливать по СП 34.13330.2021 (Приложение Б). Нормы выделяют зоны и подзоны $I, I_1, I_2, II, II_1, II_2, III, III_1, IV, V$ (дополнительные климатические параметры следует принимать по действующему СП 131.13330.2025). Сначала каждый климатический фактор нормируется, а затем вычисляется климатический индекс:

$$I_{iC} = a_F z_{i,F} + a_M z_{i,M} + a_H z_{i,H} + a_T z_{i,T} \tag{15}$$

при условии:

$$a_F + a_M + a_H + a_T = 1 \tag{16}$$

где:

$z_{i,F}$ – нормированный показатель циклов перехода температуры через 0 °C;

$z_{i,M}$ – показатель увлажнения или осадков;

$z_{i,H}$ – показатель продолжительности переувлажнения;

$z_{i,T}$ – показатель высокотемпературного воздействия;

a_F, a_M, a_H, a_T – веса климатических факторов.

Смысл индекса – оценивать не условный номер зоны, а реальные механизмы разрушения: промерзание, переходы через ноль, увлажнение и высокотемпературное воздействие.

Индекс осевой нагрузки I_{iA} участка *i* при средневзвешенной оценке состава потока:

$$I_{iA} = 1 - \exp\left(-\ln(2)\left(\frac{\bar{s}_i}{s_{50}}\right)^{\gamma_A}\right) \tag{17}$$

где:

$\bar{s}_i$ – среднее разрушающее воздействие одного автомобиля на участке , выраженное в эквивалентных приложениях расчетной осевой нагрузки на один автомобиль;

s_{50} – опорное воздействие, при котором индекс равен 0,5;

γ_A – параметр формы функции;

$\ln(2)$ – натуральный логарифм числа 2;

exp – экспоненциальная функция.

Для шкалы 0–100 предлагается преобразование этого индекса для диапазона $0 \le I_{iA} < 1$:

$$I_{iA}^{100} = 100\left[1 - \exp\left(-\ln(2)\left(\frac{\bar{s}_i}{s_{50}}\right)^{\gamma_A}\right)\right] \tag{18}$$

Среднее разрушающее воздействие одного автомобиля на участке определяется как:

$$\bar{s}_i = \frac{\sum_{k=1}^{K} N_{ik} * q_{sum,ik}}{\sum_{k=1}^{K} N_{ik}} \tag{19}$$

где:

i – номер обследуемого участка дороги;

k – номер категории или типа транспортного средства;

K – общее количество категорий транспортных средств;

N_{ik} – количество автомобилей категории , зарегистрированных на участке за принятый период наблюдения;

$q_{\mathrm{sum},ik}$ – средний суммарный коэффициент приведения одного автомобиля категории *k* на участке к расчетной осевой нагрузке;

$\sum_{k=1}^{K} N_{ik}$ – общее количество зарегистрированных автомобилей всех категорий.

Показатель $\bar{s}_i$ безразмерный, поскольку коэффициенты приведения $q_{\mathrm{sum,ik}}$ безразмерны.

Числитель представляет собой суммарное количество эквивалентных приложений расчетной осевой нагрузки, создаваемое транспортным потоком, а знаменатель – общее число автомобилей. Например, $\bar{s}_i = 0,65$ означает, что один автомобиль транспортного потока в среднем создает воздействие, эквивалентное 0,65 приложениям расчетной оси.

При отсутствии воздействия $\bar{s}_i = 0 \Rightarrow I_{iA} = 0.$ При достижении опорного значения: $\bar{s}_i = s_{50} \Rightarrow I_{iA} = 1 - \exp(-\ln(2)) = 0,5.$ При неограниченном увеличении воздействия: $\bar{s}_i => I_{iA} \to 1.$ Таким образом, индекс осевой нагрузки монотонно возрастает, так как увеличение среднего разрушающего воздействия всегда увеличивает индекс.

Для дорожных одежд капитального типа расчетная статическая осевая нагрузка принимается 115 кН для облегченного и переходного типов – 100 кН. Нормативные нагрузки установлены ГОСТ 32960–2014. Коэффициенты приведения рассчитывают по действующему ГОСТ Р 71405–2024, который допускается применять и на стадии эксплуатации.

Индекс категории дороги интегрирует постоянные параметры: ширина проезжей части, габарит приближения, углы поворотов и радиусы, подъемы и спуски, уклоны, высота насыпи и глубина выемки, обустройство дороги. Категория дороги – нормативный классификационный признак, а не непрерывная физическая величина. ГОСТ 33100–2023 указывает, что категорию устанавливают в зависимости от класса дороги и расчетной интенсивности.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Техническая классификация дорог общего пользования установлена действующим ГОСТ 33382–2015 и по таблице 4.3 СП 34.13330.2021 (табл. 2).

Таблица 2 - Техническая классификация дорог общего пользования

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.3

Категория	Расчетная среднесуточная интенсивность
IA, IБ, IB	14 001 приведенных автомобилей в сутки и более
II	6 001–14 000
III	2 001–6 000
IV	401–2 000
Категории дорог с низкой интенсивностью	по ГОСТ Р 58818-2020

Для эксплуатируемых дорог применяются также Правила классификации, утвержденные постановлением Правительства РФ №767. Они устанавливают классы «автомагистраль», «скоростная дорога» и «обычная дорога», а также категории IA–V. Для вычисления индекса I_{iK} предлагается использовать ранговый подход:

$$I_{iK} = \frac{r_{iK}}{r_{\max}} \tag{20}$$

где:

r_{iK} – значение ранга категории дороги;

$r_{\max} = 7$ – максимальное значение ранга.

Присвоенные значения рангов и значения индекса категории дороги приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Значения индексов категории дороги

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.4

I_{iR}	Ранг	Категория дороги	Назначение
1,00	7	IA	Автомобильная магистраль
0,86	6	IБ	Скоростная дорога
0,71	5	IB	Дорога обычного типа
0,57	4	II	Дорога обычного типа
0,43	3	III	Дорога обычного типа
0,29	2	IV	Дорога обычного типа
0,14	1	V	Дорога обычного типа

Веса v_T, v_C, v_D, v_R также определяются по методу CRITIC. Для простоты расчетов можно принять $v_T = v_C = v_D = v_R = 0,25$.

Чтобы *RCI* имел направление «больше – лучше», необходимо инвертировать индекс *PRI*:

$$RCI_i = \alpha PCI_i + (1 - \alpha)\left(100 - PRI_i\right) \tag{21}$$

или в нормированной форме:

$$RCI_i = 100\left[\frac{\alpha PCI_i}{100} + (1 - \alpha)\left(1 - \frac{PRI_i}{100}\right)\right] \tag{22}$$

где:

RCI_i – общий эксплуатационный индекс дороги;

α – коэффициент баланса состояния и эксплуатационного приоритета, $0 \le \alpha <= 1$;

При равной значимости двух компонентов:

$$RCI_i = 0,5PCI_i + 0,5\left(100 - PRI_i\right) \tag{23}$$

Если требуется индекс, у которого большее значение означает больший эксплуатационный риск, используется обратная шкала:

$$RCI_i^{\text{risk}} = 100 - RCI_i \tag{24}$$

Приоритетность обслуживания участков определяется по индексу: большему значению соответствует более низкий приоритет.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Этап 4. На четвертом этапе определяется доминирующий механизм разрушения, формируются целевые требования к слою, которые задаются группами свойств:

- макро- и микротекстура (сцепление);
- сдвигоустойчивость (колея);
- усталостная/низкотемпературная трещиностойкость;
- водостойкость и герметичность;
- межслойная адгезия;
- технологичность (скорость ввода в эксплуатацию, уплотняемость, погодные ограничения).

Этап 5. Пятый этап обеспечивает подбор технологии (табл. 4) по выбранному механизму разрушения. Для определения межремонтного срока (долговечности) с учетом цикла 3 года для магистралей вводится базовый межремонтный срок для вида ремонта и корректирующие коэффициенты условий эксплуатации. Корректирующие коэффициенты можно задать таблично (например, при неудовлетворительном водоотводе или застоях воды, при высокой доле грузового транспорта и т. п.) и затем откалибровать по фактическим данным «после ремонта».

Таблица 4 - Основные дефекты покрытий ЩМА и рекомендуемые технологии для ремонта

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.5

Дефект по данным обследования	Диагностические признаки	Вероятный механизм	Рекомендуемый материал и технология	Ускоренная технология (г. Москва)
Колейность в полосах наката	Колея >20 мм, IRI растет, трещины отсутствуют на ранней стадии	Пластические деформации смеси, сдвиг; недостаточная сдвигоустой-чивость; перегрев или недоуплотнение	Фрезерование по колее и укладка ЩМА-20 ивысокомодульног о асфальтобетона; модифици-рованное вяжущее, целлюлозное волокно; корректировка грансостава	Ночное окно, укладка одним проходом; WMA-добавки для расширения температурного окна; контроль температуры и уплотнения; усиленная подгрунтовка
Продольные трещины вдоль шва или полосы	Площадь трещин растет; плотность ремонтных карт >3%	Недостаточное сцепление, некачественный продольный шов; водо-проникновение	Герметизация швов, локальное фрезерование шва 0,3–0,5 м и ЩМА-15; при повторяемости – тонкий слой	Машинная заливка герметиком; ИК-разогрев кромок; быстрая полимерная эмульсия
Поперечные термо-трещины	Равномерный шаг, усиливается зимой; ремонтные карты умеренно	Термическое растрескивание из-за старения или жесткости вяжущего	Тонкослойная укладка ЩМА-15 или тонкий слой на ПБВ и поглощающий слой	Нанесение тонких слоев, минимальная фрезеровка; ночная укладка, ускоренное охлаждение
Сеточные (усталостные) трещины	Площадь трещин высокая, частые ремонтные карты, IRI ухудшается	Усталость несущих слоев или основания, слабое основание, переувлажнение	Локальная реконструкция основания, холодная регенерация или замена слоев; сверху ЩМА-20	Фрезерование до несущего слоя, ускоренные смеси, геосинтетики по показаниям
Выкрашива-ние или разрушение поверхности, потери щебня	IRI может ухудшаться без ухудшения колейности; дефект на поворотах	Старение вяжущего, недостаток мастики, плохая адгезия	Ремонт тонким слоем ЩМА-15 на ПБВ; корректировка мастики (волокно)	Быстрое фрезерование 2–3 см, тонкослойная укладка; контроль подгрунтовки и чистоты основания
Повторяющи-еся ремонтые карты	Плотность ремонтных карт>3%, неоднород-ность	Локальные дефекты основания и технологические разрывы (стыки	Ремонт: фрезерование полосой, выравнивающий	Ремонт в ночное время, непрерывная подача смеси

 © Авторы статьи / Authors of the article

Дефект по данным обследования	Диагностические признаки	Вероятный механизм	Рекомендуемый материал и технология	Ускоренная технология (г. Москва)
	IRI	ремонтных карт)	слой ЩМА-20	

Этап 6. На шестом этапе выполняется контроль качества по заданным критериям приёмки. Контролируются параметры, напрямую связанные с механизмом разрушения (адгезия и водостойкость, текстура, уплотнение и пустоты, межслойное сцепление, ровность).

Назначение материала и технологии должно завершаться пакетом требований к выполнению работ и контролю качества, поскольку технологические отклонения напрямую трансформируются в преждевременное ухудшение транспортно-эксплуатационного состояния дороги [10], [11], [12].

После сетевого ранжирования диагностическое подразделение передаёт владельцу количественную ведомость: вид дефекта, координаты, площадь или протяжённость, интенсивность, показатели ровности и фотофиксацию. Владелец определяет необходимость проектных работ. Проектная организация устанавливает механизм разрушения, назначает дополнительные испытания, выбирает конструкцию, материал и технологию. Сравниваются технологические решения для ускоренного ремонта и повышения долговечности дорожных покрытий: тонкослойные износные слои, поверхностная обработка, литые смеси, регенерация (частичная или полная) [13], [14]. Выбирается вяжущее, щебень (полируемость, прочность), зерновой состав, добавки, определяются нормы расхода связующего, щебня, эмульсии, режимов укладки и уплотнения.

Такой порядок исключает необоснованное включение проектных решений в обязанности диагностического подразделения (рис. 2).



Рисунок 2 - Организационно-технологическая схема применения методики
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.6

Результаты

В качестве примера применения методики рассмотрим участок МКАД от Рублевского шоссе (61 км) до Новорижского шоссе (63 км) (рис. 3). Протяженность 2225 м, общая площадь проезжей части 100590 кв.м. Автомагистраль 6 категории (5 полосы, покрытие ЩМА-15).

 © Авторы статьи / Authors of the article

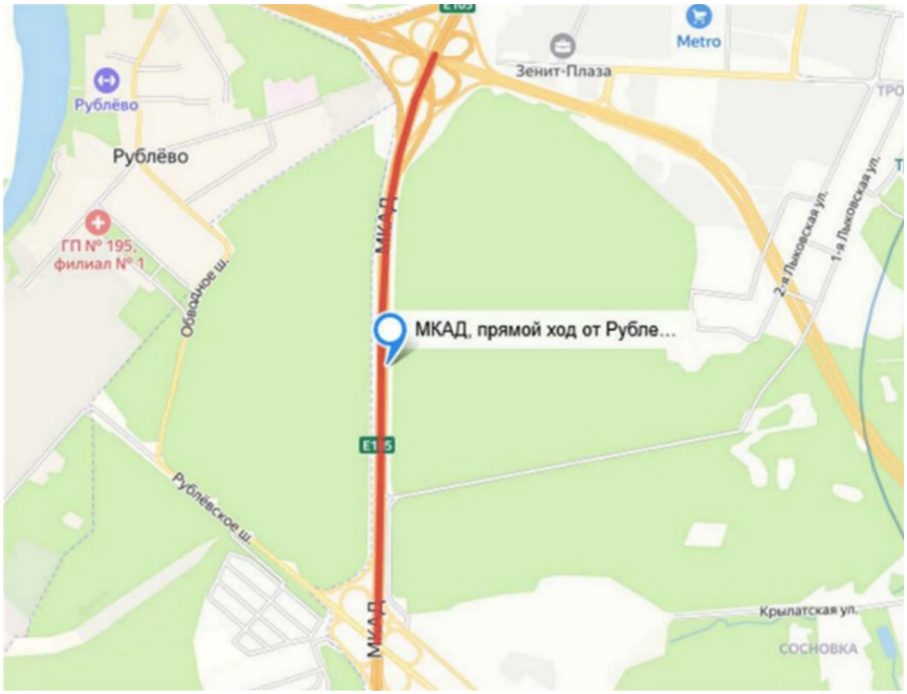


Рисунок 3 - Схема обследованного участка МКАД
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.7

После сбора исходных данных с использованием передвижных дорожных лабораторий «АДС-МАДИ» проводится классификация дефектов по данным обследования (пороговым уровням) (табл. 5):

1. Продольная ровность: международный индекс ровности IRI, м/км, по полосам движения.
2. Поперечная ровность: поперечный профиль и колейность RD, мм).
3. Плотность трещин CD, %.
4. Ремонтные карты PD, %.

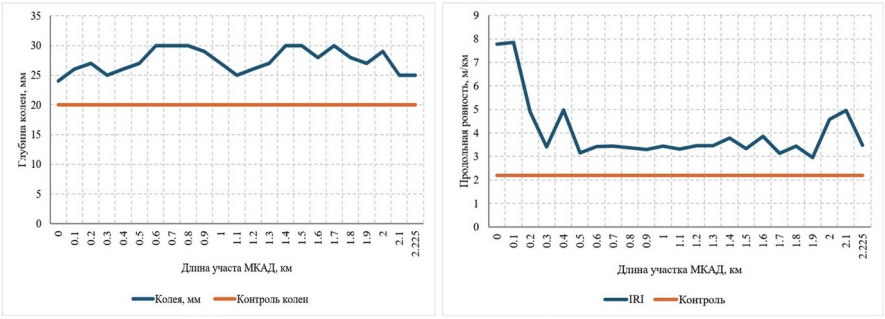
Таблица 5 - Пример порогов для управленческих решений

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.8

Показатель	Удовлетворительно	Требуется ремонт
Продольная ровность IRI, м/км	≤ 3,5	> 3,5
Поперечная ровность RD (колейность), мм	≤ 20	> 20
Плотность трещин CD, %	≤ 3	> 3
Плотность ремонтных карт PD, %	≤ 5	> 5

В ходе мониторинга были выявлены следующие основные дефекты: продольные и поперечные трещины, колея, а также выбоины. Для определения ремонтных зон была проведена камеральная обработка результатов мониторинга. В рамках проведения обследования на объектах дорожного хозяйства «МКАД, прямой ход от Рублевской до Рижской транспортной развязки» было выявлено, что на 1–2 полосе обратного направления поперечная ровность на всем протяжении превышает нормативное значение (рис. 4а). Значение продольной ровности при проезде через Новорижское шоссе (МКАД 63 км) превышает нормативное значение, среднее значение IRI= 6,11 м/км (рис. 4б).

 © Авторы статьи / Authors of the article



а) Колея б) Продольная ровность IRI

Рисунок 4 - Результаты измерений колеи и IRI на участке МКАД 61–63 км
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.9

Определена высокая плотность продольных, поперечных трещин и сеток трещин в направлении Новорижского шоссе, а также выбоины и просадки покрытия у деформационных швов при проезде через Новорижское шоссе (МКАД 63 км). Кроме того, на ПК 0+200–0+300 прямого и обратного направления и на ПК 2+000–2+225 пятой полосы прямого направления обнаружена демаркировка разметки (среднее значение продольной ровности IRI=4,61м/км и IRI=4,77 м/км, соответственно).

Далее, в соответствии с методикой, был определен доминирующий механизм разрушения:

• выраженная колейность при низкой трещиноватости и высокой нагруженности вызвана пластической деформацией и сдвигом верхнего слоя ЩМА-15 (недостаточная сдвигоустойчивость для конкретного режима), возможно усугубленная температурой укладки и уплотнения;

• сетка трещин в колее образуется из-за усталости (часто структурной);

• частые выбоины после дождей и весной образуются из-за влагопоглощения и потери адгезии;

• поперечные трещины с шагом вызваны температурным растрескиванием.

Затем были сформулированы целевые требования к слою дорожного покрытия для экспериментального участка МКАД 61–63 км и выбрана наиболее подходящая технология:

• фрезерование по колее по всем полосам в обратном направлении (типично 4–6 см по факту глубины деформации) с обеспечением ровности основания;

• укладка ЩМА-20 (как более устойчивого по структуре для зон сдвига) на полимер модифицированном вяжущем при усиленном контроле содержания волокна и мастики;

• подгрунтовка с использованием быстровысыхающей полимерной эмульсии при строгом контроле расхода;

• технология ускорения при проведении ремонта в ночное окно, непрерывной укладки захватками, уплотнением по температурному графику.

Такое решение обосновано только при подтверждении, что колея имеет преимущественно сдвиговый характер и локализована в верхнем слое. Если керны, георадар или измерения прогибов покажут деформацию нижних слоёв, устройство нового ЩМА-20 без усиления основания будет недостаточным (табл. 6).

Таблица 6 - Сравнение предлагаемого решения с существующими нормативными и технологическими подходами городской дорожной практики

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.10

Подход	Основание назначения	Типичное решение	Преимущества	Ограничения
Локальный нормативно-реактивный ремонт	Обнаружение выбоины, разрушения, просадки или другого недопустимого дефекта	Ремонт картой горячим или литым асфальтобетоном, локальное фрезерование	Быстрое восстановление безопасности, минимальное перекрытие движения	Устраняет проявление, но не обязательно механизм дефекта; при распределённой колейности возникают повторные ремонты
Сплошное фрезерование и восстановление верхнего слоя	Значительная площадь износа или колейности	Фрезерование и укладка нового слоя ЩМА-15 либо аналогичной смеси	Восстанавливает ровность на большой площади	При недостаточной сдвигоустойчивости материала или деформации нижних слоёв дефект может повториться

 © Авторы статьи / Authors of the article

Подход	Основание назначения	Типичное решение	Преимущества	Ограничения
Конструктивный ремонт	Недостаточная несущая способность, просадки, усталостная сетка, переувлажнение основания	Замена нескольких слоёв, усиление основания, восстановление водоотвода	Устраняет глубокий источник разрушения	Высокая стоимость, продолжительное ограничение движения; избыточен при деформации только верхнего слоя
Предлагаемый подход	Совместный анализ колейности, IRI, трещин, ремонтных карт, нагрузки, температуры, водоотвода и геометрии	Выбор глубины ремонта и материала по установленному механизму разрушения	Связывает дефект с причиной, свойствами материала и контролем качества, позволяет учитывать жизненный цикл	Требует кернов, диагностики глубины деформации и последующей натурной валидации долговечности

Для ускоренного ремонта в городе Москве рекомендуется сокращение «времени окна»: ночные смены, логистика смеси (термобункеры), минимизация простоев асфальтоукладчика. Целесообразно использовать быстро вводимые материалы: полимерные подгрунтовки и эмульсии с быстрым распадом, технологии для расширения температур укладки и снижения риска недоуплотнения. Использовать инфракрасный разогрев кромки, герметизацию продольных швов. При плотности ремонтных карт >3% они становятся источником неоднородности жесткости и ровности и приводят к ускоренному повторному разрушению. В этом случае необходимо переходить от ямочного к протяженному ремонту с использованием литых или специальных смесей.

Оценка жизненного цикла, согласующаяся с современными подходами к выбору момента профилактического ремонта [8], [9], [10], [11], содержит три сценария. Базовый вариант предусматривает вмешательство каждые $L = 3$ года на горизонте планирования $H = 20$ лет. Стоимость одного базового вмешательства принята равной одной условной единице, а ставка дисконтирования $r = 8\%$. Если первое вмешательство выполняется в момент $t = 0$, а ремонт точно на правой границе горизонта H не учитывается, то число повторных ремонтов определяется как:

$$N_{rep} = \text{ceil}\left(\frac{H}{L}\right) - 1 \tag{25}$$

Абсолютное снижение повторных ремонтов $\Delta N_{rep} = N_{rep,0} - N_{rep,1}$, а относительное снижение повторных ремонтов, %:

$$R_R = 100\left[1 - \frac{N_{\text{rep},1}}{N_{\text{rep},0}}\right], \tag{26}$$

где $N_{\text{rep},0}, N_{\text{rep},1}$ – число повторных ремонтов по базовому варианту и по предлагаемому варианту.

NPC (Net Present Cost) приведённая, или дисконтированная, стоимость всех затрат жизненного цикла отвечает на вопрос: «Сколько в текущей стоимости составят все ремонты за рассматриваемый период? ». NPC измеряется в рублях либо в условных денежных единицах, поэтому меньшее значение NPC экономически предпочтительнее. Результаты сравнения трех сценариев представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Результаты сценарной оценки

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.1.11

Сценарий	Интервал, лет	Всего вмешательств	Повторных ремонтов	NPC	Абсолютная экономия	Экономия NPC, %
Консервативный	3,45	6	5	3,5874	0,2995	7,7
Базовый	4,00	5	4	3,4089	0,4779	12,3
Оптимистичный	4,50	5	4	3,3739	0,5129	13,2

В консервативном сценарии межремонтный интервал возрастает с 3,00 до 3,45 года. За 20-летний период число вмешательств уменьшается с семи до шести, а число повторных ремонтов – с шести до пяти. Снижение повторных ремонтов составляет 16,7%. Приведённые затраты уменьшаются с 3,8869 до 3,5874 условной единицы, то есть на 7,7%.

 © Авторы статьи / Authors of the article

В базовом сценарии увеличение межремонтного интервала до четырёх лет при удорожании ремонта на 15% уменьшает общее число вмешательств с семи до пяти. Число повторных ремонтов снижается с шести до четырёх, или на 33,3%. Приведённые затраты составляют 3,4089 условных единиц, что на 12,3%, меньше.

В оптимистичном сценарии интервал возрастает до 4,5 года при увеличении стоимости вмешательства на 20%. Число вмешательств остаётся таким же, как в базовом сценарии предлагаемой технологии: пять вмешательств и четыре повторных ремонта. Поэтому снижение количества повторных ремонтов также равно 33,3%. Дополнительный экономический эффект возникает из-за более поздних сроков проведения ремонтов: NPC уменьшается до 3,3739 условных единиц, а экономия достигает 13,2%.

Одинаковое снижение числа повторных ремонтов в базовом и оптимистичном сценариях объясняется дискретным характером показателя N_{rep}. Увеличение интервала с 4,0 до 4,5 года не исключает ещё одно вмешательство из 20-летнего горизонта, однако сдвигает его на более поздний срок и тем самым снижает его приведённую стоимость.

Обсуждение

Предлагаемый подход к ремонту асфальтобетонного покрытия на МКАД не является принципиально новым способом укладки асфальтобетона. Его новизна заключается в алгоритме назначения ремонта: решение выбирается не только по внешнему виду дефекта, но и по установленному механизму разрушения, глубине деформации, эксплуатационной нагрузке и ожидаемым затратам жизненного цикла. Для рассмотренного участка МКАД этот подход обосновывает переход от повторного локального устранения колеи к ремонту с применением более сдвигоустойчивого материала.

Предложенная структура интегрального индекса состояния дороги позволяет учитывать не только транспортно-эксплуатационное состояние, но и условия эксплуатации. Это важно, поскольку два участка с одинаковыми дефектами, но разной интенсивностью движения должны иметь одинаковую оценку текущего технического состояния, но различный приоритет ремонта. Аналогичное разделение сетевого и проектного уровней применяется в современных системах управления покрытиями.

Заключение

Новизна работы заключается в формализации методики принятия решений для покрытий на основе ЩМА в виде последовательности этапов от инструментальной диагностики до назначения ремонта и контроля качества, ориентированной на установление доминирующего механизма разрушения, интеграции неоднородных результатов мониторинга в единую схему выбора решения.

Теоретическая значимость состоит в развитии причинно-следственного подхода к управлению состоянием дорожных покрытий, при котором объектом нормирования и контроля выступает не только внешний дефект, но и механизм разрушения и соответствующие ему требования к материалу и технологии. Методика задаёт структурированную основу для классификации дефектов на функциональные и конструктивные, для выделения доминирующего механизма разрушения по совокупности диагностических признаков и для формирования набора целевых требований к ремонтному слою.

Практическая значимость определяется возможностью применения методики дорожными службами и проектно-технологическими организациями для оперативного назначения рационального вида ремонта по данным инструментального обследования с учетом геометрии и условий эксплуатации участка, выбора материалов и технологий ремонта, снижения доли повторных ямочных ремонтов за счёт устранения причин возникновения дефекта, а не только его проявления и повышения межремонтной долговечности за счет выбора решений, согласованных с доминирующим механизмом разрушения, при минимально возможном времени ограничения движения.

Основным результатом дальнейших исследований должно стать установление количественной связи между диагностическими показателями, выявленным механизмом разрушения, выбранной технологией, фактической долговечностью и приведёнными затратами жизненного цикла, а также апробации методики на других объектах. Это создаст основу для применения разработанной методики для доказательного выбора материалов, вида вмешательства и сроков ремонта дорожных покрытий.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Adman T. Explainable AI for predicting pavement roughness under maintenance and no-maintenance scenarios / T. Adman, A. Erfani // Results in Engineering. — 2026. — Vol. 29. — DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108666.

2. Cavalli M.C. Review of advanced road materials, structures, equipment, and detection technologies / M.C. Cavalli, D. Chen, Q. Chen [et al.] // Journal of Road Engineering. — 2023. — Vol. 3. — P. 370–468. — DOI: 10.1016/j.jreng.2023.10.001.

 © Авторы статьи / Authors of the article

3. Chen W., Zheng M. Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation decision-making: A critical review and future directions. Automation in Construction. 2021. Vol. 130. — Art. 103840. — DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103840.

4. Nikitaev M.M. Determining the time and volume of supply of materials to produce asphalt concrete mixtures / M.M. Nikitaev, M.A. Brezhneva, Yu.E. Vasiliev [et al.] // 2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). — IEEE, 2024. — P. 1–6. — DOI: 10.1109/TIRVED63561.2024.10769890.

5. Nikitaev M.M. Intelligent Road surface repair planning / M.M. Nikitaev, K.E. Shugaev, P.I. Lykashchuk [et al.] // 2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). — IEEE, 2024. — P. 1–6. — DOI: 10.1109/TIRVED63561.2024.10769849.

6. Han Z. Calibration of inverted asphalt pavement rut prediction model based on full-scale accelerated pavement testing / Z. Han, A. Sha, L. Hu [et al.] // Materials. — 2023. — Vol. 16. — Art. 814. — DOI:10.3390/ma16020814.

7. Zhang R. Research progress on evaluation and prediction of degradation in service performance for asphalt pavement / R. Zhang, P. Hua, Y. Zhong [et al.] // Journal of Traffic and Transportation Engineering. — 2025. —Vol. 12. — № 4. — P. 1011–1039. — DOI: 10.1016/j.jtte.2024.11.006.

8. Krishnan A.R. A Modified CRITIC Method to Estimate the Objective Weights of Decision Criteria / A.R. Krishnan, M.V. Maznah Mat Kasim, R. Rizal Hamid, M.F. Ghazali // Symmetry. —2021. — Vol. 13. — № 6. — DOI: 10.3390/sym13060973.

9. Diakoulaki D. Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method / D. Diakoulaki, G. Mavrotas, L. Papayannakis // Computers & Operations Research. —1995. — Vol. 22. — № 7. —P. 763–770.

10. Morea F. Performance analysis of non-conventional Stone Mastic Asphalt elaborated with crumb-rubber bitumen or glass macrofibers / F. Morea, R. Nosetti, L. Gonzalez [et al.] // Construction and Building Materials. —2023. — Vol. 400. — Art. 132654. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132654.

11. Grdinić-Rakonjac M. The influence of different weighting schemes on the construction of the composite behaviour index / M. Grdinić-Rakonjac, V. Pajković // Transportation Research Procedia. —2023. —Vol. 69. —P. 85–90. —DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.148.

12. Hasan M.W. A review of the development and laboratory performance evaluation of stone matrix asphalt / M.W. Hasan, H. Noorvand, K. Kaloush // Construction and Building Materials in Transportation. —2026. —Vol. 3. — Art. 100014. —DOI: 10.1016/j.jcbmtr.2026.100014.

13. Cheolmin Baek C. Laboratory and Field Performance Evaluation of Stone Mastic Asphalt Mixtures for Sustainable Pavement / C. Cheolmin Baek, O. Ohsun Kwo, J. Lee // Sustainability. — 2024. —Vol. 16. — Art. 7840. —DOI: 10.3390/su16177840.

14. Guan X. An Improved Method for Optimizing the Timing of Preventive Maintenance of Pavement: Integrating LCA and LCCA / X. Guan, H. Zhang, X. Du [et al.] // Applied Sciences. —2023. — Vol.12. — Art. 10629. —DOI: 10.3390/app131910629.