



Анализ рисков разрушения дорожных одежд на улично-дорожной сети

А.Н. Тиратурян¹, М.Э.Р. Абделаал^{2✉}

^{1,2}Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Данная работа посвящена изучению методологических основ управления рисками разрушения нежестких дорожных одежд на автомобильных дорогах улично-дорожной сети. Авторами было отмечено, своевременное выявление риска разрушения дорожной одежды на различных этапах эксплуатации автомобильных дорог может послужить важным компонентом подсистемы мониторинга состояния дороги и дорожной инфраструктуры, которая входит в состав городских интеллектуальных транспортных систем. Основные положения статьи включают обоснование уровней, характеризующих риски разрушения дорожных одежд, и соответствующие параметры транспортно-эксплуатационного состояния, характеризующие состояния каждого из этих уровней. В частности, впервые установлена взаимосвязь между остаточным ресурсом дорожных одежд и степенью риска их разрушений. Это достижение открывает новые возможности для повышения эффективности диагностики состояния автомобильных дорог и оптимизации подходов к управлению рисками. Таким образом, данная работа представляет собой важный вклад в развитие теории и практики управления дорожными инфраструктурами, способствуя повышению безопасности и долговечности автомобильных дорог. Она закладывает основу для внедрения инновационных технологий мониторинга и поддержки принятия решений в сфере управления транспортными системами.

Ключевые слова: риск разрушения, дорожная одежда, остаточный ресурс, улично-дорожная сеть, диагностика, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Тиратурян А.Н., Абделаал М.Э.Р. Анализ рисков разрушения дорожных одежд на улично-дорожной сети // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2026. Т. 16. № 2. С. 387–399. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-2-387-399>. EDN: LPPDAH.

Original article

Analysis of the risks of destruction of road clothing on the road network

Artem N. Tiraturyan¹, Mohamed Elsayed Ragab Abdelaal^{2✉}

^{1,2}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. This work is devoted to the study of the methodological foundations of risk management for the destruction of non-rigid road clothing on highways of the road network. The authors noted that timely identification of the risk of road surface destruction at various stages of highway operation can serve as an important component of the subsystem for monitoring the condition of the road and road infrastructure, which is part of urban intellectual transport systems. The main provisions of the article include the justification of the levels characterizing the risks of destruction of road surfaces, and the corresponding parameters of the transport and operational condition characterizing the conditions of each of these levels. In particular, for the first time, the relationship between the residual resource of road clothes and the degree of risk of their destruction has been established. This achievement opens up new opportunities for improving the efficiency of diagnosing the condition of highways and optimizing approaches to risk management. Thus, this work represents an important contribution to the development of the theory and practice of road infrastructure management, contributing to improving the safety and durability of highways. It lays the foundation for the introduction of innovative monitoring technologies and decision support in the field of transport system management.

Keywords: risk of destruction, road clothing, residual resource, road network, diagnostics, intelligent transport systems

For citation: Tiraturyan A.N., Abdelaal M.E.R. Analysis of the risks of destruction of road clothing on the road network. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2026;16(2):387-399. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-2-387-399>. EDN: LPPDAH.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение безопасности и долговечности сети автомобильных дорог является одной из важнейших задач любого государства. Одним из путей достижения данной цели является внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Эти системы аккумулируют в себе как наиболее эффективные технологии управления транспортным потоком, так и управление состоянием дорожных одежд на городских дорогах. В структуре интеллектуальных транспортных систем этому модулю отводится место подсистемы мониторинга состояния дороги и дорожной инфраструктуры [1–3]. В большинстве случаев данный мониторинг предлагается осуществлять на основе методов визуальной оценки состояния покрытия. В реальных условиях только визуальной оценки недостаточно, так как степень опасности целого ряда дефектов покрытия, таких как колеи, ухудшение продольной ровности покрытия, практически невозможно оценить без проведения инструментальных измерений [4–6]. На текущий момент накоплен значительный опыт проведения инструментальных измерений фактической продольной ровности покрытия, колеи, общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды и фактических дефектов на автомобильных дорогах общего пользования федерального и регионального значения. В Российской Федерации, как и во всем мире, для этого используются мобильные диагностические лаборатории и установки ударного нагружения с падающим грузом типа FWD [7–13].

Интеграция данных, получаемых с использованием данного оборудования, в единую систему ИТС позволит в значительной степени повысить объективность и информативность, получаемую из подсистемы мониторинга состояния дороги и дорожной инфраструктуры. Условия улично-дорожной сети городов имеют свою специфику – это большое количество коммуникаций, проходящих под автомобильными дорогами, которые нередко являются причиной возникновения дефектов, а также другая структура транспортного потока и большое количество зон разгона-торможения, связанных со светофорным регулированием, и наличием остановочных комплексов [14–19].

Все это значительно ухудшает режимы функционирования дорожных одежд автомобильных дорог в городских условиях и приводит к появлению большого числа дефектов не допустимых по условиям безопасности дорожного движения. Также важнейшим элементом, связывающим состояние дорожных одежд автомобильных дорог в условиях городской улично-дорожной сети, является скорость, которую они обеспечивают для движущегося одиночного автомобиля и транспортного потока. Вопросы исследования этого влияния посвящены ряд трудов [20–28].

По итогам проведенного анализа следует отметить, что в Российской Федерации практически отсутствуют исследования, касающиеся установления влияния эксплуатационного состояния автомобильных дорог улично-дорожной сети городов и агломераций на скорость движения транспортного потока. Внесение объективных данных об эксплуатационном состоянии дорог в программные продукты для моделирования транспортного потока и последующая интеграция данных диагностики транспортно-эксплуатационного состояния дорожных одежд автомобильных дорог позволит значительно повысить качество функционирования интеллектуальных транспортных систем [29–30].

В рамках данной статьи были рассмотрены результаты фактической оценки транспортно-эксплуатационного состояния улиц и дорог г. Ростова-на-Дону и были предложены зависимости для их корректного учета при использовании подсистемы мониторинга состояния дороги и дорожной инфраструктуры.

МЕТОДЫ

В основе данного исследования лежат результаты комплексного обследования городской улично-дорожной сети г. Ростова-на-Дону с последующей обработкой и анализом полученных результатов, направленных на классификацию факторов возникновения риска разрушения дорожных конструкций и установления их влияния на снижение скорости транспортного потока.

Учитывая, что далее рассматриваются преимущественно городские дороги, необходимо отметить, что основные требования к ним принимались в соответствии с табл. 1.

Таблица 1. Соответствие городских дорог и дорог общего пользования федерального и регионального значения

Table 1. Compliance of urban roads and public roads of federal and regional significance

Категория улиц и дорог	Аналог категории дороги общего пользования	Надежность для дорог с капитальным типом дорожной одежды	Допустимая частота опасных событий
Магистральные дороги скоростного движения, магистральные улицы общегородского значения непрерывного движения	I	0,98	0,0008
Магистральные дороги регулируемого движения, магистральные улицы общегородского значения регулируемого движения, магистральные улицы районного значения	II	0,95	0,0021
Улицы и дороги местного значения: в общественно-деловых и торговых зонах, в производственных зонах, улицы в зонах жилой застройки в крупных и крупнейших городах, основные улицы сельских поселений	III	0,92	0,0035
Улицы в зонах жилой застройки (за исключением улиц крупных и крупнейших городов), проезды, улицы и дороги сельских поселений (за исключением основных улиц), велосипедные дорожки, тротуары, пешеходные улицы и площади	IV	0,90	0,0044

В зависимости от эксплуатационного состояния могут быть выделены следующие качественные уровни риска разрушения дорожной конструкции:

- оптимальный – дорожная одежда находится в нормативном состоянии, прогноз усталостной долговечности соответствует расчетному сроку службы;

- допустимый – дорожная одежда характеризуется сниженными, относительно нормативных требований, показателями состояния, разрушения возможны, но только в случае ненормативных воздействий, превышающих проектные требования;

- практически возможный – дорожная одежда характеризуется сниженными показателями, относительно нормативных значений, риск разрушения возможен в весенний и летний периоды снижения несущей способности;

- критический – дорожная одежда находится в неудовлетворительном состоянии,

присутствуют значительные разрушения и деформации.

Основными параметрами разделения уровней риска разрушения являются показатели, определение которых возможно на этапе мониторинга и диагностики состояния автомобильной дороги, а именно коэффициент прочности, продольная ровность покрытия и средний балл, по визуальной оценке, состояния покрытия. Данные показатели могут быть быстро и эффективно оценены с использованием современного высокоточного измерительного оборудования, такого как мобильные диагностические лаборатории, и установки динамического нагружения с падающим грузом типа FWD (рис. 1, 2).

Для увязки параметров эксплуатационного состояния дорожной конструкции с их лингвистическими оценками, приведенными выше, может быть использована шкала желательности Харрингтона [31].



Рис. 1. Установка динамического нагружения типа FWD
Fig. 1. Dynamic loading installation type FWD



Рис. 2. Мобильная диагностическая лаборатория
Fig. 2. Mobile diagnostic laboratory

Таблица 2. Шкала желательности Харрингтона
Table 2. Harrington's Desirability Scale

Качественный уровень	Оценка по шкале Харрингтона	Коэффициент прочности	Продольная ровность	Визуальная оценка (балл)
Оптимальный	0,8 – 1	1,2–1,5 и выше	4–5 и ниже	4,1–5
Допустимый	0,6–0,8	0,9–1,19	5,1–6,7	3–4
Практически возможный	0,37–0,6	0,56–0,89	6,8–10,8	1,9–3
Критический	0–0,37	0–0,55	свыше 10,8	0–1,9

Отдельным параметром, требующим обязательного контроля, является суммарное число приложений расчетной нагрузки, которое возможно контролировать на основе оборудования для учета интенсивности движения. Суммарное число приложений расчетной нагрузки определяется исходя из интенсивности движения, приведенной к расчетному автомобилю:

$$\sum N_{calc} = 0.7 f_{lane} K_{sum} T N_{calc} k_n, \quad (1)$$

где f_{lane} – коэффициент полосности, характеризующий процент транспортного потока, движущегося по наиболее загруженной полосе движения; K_{sum} – коэффициент суммирования; T – количество расчетных дней в году; N_{calc} – интенсивность движения в расчетных

осях на один год срока службы; k_n – коэффициент, учитывающий отклонение фактического транспортного потока от прогнозируемого.

Очевидно, что риск преждевременного разрушения конструкции дорожной одежды тем выше, чем большее количество циклов приложений расчетной нагрузки она испытала. При этом нередко случаи, когда фактическое число приложений расчетной нагрузки $\sum N_{act}$ значительно превышает проектное $\sum N_{calc}$, что приводит к быстрому исчерпанию ресурса конструкции. В этом случае остаточный ресурс определяется как:

$$\sum N_{resid.} = \sum N_{calc} - \sum N_{act} \quad (2)$$

Мониторинг фактического остаточного ресурса дорожных одежд городских автомобильных дорог может осуществляться путем установки пунктов учета интенсивности движения на автомобильных дорогах, по примеру аналогичных на дорогах общего пользования.

Учитывая, что оборудование на пунктах учета интенсивности движения ориентировано на разделение транспортного потока по геометрическим размерам (длина/высота), а при расчетах конструкций дорожных одежд ориентируются, в первую очередь, на весовые параметры и конструктивные схемы, соответствие может быть установлено следующим образом (рис. 3):

– интенсивность движения транспортных средств II категории приравнивается к интенсивности типа транспортного средства «небольшие грузовики (фургоны) и другие автомобили с прицепом и без него» категории транспортного средства В по ГОСТ 32965;

– интенсивность движения транспортных средств III категории приравнивается к интенсивности типа транспортного средства «двухосные грузовые автомобили» категории транспортного средства С по ГОСТ 32965;

– интенсивность движения транспортных средств IV категории допускается разделять в соотношении, указанном в таблице 5.5.

Категория	высота, м	осей, шт	Категория	Категория	Категория
I	≤2	2+	II	2-2,6	2+
III	2,6+	2	IV	2,6+	3+
Вид транспортного средства					
Легковые транспортные средства:		Среднегабаритные транспортные средства:		Автомобили для перевозки тяжёлых грузов и автобусы:	
Автомобили (в том числе с прицепом высотой до 2м), мотоциклы, транспортные средства, мотоциклы		Автомобили (в том числе с прицепом выше 2м),		Грузовые автомобили, автобусы и транспортные средства 2 класса с прицепом выше 2 м	

Рис. 3. Разделение транспортного потока по категориям в зависимости от конструктивных схем

Fig. 3. Division of traffic flow into categories based on design schemes

Учитывая, что суммарное число приложений расчетной нагрузки связано с проектным значением общего модуля упругости зависимостью вида:

$$E_{pr} = \sqrt{\frac{p}{600}} \cdot 98.67(\lg(\sum N_{calc}) - c) \quad (3)$$

где p – расчетное давление на покрытие в соответствии с ГОСТ 32960; $\sum N_{calc}$ – суммарное расчетное число приложений приведенной расчетной нагрузки на полосу движения за нормативный межремонтный срок службы проведения работ по капитальному ремонту; C – эмпирический параметр, равный для расчетной нагрузки: А-11,5 - 3,20. Следовательно, проектная кривая снижения фактического общего модуля упругости будет иметь вид (рис. 4). Существенная интенсификация процесса снижения

общего модуля упругости дорожной одежды соответствует 18 году эксплуатации, т. е. остаточному сроку службы шесть лет, составляющему 25 % от расчетного срока службы – 24 года.

Именно поэтому целесообразно отметить, что именно в этот период отмечается наибольший риск ухудшения состояния автомобильной дороги.

Таким образом, итоговая таблица для принятия решений о назначении уровня риска разрушения эксплуатируемой дорожной одежды имеет следующий вид (табл. 3).

В данной таблице представлен предлагаемый принцип определения уровня риска разрушения дорожной одежды исходя из ее эксплуатационного состояния и остаточного ресурса. Зеленым цветом выделена комбинация факторов, соответствующая каждому уровню риска разрушения.

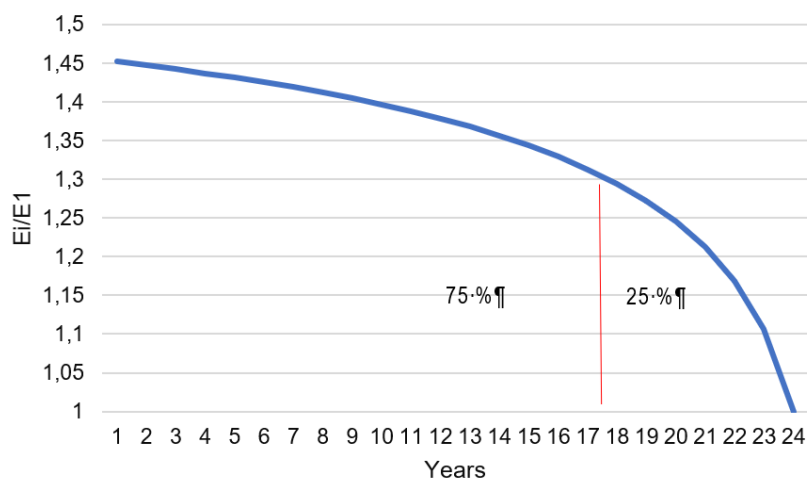


Рис. 4. Проектная кривая снижения общего модуля упругости дорожной одежды автомобильной дороги в течение 24 лет

Fig. 4. The design curve shows the decrease in the total modulus of elasticity of the road pavement over a period of 24 years

Таблица 3. Итоговая таблица для принятия решений о назначении уровня риска разрушения эксплуатируемой дорожной одежды

Table 3. The final table for making decisions on the assignment of the risk level of destruction of the road surface in use

Уровень риска	Состояние дорожной одежды	Остаточный ресурс		Коэффициент прочности дорожной одежды				Балльная оценка визуального состояния				Продольная ровность покрытия, IRI, м/км			
		>25%	<25%	>1.2	0.9-1.2	0.56-0.89	<0.55	4.1-5.0	3-4.0	1.9-2.9	0-1.8	<5	5.1-6.7	6.8-10.8	>10.8
Оптим	Норм														
Допуст	Удовл														
Предел	Удовл														
Критич	Неудовл														

Исходя из этого, отмечаются участки для постоянного мониторинга состояния дорожной конструкции, а также участки, потенциально опасные по условиям безопасности движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемая методология в качестве пилотного проекта был реализована на автомобильных дорогах, относящихся к улично-до-

рожной сети г. Ростова-на-Дону (рис. 5). Общая протяженность сети дорог 1240 км.

Всего было обследовано 33 улицы города, по каждой из которых были определены фактические показатели риска разрушения дорожной конструкции (рис. 6, 7, 8).

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

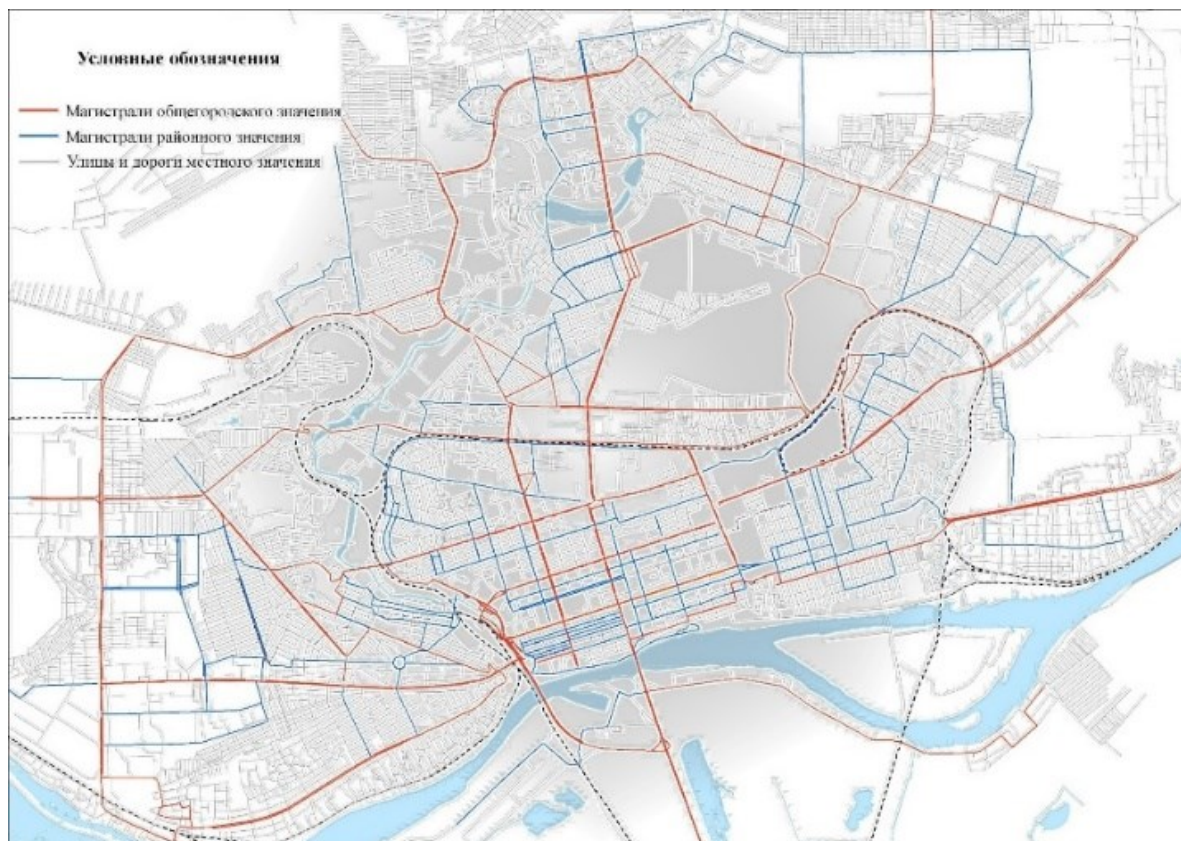


Рис. 5. Улично-дорожная сеть г. Ростова-на-Дону
Fig. 5. Street and Road Network in Rostov-on-Don

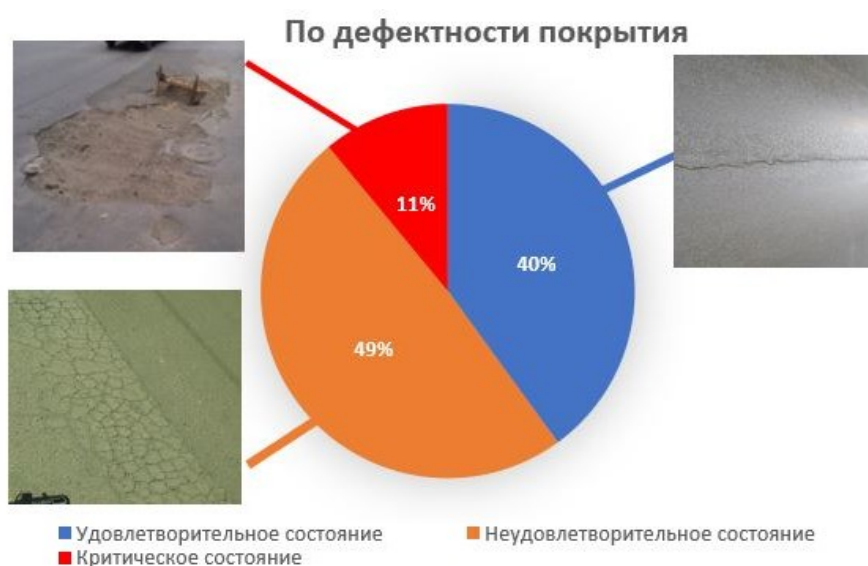


Рис. 6. Состояние автомобильных дорог г. Ростова-на-Дону
Fig. 6. Condition of Roads in Rostov-on-Don

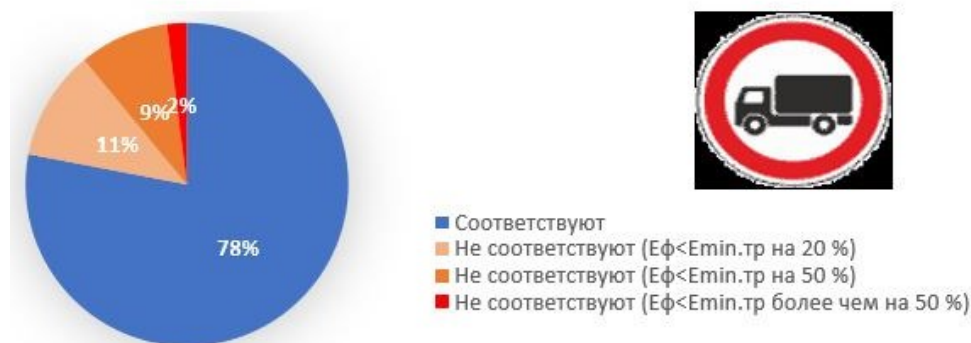


Рис. 7. Результаты оценки фактического общего модуля упругости на дорогах с запрещенным грузовым движением
Fig. 7. Results of the actual total modulus of elasticity assessment on roads with prohibited truck traffic

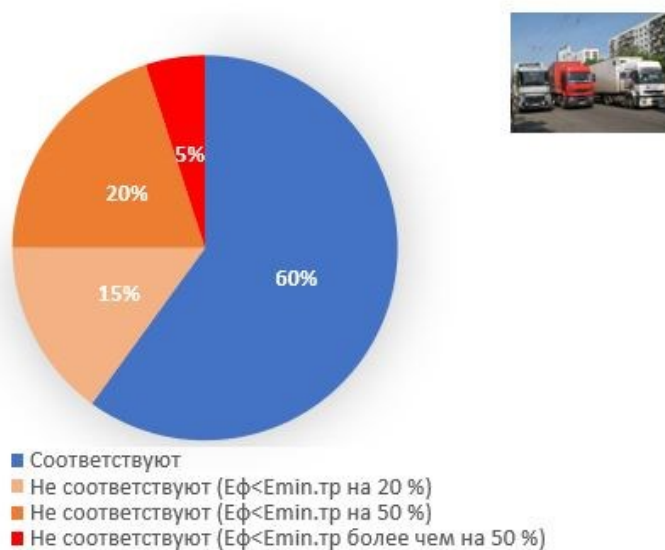


Рис. 8. Результаты оценки фактического общего модуля упругости на дорогах с запрещенным грузовым движением
Fig. 8. Results of the actual total modulus of elasticity assessment on roads with prohibited truck traffic

Таблица 4. Результаты расчета

Table 4. Calculation results

№ участка	Остаточный ресурс	Коэффициент прочности дорожной одежды	Балльная оценка визуального состояния	Продольная ровность покрытия, IRI, м/км	Риск разрушения
1	60	1,21	4,2	3,7	оптим.
2	55	1,42	4	3,6	оптим.
3	40	1,18	4,2	4,4	оптим.
4	19	0,83	3,2	5,8	критич.
5	20	0,72	2,5	4,9	критич.
6	45	1,1	4,1	4	оптим.
7	30	0,87	3,6	4,2	допуст.
8	52	0,65	3,4	5,9	допуст.
9	34	0,7	3,7	5,3	допуст.
10	45	0,8	4,2	4	допуст.
11	40	0,56	2,1	8,5	критич.

№ участка	Остаточный ресурс	Коэффициент прочности дорожной одежды	Балльная оценка визуального состояния	Продольная ровность покрытия, IRI, м/км	Риск разрушения
12	27	0,94	3,9	5,2	допуст.
13	34	1,1	4,2	4,3	оптим.
14	18	1,1	4,5	4,5	оптим.
15	30	0,5	4,2	4,4	критич.
16	37	0,9	3,7	5	допуст.
17	22	0,6	3,2	7,8	предел.
18	45	0,6	3	4,9	предел.
19	34	1,1	4,1	6,6	допуст.
20	56	0,9	3,9	5	оптим.
21	34	1,1	4,2	4,8	оптим.
22	22	0,8	4,2	5,3	допуст.
23	43	0,8	3,7	4,4	допуст.
24	4	0,9	3,5	5,6	допус.
25	45	0,8	3,5	6,2	допус.
26	33	0,77	3,9	5,8	предел.
27	36	0,92	3,7	6,6	допус.
28	19	1,2	4,1	4,8	оптим.
29	23	0,6	3,6	6,7	критич.
30	28	0,9	3,1	7,7	критич.
31	32	1,1	4,5	4,2	оптим.

Одной из основных мер по оперативной минимизации рисков разрушения дорожных одежд в условиях улично-дорожной сети является регулирование интенсивности движения и перенаправление транспортных потоков на автомобильные дороги с дорожными одедами, характеризующимися оптимальным и допустимым уровнем риска разрушения. В первую очередь, это касается движения грузового транспорта, которое должно быть запрещено на дорогах с предельным и критическим уровнем риска разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенных исследований впервые была получена методология оценки риска разрушения дорожных одежд для улично-городской сети, комплексно учитывающая влияние таких факторов, как снижение

остаточного ресурса дорожной одежды, выражаемое в процентах от начального числа приложений нагрузки, общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды, продольной ровности и наличия дефектов. Будучи реализованной в составе подсистемы ИТС мониторинга состояния дороги и дорожной инфраструктуры данная методология позволяет осуществлять рациональное и обоснованное перераспределение транспортного потока по городских дорогам, обеспечивающее как минимизацию рисков для безопасности пользователей, связанную с неудовлетворительным состоянием покрытия дорожной одежды, так и обеспечение сохранности транспортной сети до момента выполнения ремонта либо капитального ремонта участка с повышенным уровнем риска.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ajayi O.O., Bagula A.B., Maluleke H.C., Odun-Ayo I.A. Transport Inequalities and the Adoption of Intelligent Transportation Systems in Africa: A Research Landscape // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 22. P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/su132212891>.
2. Steyn W.J.vdM., Maina J.W. Guidelines for the Use of Accelerated Pavement Testing Data in Autonomous Vehicle Infrastructure Research // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2019. Vol. 6. Iss. 3. P. 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.05.001>.
3. Bellaouar S., Guerroumi M., Derhab A., Moussaoui S. Towards Heterogeneous Architectures of Hybrid Vehicular Sensor Networks for Smart Cities // Smart Cities. Computer Communications and Networks. Switzerland: Springer, 2018. P. 51–70. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76669-0_3.
4. Wamburu J., Kaguma D., Tatsubori M., Walcott-Bryant A., Bryant R.E., Weldemariam K. Roaming Nairobi Roads: Instrumenting Roads under Resource Constraints // 2017 IEEE/ACM 4th International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MOBILESoft). 2017. P. 100–109. <https://doi.org/10.1109/MO-BILESoft.2017.8>.

5. Koukounaris A.I., Stephanedes Y.J. Connected Intelligent Transportation System Model to Minimize Societal Cost of Travel in Urban Networks // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Iss. 21. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/su152115383>.
6. Al-Mansour A.I., Shokri A.A. Correlation of Pavement Distress and Roughness Measurement // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 8. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/app12083748>.
7. Dewan S.A., Smith R.E. Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses to Calculate Vehicle Operating Costs for the San Francisco Bay Area // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2002. Vol. 1816. Iss. 1. P. 65–72. <https://doi.org/10.3141/1816-08>.
8. Plati C., Loizos A., Gkyrtis K. Assessment of Modern Roadways Using Non-destructive Geophysical Surveying Techniques // *Surveys in Geophysics*. 2020. Vol. 43. P. 395–430. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09518-y>.
9. Gkyrtis K., Loizos A., Plati C. Integrating Pavement Sensing Data for Pavement Condition Evaluation // *Sensors*. 2021. Vol. 21. Iss. 9. P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/s21093104>.
10. Plati C., Georgouli K., Loizos A. Using NDT Data to Assess the Effect of Pavement Thickness Variability on Ride Quality // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 12. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs15123011>.
11. Aguiar-Moya J.P., Banerjee A., Prozzi J.A. Sensitivity Analysis of the M-E PDG Using Measured Probability Distributions of Pavement Layer Thickness // *Proceedings of the 88th Transportation Research Board Annual Meeting*. 2009. P. 09-0412.
12. Jung-Chun Lai, Jung Liu, Chien-Wei Huang The Application of Frequency-Temperature Superposition Principle for Back-Calculation of Falling Weight Deflectometer // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/app10010132>.
13. Weiguo Wang, Shishi Zhou, Qun Yang A Characterization Method for Pavement Structural Condition Assessment Based on the Distribution Parameter of the Vehicle Vibration Signal // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/app12020683>.
14. Loprencipe G., Pantuso A., Di Mascio P. Sustainable Pavement Management System in Urban Areas Considering the Vehicle Operating Costs // *Sustainability*. 2017. Vol. 9. Iss. 3. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/su9030453>.
15. Moradi M., Assaf G.J. Designing and Building an Intelligent Pavement Management System for Urban Road Networks // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Iss. 2. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/su15021157>.
16. Jajac N., Marović I., Hanák T. Decision Support for Management of Urban Transport Projects // *GRAĐEVINAR*. 2015. Vol. 67. Iss. 2. P. 131–141. <https://doi.org/10.14256/JCE.1160.2014>.
17. Campbell M., Egerstedt M., How J.P., Murray R.M. Autonomous Driving In Urban Environments: Approaches, Lessons and Challenges // *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*. 2010. Vol. 368. P. 4649–4672. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0110>.
18. Zhengyuan Yang, Yixuan Zhang, Jerry Yu, Junjie Cai, Jiebo Luo End-to-end Multi-Modal Multi-Task Vehicle Control for Self-Driving Cars with Visual Perception // *2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. 2018. P. 2289–2294. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.06734>.
19. Takumi Asada, Tran Vinh Ha, Mikiharu Arimura, Shuichi Kameyama A Novel Approach for Urban Road Network Maintenance Plans Using Spatial Autocorrelation Analysis and Roadside Conditions: A Case Study of Muroran City, Japan // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 23. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/su142316189>.
20. Yibo Zhang, Mohsen J.P. A Project-Based Sustainability Rating Tool for Pavement Maintenance // *Engineering*. 2018. Vol. 4. Iss. 2. P. 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.03.001>.
21. Hongmei Li, Fujian Ni, Qiao Dong, Yuqin Zhu Application of Analytic Hierarchy Process in Network Level Pavement Maintenance Decision-Making // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.015>.
22. Karballaezadeh N., Mohammadzadeh S.D., Moazemi D., Band S.S., Mosavi A., Reuter U. Smart Structural Health Monitoring of Flexible Pavements Using Machine Learning Methods // *Coatings*. 2020. Vol. 10. Iss. 11. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/coatings10111100>.
23. Di Graziano A., Marchetta V., Cafiso S. Structural Health Monitoring of Asphalt Pavements Using Smart Sensor Networks: A Comprehensive Review // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2020. Vol. 7. Iss. 5. P. 639–651. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.08.001>.
24. Wenjing Xue, Linbing Wang, Dong Wang, Christian Druta Pavement Health Monitoring System Based on an Embedded Sensing Network // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. Vol. 26. Iss. 10. P. 1–10. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000976](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000976).
25. Barriera M., Pouget S., Lebental B., Van Rompu J. In Situ Pavement Monitoring: A Review // *Infrastructures*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5020018>.
26. Orhan K., Nazik C., Halil C., Sunghwan K., Waid D.R. Development of Pavement Performance and Remaining Service Life Prediction Tools for Iowa Jointed Plain Concrete Pavement Systems // *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2022. Vol. 149. Iss. 1. P. 1160. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1160>.

27. Ekramnia T., Nasimifar M. Development of a Methodological Tool for Treatment Prioritization in Network-Level Pavement Management System // *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2022. Vol. 148. Iss. 1. P. 329. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000329>.
28. Das S., Siddagangaiah A.K. Multi-Objective Optimization of Imperfect Pavement Repair Policy: A Reliability-Based Approach // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2022. Vol. 2676. Iss. 7. P. 264–275. <https://doi.org/10.1177/03611981221077988>.
29. Тиратурян А.Н. Анализ диссипации энергии деформирования в дорожных одеждах с укрепленными слоями // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025. Т. 25. № 4. С. 324–336. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2184>. EDN: JZUDVV.
30. Гуанцунг Н., Тиратурян А.Н., Углова Е.В., Воробьев А.В. Исследование характеристик динамического отклика дорожных конструкций при ускоренном тестировании // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023. Т. 23. № 3. С. 241–256. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256>. EDN: XMXGGN.
31. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов металлургического производства методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.

REFERENCES

1. Ajayi O.O., Bagula A.B., Maluleke H.C., Odun-Ayo I.A. Transport Inequalities and the Adoption of Intelligent Transportation Systems in Africa: A Research Landscape. *Sustainability*. 2021;13(22):1-29. <https://doi.org/10.3390/su132212891>.
2. Steyn W.J.vdM., Maina J.W. Guidelines for the Use of Accelerated Pavement Testing Data in Autonomous Vehicle Infrastructure Research. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019;6(3):273-281. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.05.001>.
3. Bellaouar S., Guerroumi M., Derhab A., Moussaoui S. Towards Heterogeneous Architectures of Hybrid Vehicular Sensor Networks for Smart Cities. In: *Smart Cities. Computer Communications and Networks*. Switzerland: Springer, 2018. P. 51–70. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76669-0_3.
4. Wamburu J., Kaguma D., Tatsubori M., Walcott-Bryant A., Bryant R.E., Weldemariam K. Roaming Nairobi Roads: Instrumenting Roads under Resource Constraints. *2017 IEEE/ACM 4th International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MOBILESoft)*. 2017:100-109. <https://doi.org/10.1109/MOBIESoft.2017.8>.
5. Koukounaris A.I., Stephanedes Y.J. Connected Intelligent Transportation System Model to Minimize Societal Cost of Travel in Urban Networks. *Sustainability*. 2023;15(21):1-18. <https://doi.org/10.3390/su152115383>.
6. Al-Mansour A.I., Shokri A.A. Correlation of Pavement Distress and Roughness Measurement. *Applied Sciences*. 2022;12(8):1-16. <https://doi.org/10.3390/app12083748>.
7. Dewan S.A., Smith R.E. Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses to Calculate Vehicle Operating Costs for the San Francisco Bay Area. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2002;1816(1):65-72. <https://doi.org/10.3141/1816-08>.
8. Plati C., Loizos A., Gkyrtis K. Assessment of Modern Roadways Using Non-destructive Geophysical Surveying Techniques. *Surveys in Geophysics*. 2020;43:395-430. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09518-y>.
9. Gkyrtis K., Loizos A., Plati C. Integrating Pavement Sensing Data for Pavement Condition Evaluation. *Sensors*. 2021;21(9):1-21. <https://doi.org/10.3390/s21093104>.
10. Plati C., Georgouli K., Loizos A. Using NDT Data to Assess the Effect of Pavement Thickness Variability on Ride Quality. *Remote Sensing*. 2023;15(12):1-16. <https://doi.org/10.3390/rs15123011>.
11. Aguiar-Moya J.P., Banerjee A., Prozzi J.A. Sensitivity Analysis of the M-E PDG Using Measured Probability Distributions of Pavement Layer Thickness. *Proceedings of the 88th Transportation Research Board Annual Meeting*. 2009:09-0412.
12. Jung-Chun Lai, Jung Liu, Chien-Wei Huang The Application of Frequency-Temperature Superposition Principle for Back-Calculation of Falling Weight Deflectometer. *Applied Sciences*. 2020;10(1):1-25. <https://doi.org/10.3390/app10010132>.
13. Weiguo Wang, Shishi Zhou, Qun Yang A Characterization Method for Pavement Structural Condition Assessment Based on the Distribution Parameter of the Vehicle Vibration Signal. *Applied Sciences*. 2022;12(2):1-13. <https://doi.org/10.3390/app12020683>.
14. Loprencipe G., Pantuso A., Di Mascio P. Sustainable Pavement Management System in Urban Areas Considering the Vehicle Operating Costs. *Sustainability*. 2017;9(3):1-16. <https://doi.org/10.3390/su9030453>.
15. Moradi M., Assaf G.J. Designing and Building an Intelligent Pavement Management System for Urban Road Networks. *Sustainability*. 2023;15(2):1-17. <https://doi.org/10.3390/su15021157>.
16. Jajac N., Marović I., Hanák T. Decision Support for Management of Urban Transport Projects. *GRAĐEVINAR*. 2015;67(2):131-141. <https://doi.org/10.14256/JCE.1160.2014>.

17. Campbell M., Egerstedt M., How J.P., Murray R.M. Autonomous Driving In Urban Environments: Approaches, Lessons and Challenges. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*. 2010;368:4649-4672. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0110>.
18. Zhengyuan Yang, Yixuan Zhang, Jerry Yu, Junjie Cai, Jiebo Luo End-to-end Multi-Modal Multi-Task Vehicle Control for Self-Driving Cars with Visual Perception. *24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. 2018:2289-2294. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.06734>.
19. Takumi Asada, Tran Vinh Ha, Mikiharu Arimura, Shuichi Kameyama A Novel Approach for Urban Road Network Maintenance Plans Using Spatial Autocorrelation Analysis and Roadside Conditions: A Case Study of Muroran City, Japan. *Sustainability*. 2022;14(23):1-17. <https://doi.org/10.3390/su142316189>.
20. Yibo Zhang, Mohsen J.P. A Project-Based Sustainability Rating Tool for Pavement Maintenance. *Engineering*. 2018;4(2):200-208. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.03.001>.
21. Hongmei Li, Fujian Ni, Qiao Dong, Yuqin Zhu Application of Analytic Hierarchy Process in Network Level Pavement Maintenance Decision-Making. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2018;11(4):345-354. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.015>.
22. Karballaezadeh N., Mohammadzadeh S.D., Moazemi D., Band S.S., Mosavi A., Reuter U. Smart Structural Health Monitoring of Flexible Pavements Using Machine Learning Methods. *Coatings*. 2020;10(11):1-18. <https://doi.org/10.3390/coatings10111100>.
23. Di Graziano A., Marchetta V., Cafiso S. Structural Health Monitoring of Asphalt Pavements Using Smart Sensor Networks: A Comprehensive Review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2020;7(5):639-651. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.08.001>.
24. Wenjing Xue, Linbing Wang, Dong Wang, Christian Druta Pavement Health Monitoring System Based on an Embedded Sensing Network. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014;26(10):1-10. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000976](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000976).
25. Barriera M., Pouget S., Lebental B., Van Rompu J. In Situ Pavement Monitoring: A Review. *Infrastructures*. 2020;5(2):1-20. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5020018>.
26. Orhan K., Nazik C., Halil C., Sunghwan K., Waid D.R. Development of Pavement Performance and Remaining Service Life Prediction Tools for Iowa Jointed Plain Concrete Pavement Systems. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2022;149(1):1160. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1160>.
27. Ekramnia T., Nasimifar M. Development of a Methodological Tool for Treatment Prioritization in Network-Level Pavement Management System. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2022;148(1):329. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000329>.
28. Das S., Siddagangaiah A.K. Multi-Objective Optimization of Imperfect Pavement Repair Policy: A Reliability-Based Approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2022;2676(7):264-275. <https://doi.org/10.1177/03611981221077988>.
29. Tiraturyan A.N. Analysis of Deformation Energy Dissipation in Reinforced-Layer Pavement. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):324-336. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2184>. EDN: JZUDVV.
30. Guangcong N., Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Vorobev A.V. Study on Dynamic Response Characteristics of Different Asphalt Pavement Structures Based on ALF Test. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):241-256. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256>. EDN: XMXGNN.
31. Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimization of Metallurgical Production Processes Using Experimental Design Methods*. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 304 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Тиратурян Артем Николаевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры автомобильных дорог,
исполняющий обязанности декана
дорожно-транспортного факультета,
Донской государственной технической
университет,
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
Россия,
e-mail: Tiraturjan@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5912-1235>
Author ID: 803524

Information about the authors

Artem N. Tiraturyan,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department
of Highways,
Acting Dean of the Faculty
of Road Transport,
Don State Technical University,
1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003,
Russia,
e-mail: Tiraturjan@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5912-1235>
Author ID: 803524

Абделаал Мохамед Эльсайед Рагаб,
аспирант, начальник отдела
интерактивных сервисов,
Донской государственный технический
университет,
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
Россия,
✉ e-mail: Mabdelaal@donstu.ru
<https://orcid.org/0009-0007-8772-5758>

Mohamed Elsayed Ragab Abdelaal,
Postgraduate Student,
Head of the Interactive
Services Department,
Don State Technical University,
1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003,
Russia,
✉ e-mail: Mabdelaal@donstu.ru
<https://orcid.org/0009-0007-8772-5758>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and
approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.01.2026.
Одобрена после рецензирования 02.03.2026.
Принята к публикации 05.03.2026.

Information about the article

The article was submitted 30.01.2026.
Approved after reviewing 02.03.2026.
Accepted for publication 05.03.2026.