

Достоверность реализованной предиктивной аналитики состояния железнодорожного пути в ОАО «РЖД», направления по совершенствованию предиктивного анализа

Т.Н. Асалханова✉, А.А. Осолков

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Резюме

Пропускная способность дорог Восточного полигона системно увеличивается: в 2013 г. она составляла 97,8 млн т, в 2024 г. – 180 млн т, однако требования отправителей грузов заставляют повышать этот показатель. Его планируемый уровень к 2032 г. – 270 млн т. Ежегодное расширение объемов грузовых перевозок на Восточном полигоне приводит к росту затрат на ремонт и текущее содержание путевой инфраструктуры, обеспечивать которое становится все сложнее, так как для реализации стратегии повышения грузопотока оптимизируются не только межпоездные интервалы, но и время технологических «окон». В связи с этим руководителям работ хозяйства пути недопустимо совершать ошибки при их планировании, в том числе в определении приоритетов устранения неисправностей. Но без понимания фактического состояния пути, а также достоверных ожидаемых последствий, т.е. полного спектра предиктивного анализа, выполнить задачу перехода на обслуживание железнодорожного пути по фактическому состоянию не представляется возможным. Компанией АО «Фирма Твема» по заказу ОАО «РЖД» создана информационно-аналитическая система диагностики и мониторинга железнодорожной инфраструктуры, которая является частью Единой корпоративной системы управления инфраструктурой. В ней был разработан раздел предиктивного анализа состояния геометрических параметров железнодорожного пути, однако полученные данные спустя несколько месяцев в большинстве случаев не нашли подтверждения. Реализованная методика предиктивного анализа пока что не дает точных результатов, поскольку не охватывает весь спектр трех областей анализа, кроме того, не учитывается многофакторная система деградационного процесса состояния пути. Предиктивный анализ – сложный процесс диагностики как текущего состояния путевой инфраструктуры, так и предполагаемых последствий. Используя только математические модели прогнозирования неисправностей без применения расчетов взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, невозможно получить достоверные сведения, поскольку не все повреждения имеют ретроспективные ряды деградационного процесса, а также есть ситуации, где дефекты еще отсутствуют, но в ближайшее время сформируются по причине конструктивных характеристик пути и условий эксплуатации. В предиктивном анализе важна консолидация логических ситуаций, связанных с особенностями влияния геометрических параметров пути на возникающие силовые перегрузки под воздействием подвижного состава с целью дальнейшего снижения силового фактора и продления ресурса железнодорожного пути. Совершенствование предиктивного анализа на данный момент является актуальным направлением.

Ключевые слова

предиктивный анализ, деградация состояния пути, информационные системы, комплексная диагностика и мониторинг, железнодорожная инфраструктура, Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой, конструктивные параметры пути, области предиктивной аналитики, железнодорожный путь, факторы деградационного процесса, мобильные средства диагностики

Для цитирования

Асалханова Т.Н. Достоверность реализованной предиктивной аналитики состояния железнодорожного пути в ОАО «РЖД», направления по совершенствованию предиктивного анализа / Т.Н. Асалханова, А.А. Осолков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 84–99. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).84-99.

Информация о статье

поступила в редакцию: 18.06.2025 г.; поступила после рецензирования: 24.06.2025 г.; принята к публикации: 25.06.2025 г.

Reliability of the implemented predictive analytics of the state of the railway track in JSC Russian Railways, directions for improving the predictive analysis

T.N. Asalkhanova✉, A.A. Oskolkov

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉asalk-tatyana@yandex.ru

Abstract

The capacity of the Eastern polygon of roads is systematically increasing: in 2013 it amounted to 97,8 million tons and increased to 180 million tons in 2024, however the requirements of the consignors of goods force to increase the capacity limits. By 2032, the goal is to further increase the throughput capacity to the milestone of 270 million tons. The annual growth in freight traffic on the Eastern Polygon increases the cost of repairs and maintenance of the track infrastructure. It is becoming increasingly difficult to maintain the track infrastructure, since in order to implement a strategy to increase cargo flow, not only inter-train intervals are optimized, but also the time of technological «windows», therefore, it is unacceptable for managers of track maintenance to make mistakes when planning work, including those in prioritizing troubleshooting. But without understanding the actual condition of the track, as well as reliable predicted consequences, it is not possible to perform the task of switching to railway track maintenance based on the actual condition of the full range of predictive analysis. JSC «Tvema Company» commissioned by JSC «Russian Railways» has created an information and analytical system for diagnostics and monitoring of railway infrastructure, which is part of a Unified Corporate Infrastructure Management System. It has developed a section of predictive analysis of the geometric parameters of the railway track, but the results obtained after a few months in most cases have not been confirmed. The implemented predictive analysis technique does not yet provide accurate results, since it does not cover the full range of the three areas of analysis, and the multifactorial system of the degradation process of the track condition is also not taken into account. Predictive analysis is a complex process of analyzing both the current state of the track infrastructure and the expected consequences. Using only mathematical models for predicting malfunctions without using calculations of the interaction of rolling stock and railway track, it is impossible to obtain reliable data, since not all malfunctions have retrospective series of the degradation process, and there are also many situations where malfunctions are still absent, but will form in the near future due to the structural features of the track and operating conditions. In predictive analysis, it is important to consolidate logical situations related to the peculiarities of the influence of geometric parameters of the track on the resulting power overloads under the influence of rolling stock in order to further reduce the power factor and prolong the life of the railway track. The direction of improving predictive analysis is currently an urgent topic.

Keywords

predictive analysis, degradation of the track, information systems, complex diagnostics and monitoring, railway infrastructure, Unified corporate automated infrastructure management system, design parameters of the track, areas of predictive analytics, railway track, factors of the degradation process, mobile diagnostic tools

For citation

Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Dostovernost' realizovannoi prediktivnoi analitiki sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti v OAO «RZhD», napravleniya po sovershenstvovaniyu prediktivnogo analiza [Reliability of the implemented predictive analytics of the state of the railway track in JSC Russian Railways, directions for improving the predictive analysis]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 84–99. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).84-99.

Article Info

Received: June 18, 2025; Revised: June 24, 2025; Accepted: June 25, 2025.

Введение

Правительством России перед холдингом ОАО «РЖД» поставлена задача дальнейшего увеличения пропускной способности на дорогах Восточного полигона: практически в 1,5 раза к 2032 г. Ежегодный рост объемов грузовых перевозок увеличивает затраты на ремонт и текущее содержание путевой инфраструктуры [1–3].

Тенденции современных подходов к обслуживанию железнодорожного пути сводятся к совершенствованию системы планирования работ на основе фактического и прогнозного состояния пути. Применяемые мобильные средства диагностики (МСД) при проверке состояния пути на текущий момент не позволяют определить объективное состояние железнодорожного пути, так как для этого важно учитывать не только последние измеренные парамет-

ры, но и анализировать ретроспективный ряд предыдущих измерений, а также учитывать силовое взаимодействие подвижного состава с железнодорожным путем – т.е. выполнять предиктивный анализ для определения фактического и прогнозного состояния пути.

Суть предиктивного анализа заключается в ранжировании неисправностей по их объективному уровню деградационного развития. Идеализированное решение задачи сводится к разработке методики предиктивного анализа, которая позволит выделить из множества выявленных дефектов (в том числе потенциальных) не только неотложные, первоочередные и плановые, как это определяют современные средства диагностики, распределяя неисправности геометрических параметров рельсовой колеи по степеням, но и установить, какие из первоочередных и плановых повреждений должны быть

устранены как неотложные, какие плановые неисправности должны быть устранены в первоочередном порядке, а также в какой срок каждая индивидуальная поломка может перейти в более критичную степень [4, 5].

Высокая интенсивность развития данных дефектов рельсового хозяйства по четному пути свидетельствует не только о конструктивно сложном плане и профиле путевой инфраструктуры, но и интенсивном процессе грузовых перевозок с невыполнением проектного скоростного режима и возникновением существенных контактных напряжений в системе «колесо – рельс» [6–8].

Цель данной статьи заключается в проведении проверки результатов достоверности методики предиктивного анализа, реализованного в Единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой – модуль «Система диагностики и мониторинга инфраструктуры (ЕК АСУИ СДМИ), и определении тенденции дальнейшего развития исследовательской работы по совершенствованию подходов предиктивной аналитики.

Постановка проблемы

В настоящее время вопросам предиктивного анализа и прогнозирования состояния железнодорожного пути посвящено много научных статей, разработан программный комплекс ОАО «РЖД» ЕК АСУИ СДМИ, но при этом нет четкой методики определения прогнозного состояния элементов верхнего строения пути (ВСП) при воздействии тяжеловесного подвижного состава и влияния скоростного движения на путь. Таким образом, в статье рассматривается проблема в отношении достоверности данных, получаемых в ЕК АСУИ СДМИ, и предложен вариант усовершенствования методики предиктивного анализа железнодорожного пути.

С целью решения поставленной проблемы и проведения анализа формируемых результатов предиктивной аналитики в системе принят участок четного железнодорожного пути одной из дистанций пути – самый сложно преодолеваемый железнодорожный рубеж Транссибирской магистрали на Восточно-Сибирской железной дороге. Данный участок проходит по сложному горно-перевальному ландшафту с постоянными уклонами, где протяженность железнодорожного пути с уклона-

ми менее 10 % составляет 82 км, с уклонами от 10–18 ‰ – 48 км, более 18 ‰ – 3,6 км, при этом в совокупности со сложным профилем участок усугублен большим количеством кривых малого радиуса: $R < 350$ м – 117 шт.; $350 < R < 600$ м – 80 шт.; $600 < R < 800$ м – 40 шт. Характерными расстройствами исследуемого участка являются высокая интенсивность бокового износа рельсов и наличие контактно-усталостных трещин на поверхности катания неупорной (перешивочной) рельсовой нити [3].

Просадки и перекосы железнодорожного пути в большинстве случаев формируются по нижней рельсовой нити. Эти деформации возникают вследствие неравномерного распределения усилия колес на упорный и неупорный (нижний) рельс при проезде кривых участков пути со скоростью ниже скорости равновесного движения (рис. 1) [9–11]. По анализу данных о количестве выявленных неисправностей геометрических параметров рельсовой колеи, сформированных в системе с октября 2024 г. по март 2025 г. видна закономерность стабилизации пути при замерзании элементов рельсовых креплений, балластного слоя и земляного полотна в период отрицательных температур, при этом наблюдается существенное уменьшение числа неисправностей с прогрессирующим развитием. Снижение количества развития дефектов в значительной степени происходит не только в профиле пути (перекос – П, просадка – Пр), но и стабилизируется ширина рельсовой колеи, а также отступления в плане пути (Р – отступления пути в плане по рельсовым нитям железнодорожного пути).

Если рассматривать выявленные неисправности в долевого сегменте, то 76 % из них будут профильными, где преобладают П (47 %) и Пр (29 %); третье место занимают Р – 16 %; на четверной позиции уширения рельсовой колеи (УШ) – 7 %; на пятой сужения (Суж) – 1 % (рис. 2).

На рис. 3 показана динамика развития неисправностей в профиле пути с осени 2024 г. по весну 2025 г., где наблюдается существенное сокращение неисправностей при замерзании пути.

В табл. 1 систематизированы данные о прогнозных отступлениях геометрии рельсовой колеи с октября 2024 г. по март 2025 г. из раздела ведомости предиктивного анализа ЕК АСУИ СДМИ (далее – Методика).

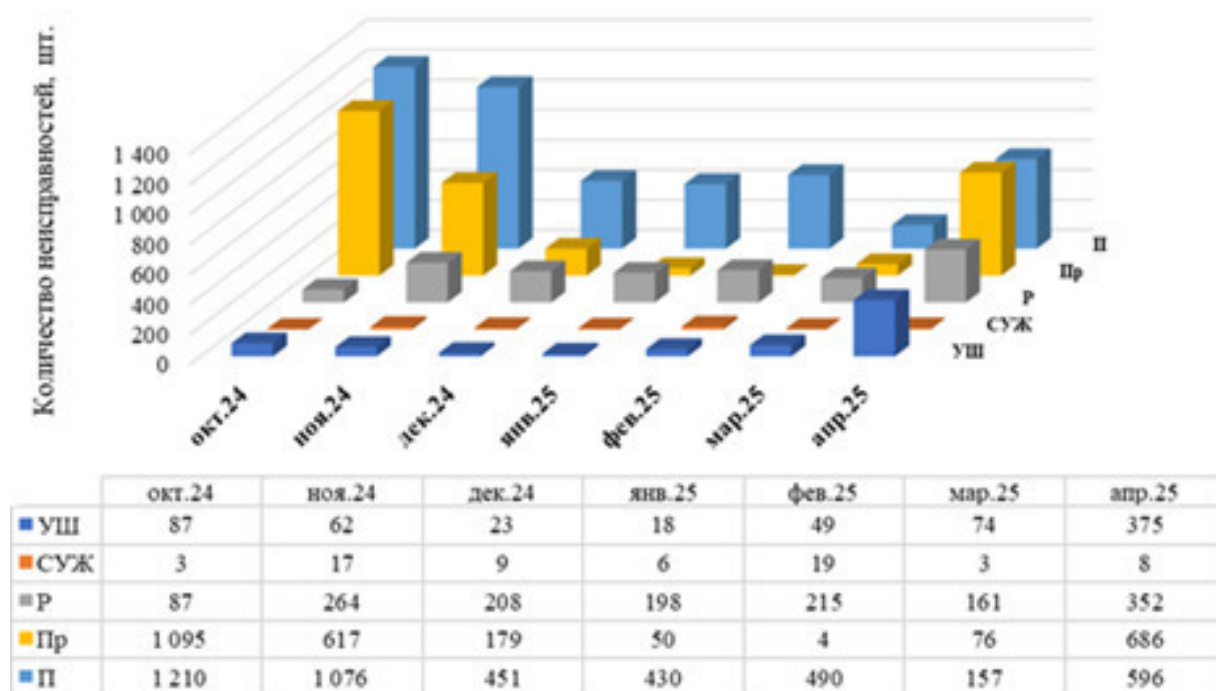


Рис. 1. Динамика прогрессирующих неисправностей пути с октября 2024 г. по апрель 2025 г.

Fig. 1. Dynamics of progressive track faults from October 2024 to April 2025

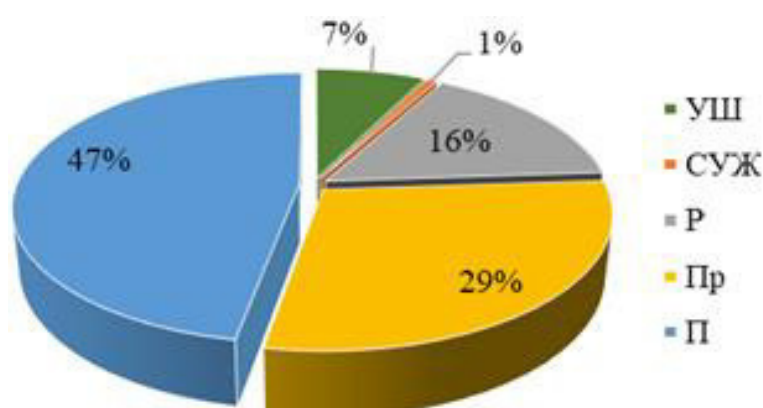


Рис. 2. Распределение выявленных неисправностей в долях

Fig. 2. Distribution of detected malfunctions in percentages

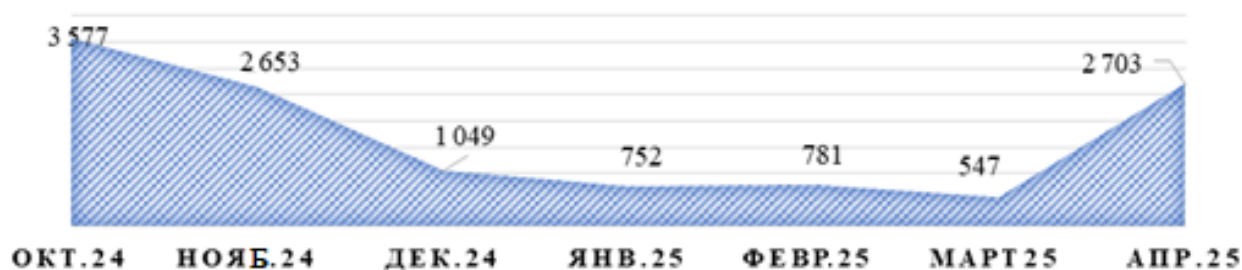


Рис. 3. Динамика неисправностей в профиле пути второй степени

Fig. 3. Dynamics of failures in the track profile in the second degree

Таблица 1. Сопоставление количества прогнозируемых данных выявленным неисправностям
Table 1. Correlation of the number of forecasted data identified malfunctions

Месяц Month	Прогноз повышения степени неисправностей через 3 месяца Forecast of an increase in the severity of malfunctions within 3 months				Фактически выявлено неисправностей Actually detected faults			
	2 степень degree	2к3	3 степень	4 степень	2 степень	2к3	3 степень	4 степень
окт. 24	1 718	565	197	48	2 860	362	81	9
нояб. 24	305	417	125	17	2 033	190	15	1
дек. 24	119	137	45	9	1 071	50	10	1
январ. 25	186	262	80	10	642	48	3	1
февр. 25	99	143	36	26	866	60	12	3
март 25	634	161	63	34	469	29	3	0
апр. 25	216	256	141	63	2 016	182	65	26

Согласно представленному анализу (см. табл. 1), просматривается зависимость уменьшения количества прогнозируемых в трехмесячный период неисправностей с прогнозным повышением степени критичности при наступлении периода отрицательных температур. Однако реализованный в системе алгоритм предиктивного анализа и математические модели спрогнозировали с октября 2024 г. на январь 2025 г. появление 48 неисправностей в профиле пути 4-й степени, 197 неисправностей – 3-й степени, но фактически в январе 2025 г. МСД выявили по одной неисправности 4-й и 3-й степеней, т.е. методика предиктивного анализа, реализованная в системе, не учитывает сезонность и климатические особенности территории, а работает по принципу прямого математического прогноза.

По анализу данных в ЕК АСУИ СДМИ можно сделать следующий вывод: по методике в системе рассчитывается самопроизвольное понижение степени неисправности пути (рис. 4). Например, в апреле 2025 г. по фактическим данным МСД на горноперевальном участке пути за исследуемый период выявлены просадки пути 4-й степени критичности с амплитудой 26–33 мм, а в системе прогноз развития неисправности на три месяца показал самовосстановление железнодорожного пути с уменьшением амплитуды неисправности до уровня 3-й и 2-й близкой к 3-й степени (2к3) неисправности. Этот случай также подтверждает отсутствие в методике функции учета сезонности и логического алгоритма определения

деградации пути с наступления потепления, когда при оттаивании балластного слоя неисправности в профиле пути неспособны к самостранению.

Также не совсем понятна ситуация прогноза при оценке перекосов пути в осенне-зимний и весенний периоды года и на других сложных участках пути с наличием большого количества кривых малого радиуса, когда ежемесячно МСД выявлялись перекосы пути со степенью 2к3. Неисправности находились в стабилизированной фазе, но, согласно методике, в системе неоднократно прогнозировалась 4-я степень. Однако повреждения МСД не подтвердились с января по март 2025 г., а в апреле 2025 г. была зафиксирована уже 3-я степень неисправности в профиле пути.

По данным системы, методика не выявляет факт многократно повторяющихся неисправностей из месяца в месяц при отсутствии устранения, что приводит к дальнейшей деградации в условиях сезонного оттаивания железнодорожного пути, и вновь МСД зафиксирована неисправность 2к3, которая в апреле по факту деградировала до 3-й степени (рис. 5).

Локальные места с многократными повторами неисправностей не носят массовый характер, но эти проблемные очаги путевых отступлений возможно выявить именно с помощью предиктивного анализа при учете сезонности, а также геофизических процессов, что позволит спрогнозировать неисправность с высокой точностью.

В исследовании использовался метод экспоненциального сглаживания с параметром высокой вероятности [12, 13]. По результатам

Координата	НЕИСП.	Амплитуда	Длина, м	Степень	Координата	Амплитуда	Длина, м	Степень	Путь	Дата
853	Пр.пр	30	6	4	853	22	5	3	0	апр.25
858	Пр.лв	32	4	4	858	24	5	3	0	апр.25
836	Пр.лв	28	5	4	836	27	5	4	0	апр.25
982	Пр.лв	31	4	4	982	23	5	3	0	апр.25
982	Пр.пр	31	4	4	982	24	5	3	0	апр.25
16	Пр.лв	26	5	4	16	22	6	3	0	апр.25
16	Пр.пр	28	5	4	16	22	5	3	0	апр.25
42	Пр.лв	32	3	4	42	20	5	2к3	0	апр.25
42	Пр.пр	33	3	4	42	22	5	3	0	апр.25
242	Пр.лв	28	4	4	242	19	5	2к3	0	апр.25
433	Пр.пр	26	4	4	433	19	5	2к3	0	апр.25

Рис. 4. Прогноз понижения степени выявленных в профиле пути неисправностей

Fig. 4. Forecast of the decrease in the degree of identified faults in the profile track

Координата	НЕИСП.	Амплитуда	Длина, м	Степень	Координата	Амплитуда	Длина, м	Степень	Путь	Дата
622	П	17	18	3	622	34	17	4	1	фев.25
623	П	17	18	3	624	19	16	3	0	апр.25
625	П*	16	19	2к3	625	20	18	3	1	окт.24
625	П*	16	18	2к3	625	26	18	4	1	ноя.24
626	П*	15	18	2к3	626	25	18	4	1	дек.24
627	П*	17	18	3	628	20	18	3	0	апр.24
627	П*	15	18	2к3	627	25	18	4	1	ноя.24
629	П*	16	18	2к3	629	28	18	4	1	дек.24
630	П	16	18	2к3	630	18	16	3	1	апр.25
631	П*	15	18	2к3	632	25	18	4	1	окт.24
634	П*	14	16	2к3	634	25	16	4	1	январ.25
634	П	16	16	2к3	634	27	16	4	1	фев.25
639	П	15	18	2к3	639	25	18	4	1	мар.25

Рис. 5. Многократно повторяющиеся неисправности пути в сочетании с сезонностью

Fig. 5. Repeated track failures combined with seasonality

расчетов определена динамичная кривая развития перегиба пути, где амплитуда неисправности в мае составит 23 мм, а по данным методики, заложенной в системе, 23 мм ожидается только через два месяца (в июле 2025 г.), что может привести к неэффективным мерам по текущему обслуживанию участков пути и неоправданным затратам.

На рис. 6 отражен построенный прогноз развития многократно повторяющейся неисправности по «Ведомости прогнозируемых отступлений геометрии рельсовой колеи» в системе. При этом, анализируя полноту данных в системе, установлено отсутствие учета дополнительного прохода МСД, где в октябре 2024 г. обнаружена 3-я степень перегиба пути, и в отчетности сформировано выявленное значение неисправности при следующем контрольном проходе. Для построения максимально точного прогноза важно использовать все имеющиеся полученные данные МСД.

Согласно проведенным расчетам экстраполяции развития неисправности, зафиксированной по данным от нижнего экстремума, и дальнейшего развития дефекта с постоянным увеличением амплитуды до последнего развития неисправности, превышающего последующие, определено, что прогнозируемая методикой амплитуда перегиба пути 23 мм в июле 2025 г. соответствует линейному тренду. На рис. 7 он представлен в виде зеленой линии. Эта методика не смогла бы определить рост неисправности до величины 18 мм в апреле 2025 г. без учета параметра сезонности (оранжевый тренд).

Предлагаемый авторами метод экспоненциального сглаживания более актуален, так как он придает большее значение самым последним показателям ретроспективного ряда, поэтому в первом приближении близок к реальной ситуации, так как после периода отрицательных температур наступает оттаивание балластного слоя



Рис. 6. Прогноз развития неисправности методом экспоненциального сглаживания высокой вероятности развития перекоса пути

Fig. 6. Fault development forecast using exponential smoothing: high probability of track skew development

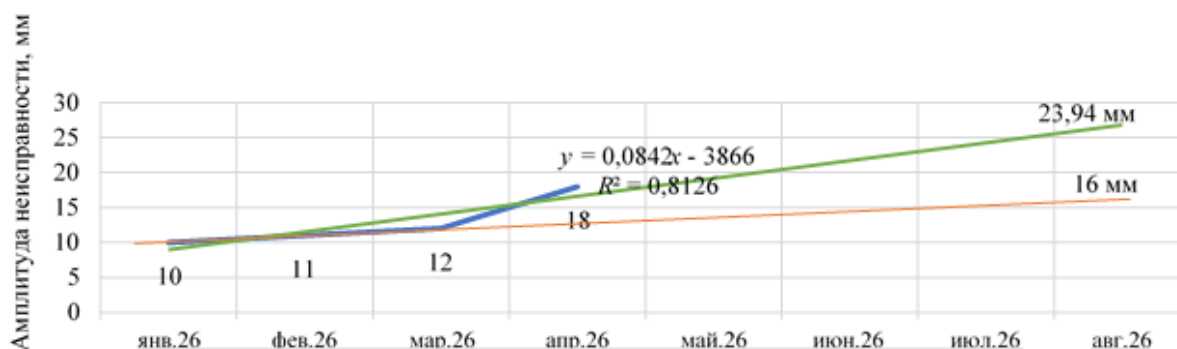


Рис. 7. Линейная экстраполяция данных положительного развития перекоса пути

Fig. 7. Linear extrapolation of data on the positive development of track deviation

и происходит наиболее динамичное развитие неисправностей в профиле пути (рис. 8).

Прогнозные значения тренда линейной экстраполяции рассчитывается по (1):

$$y = a + b \cdot x, \quad (1)$$

где y – прогнозируемое значение; a – начальное значение; b – коэффициент наклона; x – интервал времени.

Коэффициент наклона b можно определить как частное суммарной разницы экстремумов графика положительного развития (Δy_{i+}) и отрицательного (Δy_{i-}) на интервал времени x по (2):

$$b = \frac{(\Delta y_{i+} + \Delta y_{i-})}{x}. \quad (2)$$

С целью определения наиболее эффективной методики прогнозирования рассмотрим

диаграмму (см. рис. 8). Построен прогноз линейной экстраполяции (ЕК АСУИ СДМИ, первый метод) и экспоненциального сглаживания (второй метод), из которого видно, что в результате весенней оттайки балласта в апреле 2025 г. произошло резкое увеличение амплитуды перекоса пути с 12 до 18 мм, в итоге линейный тренд, применяемый в системе, дал некорректный прогноз развития неисправности (+1 мм), т.е. 13 мм, когда привязка высокой вероятности второй методики при учете прошлогодних данных дала наиболее близкий результат – 16,23 мм.

Последний результат основывается на прогнозировании будущего по данным прошлого, где вес последних измерений приоритетнее [12].

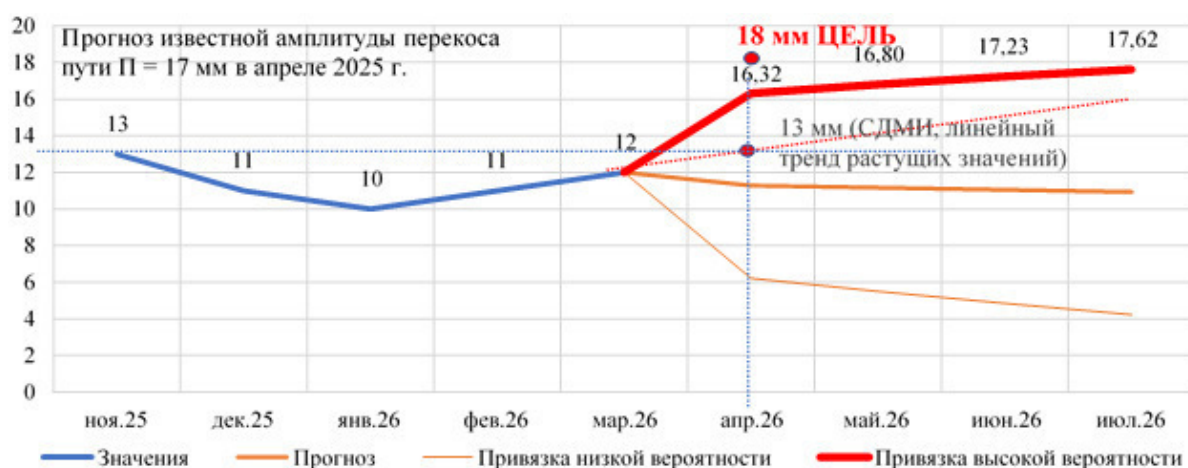


Рис. 8. Сравнение прогноза известной величины перекоса пути 18 мм в апреле 2025 г.

Fig. 8. Comparison of the forecast of the known value of track twist 18 mm in April 2025

Прогнозные значения по методу экспоненциального сглаживания рассчитываются по (3):

$$y_{t+1} = (p \cdot y_t + (1-p) \cdot U_t) \cdot (P \cdot S) \cdot S_{SP-1}, \quad (3)$$

где p – параметр сглаживания; y_{t+1} – прогнозируемый показатель; U_t – экспоненциально взвешенная средняя для периода предшествующего прогнозу; y_t – фактическое значение исследуемого показателя за период, предшествующий прогнозу; $t+1$ – прогнозный период; S – сезонная компонента, рассчитанная отдельно с помощью простого экспоненциального сглаживания; P – количество прогнозных периодов вперед; S_{SP-1} – коэффициент сезонности за этот же период в последнем сезоне (для мультипликативной модели, когда сезонная компонента представляет собой долю трендового значения).

Проведенный анализ демонстрирует важность совершенствования применяемой методики предиктивного анализа, в том числе заложенного в методику системы [14].

Направления совершенствования предиктивного анализа

В результате исследования и расчетов можно сделать вывод, что реализованная в ЕК АСУИ СДМИ прогнозная аналитика не способна полностью охватить все ситуации предсказания последствий и сроков их наступления.

Разделение предиктивной аналитики на области является важным моментом для обеспечения эффективного перехода на обслуживание объектов инфраструктуры по реальному техническому состоянию и быстрому реагиро-

ванию на изменения состояния объектов инфраструктуры [13].

Важно в текущих сложных условиях оптимизации расходов ОАО «РЖД» добиться уменьшения отказов и рисков, связанных с железнодорожным путем, повышения ресурса железнодорожной инфраструктуры, снизить количество внеплановых ремонтов, прогнозировать и контролировать сроки жизненного цикла элементов инфраструктуры, при этом соблюдать все условия: выполнение технологических процессов обслуживания объектов инфраструктуры, безопасность перевозочного процесса, установленные скорости движения подвижного состава.

В табл. 2 представлена предлагаемая формализация разграничения областей предиктивной аналитики, которые позволят принимать эффективные решения на различных стадиях бизнес-процессов по текущему содержанию железнодорожного пути. Выбраны следующие области предиктивной аналитики: конструктивная, оперативная и плановые, которые способны охватить практически весь спектр рассматриваемых деградационных качеств путейой инфраструктуры.

Важной областью является конструктивная, где на основе силового воздействия возможно определить точечные напряженные состояния в элементах ВСП и выполнить сопоставления с допускаемыми величинами. При этом результаты будут формализовать не проблемные элементы, где превышены допуски, а последствия, к которым приведет конкретное отклонение [8].

Таблица 2. Три области реализации предиктивной аналитики

Table 2. Three areas of implementation of predictive analytics

Показатель Indicator	Конструктивная Constructive	Оперативная Operational	Плановая Planned
Назначение области Assignment of the area	Определяет потенциальное появление неисправностей на основе силового взаимодействия подвижного состава на конструкцию железнодорожного пути. Оценка физических процессов взаимодействия является основой предиктивной системы, ориентированной на повышении ресурса эксплуатации железнодорожного пути Identifies potential faults based on the force interaction between rolling stock and the track structure. Assessing the physical processes of interaction forms the basis of a predictive system aimed at increasing the operational life of the track.	Работает на основе анализа сочетаний неисправностей, а также прогнозирования ранее выявленных неисправностей пути и выполняет оценку резкой фазы развития [1] неисправности пути для точного определения, какие плановые неисправности, выявленные средствами диагностики должны быть устранены в неотложном или первоочередном режиме, а также какие из первоочередных неисправностей должны быть устранены в неотложном режиме It operates on the basis of the analysis of combinations of faults, as well as the prediction of previously identified faults of the track and carries out an assessment of the acute phase of development [1] of the fault of the track to accurately determine which planned faults identified by diagnostic tools should be eliminated in an urgent or priority mode, as well as which of the priority faults should be eliminated in an urgent mode	Определяет неисправности контролируемого длительного развития. Работает на анализе исторических данных с применением методов экстраполяционного прогнозирования на длительную перспективу, где определяются фазы развития [1] системно развивающихся неисправностей, а также неисправностей, находящихся в фазе стабилизации [1]. Много общего с ЕК АСУИ СДМИ – предиктивный анализ, нужна доработка метода Identifies faults with controlled long-term development. It works by analyzing historical data using long-term extrapolation forecasting methods, which identifies the development phases [1] of systemically developing faults, as well as faults in the stabilization phase [1]. It has much in common with the EC ASMS SDMI – predictive analysis; the method requires further refinement.
Функциональное описание Functional description	Фактические (на начальной стадии) и потенциальные неисправности могут быть определены при оценке комплексного взаимодействия конструкции железнодорожного пути, метеофизических факторов, характеристик подвижного состава и реализуемых режимов движения грузовых поездов. Появление	Практически у каждой неисправности пути есть история деградационного процесса. Базируясь на хронологическом ряде данных образования неисправности при использовании экстраполяционного прогнозирования с приоритетом последнего измерения, а также с учетом сезонности, состояния балласта, кон-	Одним из частных примеров данной области является прогноз бокового износа или прогноз износа металлических частей стрелочного перевода. Развития уширения рельсовой колеи при нарастании бокового износа, дефектности скреплений и шпал. Деградация неисправностей в профиле пути при

	ние неисправностей в данной области практически не поддается классическим методам прогнозирования по причине недостаточного количества данных. Однако при анализе силового воздействия на верхнее строение пути реально определить последствия, основанные на законах физики Actual (initial stage) and potential faults can be identified by assessing the complex interactions between track structure, meteorological factors, rolling stock characteristics, and freight train operating modes. Fault occurrence in this area is virtually impossible to predict using classical forecasting methods due to insufficient data. However, by analyzing the force impact on the track superstructure, it is possible to determine the consequences based on the laws of physics.	струкции рельсошпальной решетки, искусственных сооружений и метеофизических процессов, возможно точно определить критичность и резкую фазу развития неисправности [1] Almost every track fault has a history of degradation. Based on a chronological series of fault formation data using extrapolative forecasting with priority given to the most recent measurement, as well as taking into account seasonality, ballast condition, track grid design, artificial structures, and meteorological processes, it is possible to accurately determine the criticality and acute phase of fault development [1].	содержании стыков, дефектности рельсов, состоянии балласта и искусственных сооружений. В ряде случаев устранять нужно не саму неисправность, а ее взаимосвязанную причину One specific example in this area is the prediction of lateral wear or wear of metal parts of a turnout. The development of track gauge widening with increasing lateral wear, defective fastenings, and sleepers. The degradation of track profile defects due to joint maintenance, rail defects, ballast condition, and artificial structures. In some cases, it's not the defect itself that needs to be addressed, but its underlying cause.
Важность Importance	Без принятия своевременных мероприятий обслуживания пути появление связанных критических неисправностей будет неизбежно Without timely implementation of track maintenance measures, the occurrence of related critical faults will be inevitable.	Неисправности планового характера могут быть опаснее первоочередных и некоторых неотложных при сочетании ряда факторов Planned malfunctions can be more dangerous than priority and some urgent ones when a number of factors combine	Не все неисправности пути планового характера имеют системную деградацию, большая часть в тренде стабилизации [1] Not all planned track failures are systemic degradation, most are in a stabilizing trend [1]
Цель Target	Рекомендации производства работ для повышения ресурса пути Recommendations for the execution of works to increase the resource of the track	Рациональная расстановка приоритетов на основе фазы динамического развития [1] Rational prioritization based on the dynamic development phase [1]	Рационализация отбора планирования устранения конкретных неисправностей и причин их образования Rationalization of the selection of planning for eliminating specific malfunctions and the reasons for their occurrence

Выполнить классический экстраполяционный прогноз или сложный многофакторный прогноз состояния конструктивной проблемы фактического состояния пути далеко не просто, так как не всегда имеется достаточно данных в ретроспективе локального места пути. Поэтому конструктивная область предиктивного анализа на основе силового взаимодействия элементов ВСП и подвижного состава является крайне важным вопросом для текущего содержания пути и обеспечения безопасности движения.

Не менее важна область оперативного предиктивного анализа, где важно определить для каждой выявленной неисправности пути динамику деградации (важна фаза резкого развития и определение опасных сочетаний). Важным понятием здесь является то, что современные средства диагностики до сих пор не выполняют анализ скорости развития неисправности, где первоочередная неисправность может быть определена как наименее опасная, чем плановая. В данном смысловом контексте актуальной задачей оперативной области является определение реального приоритета плановых и первоочередных неисправностей пути с учетом скорости их развития и отягчающих сочетаний. Примером может быть ситуация резкого появления угла в плане «Р» 2-й степени при наличии нулевого стыкового зазора (0 мм) либо зазора между шпалой и балластом.

Плановая область предиктивного анализа может быть построена при использовании экстраполяционного прогноза хронологического ряда ее развития при обязательном учете сезонности, предыдущих состояний и последней фазы деградационного процесса, а также жизненного цикла элементов железнодорожного пути [13, 15, 16].

В данной области важно определить фазу системно развивающейся неисправности с дальнейшим планированием сроков устранения и установления неисправности пути, находившийся в фазе стабилизации, как наименее приоритетных задач для ликвидации. Частным примером может являться системный рост уширения рельсовой колеи, возникающий в результате нарастания бокового износа рельсов и износа элементов креплений. В качестве второго примера может быть системное развитие профильной неисправности при ненадле-

жащем содержании дренажных искусственных сооружений или их отсутствии. При этом для качественного устранения дефекта важно убрать не только саму неисправность, но и причину ее системного развития.

Представленные области предиктивной аналитики только частично находят реализацию в системе, в частности в разделах:

- предиктивного анализа (благодаря прогнозу последнего положительного развития неисправности определена рекомендация приоритетного планирования устранения конкретных неисправностей пути (плановая область));
- прогнозирования бокового износа рельсов (плановая область);
- определения состояния рельсовых плетей бесстыкового пути в виде комплексного коэффициента работает эффективно и затрагивает все три области – конструктивную, оперативную и плановую.

Но для получения высокой достоверности работы предиктивного анализа требуется обязательно учитывать факторы, которые оказывают влияние на развитие неисправностей пути, а также, где неисправности объединены в три стадии формализации: неисправности в плане (Уш, Суж, Р); неисправности в профиле пути (Пр, П, У); дефектность рельсового хозяйства.

Данные формализации разнесены по факторам связанного воздействия: силового воздействия; конструктивный фактор; эксплуатации; внешнего влияния; косвенный фактор [8, 17–22].

Фактор силового воздействия определяет причины, оказывающие динамическое воздействие на развитие неисправности железнодорожного пути подвижным составом.

Конструктивный фактор определяет причину влияния текущей конструкции пути, в том числе геометрических параметров рельсовой колеи, на развитие рассматриваемой неисправности (влияние возвышения упорной рельсовой нити пути на деградационный процесс развития неисправностей) [11, 17].

Фактор эксплуатации характеризует влияние характеристик подвижного состава и режимов его движения на динамику развития неисправности пути [3, 8, 21] (примером может быть не реализация установленных скоростей движения поездов, а также повышение осевых нагрузок).

Фактор внешнего воздействия определяет влияние на рост амплитуды неисправности метеофизических процессов, сезонности и барьерных мест.

Косвенный фактор формализует зависимость развития неисправности пути от косвен-

ных причин (например, как влияют дефекты в профиле пути на неисправность в плане и другие варианты).

Рассмотрим подробнее факторы, влияющие на деградационный процесс состояния пути (табл. 3).

Таблица 3. Факторы, влияющие на деградацию состояния пути в трех формализациях
Table 3. Factors affecting the degradation of the track condition in three formalizations

Фактор Factor	Неисправности в плане пути (Уш, Суж, Р) Defects in the route plan	Неисправности в профиле пути (П, Пр, У) Faults in the track profile	Дефектность рельсового хозяйства Defectiveness of the rail facilities
Силовое воздействие Forceful impact	Дефектность и износ элементов рельсовых креплений. Износ резиновых амортизационных прокладок. Негодность шпал. Боковой износ рельсов. Температурное состояние бесстыкового пути. Состояние балластной призмы и полноты шпальных ящиков Defectiveness and wear of rail fastening elements. Wear of rubber shock absorber pads. The sleepers are unusable. Lateral wear of rails. Temperature state of continuous welded rails. Condition of the ballast prism and fullness of sleeper boxes	Состояние рельсовых стыков. Состояние балластного слоя (уровень загрязнения). Наличие дефектностей рельсов, повышающих ударное воздействие. Повышенное давление на упорную или нижнюю рельсовую нить пути Condition of rail joints. Ballast layer condition (pollution level). The presence of defects in the rails that increase the impact force. Increased pressure on the thrust or bottom rail of the track	Ненормативное содержание рельсовых стыков. Содержание подуклонки рельсов. Несвоевременная шлифовка и обточка накатов металлических элементов стрелочных переводов. Сварные стыки низкого качества. Лubrфикация рельсов. Факторы эксплуатации Non-standard maintenance of rail joints. Rail inclination maintenance. Untimely grinding and turning of the knurling of metal elements of turnouts. Welded joints are of poor quality. Lubrication of rails. Operating factors
Конструктивный Constructive	Норма зашивки ширины рельсовой колеи. Возвышение упорной рельсовой нити пути. Эпюра шпал. Тип шпал. Ширина плеча балластной призмы. Толщина балластного слоя Standard for covering the track gauge width. Elevation of the stop rail track. Diagram of sleepers. Type of sleepers. Shoulder width of the ballast prism. Ballast layer thickness	Несоответствие возвышения упорной нити кривого участка пути реализуемым скоростям грузовых поездов Discrepancy between the elevation of the stop thread of a curved section of track and the speeds of freight trains	Норма зашивки ширины рельсовой колеи. Возвышение упорной рельсовой нити пути. Подуклонка рельсов Standard for covering the track gauge width. Elevation of the stop rail track. Rail inclination

Фактор Factor	Неисправности в плане пути (Уш, Суж, Р) Defects in the route plan	Неисправности в профиле пути (П, Пр, У) Faults in the track profile	Дефектность рельсового хозяйства Defectiveness of the rail facilities
Эксплуатации Exploitation	Участки торможения. Нереализация установленных скоростей. Непогашенное ускорение. Повышение осевой нагрузки. Рекуперативное торможение Braking areas. Failure to achieve established speeds. Unquenched acceleration. Increased axle load. Regenerative braking	Нереализация установленных скоростей. Непогашенное ускорение. Повышение осевой нагрузки Failure to achieve established speeds. Unquenched acceleration. Increasing axle load	Нереализация установленных скоростей. Непогашенное ускорение. Повышение осевой нагрузки. Боксование. Экстренное торможение Failure to achieve established speeds. Unquenched acceleration. Increased axle load. Boxing. Emergency braking
Внешнего влияния External influence	Сезонность. Метеофизические процессы. Барьерные места. Предупреждение с ограничением скорости Seasonality. Meteophysical processes. Barrier places. Speed limit warning	Сезонность. Метеофизические процессы. Наличие заводей или болот вблизи железнодорожных путей Seasonality. Meteophysical processes. The presence of backwaters or swamps near railway tracks	Наличие налипшего песка и другого загрязнения на лубрикатор в кривых участках пути. Наличие дефектов обода колеса подвижного состава. Низкие температуры. Состояние балластной призмы на разрыв The presence of sand and other contaminants adhering to the lubricant in curved sections of the track. Presence of defects in the rim of a rolling stock wheel. Low temperatures. Ballast prism tensile strength
Косвенный Indirect	Неисправности в профиле кривых участков пути. Состояние рельсовых стыков. Лубрикация рельсов. Подуклонка рельсов в кривых малого радиуса более 1/60 Defects in the profile of curved track sections. Condition of rail joints. Lubrication of rails. Rail inclination in small radius curves more than 1/60	Наличие и состояние дренажных и водоотводных искусственных сооружений The presence and condition of drainage and water drainage artificial structures	Уширение рельсовой колеи. Наличие шпалы под стыком. Просадка в зоне стыка Widening of the track gauge. The presence of a sleeper under the joint. Subsidence in the joint area

Выводы

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1. На данный момент не создано объективной системы предиктивной аналитики элементов ВСП, в том числе в современных средствах диагностики и ЕК АСУИ СДМИ.

2. В методике системы не оценивается полный спектр воздействия на пути некоторых факторов: не учитываются фазы развития неисправности.

3. Нет учета сезонности и других важных моментов, без которых не получится добиться существенного результата в диагностике фак-

тического и перспективного состояния железнодорожной инфраструктуры.

Кроме того, для получения максимально точной информации о состоянии железнодорожного пути необходимо развивать методику предиктивного анализа для определения не только прогнозируемых ситуаций при учете внешнего воздействия, фактической конструкции пути, режимов эксплуатации, но и реально-го текущего состояния пути.

Предложенные факторы и области предиктивного анализа являются основой в реализации наиболее совершенной методики точного определения состояния пути, позволяющей перейти на первую ступень обслуживания инфраструктуры по фактическому состоянию.

Дальнейшим развитием предиктивной аналитики должна стать система логических решений определения не только самой неисправности, но и причины ее возникновения, где важными акцентами данной тематики является процесс расчета и оценки сочетаний состояния связанных конструктивных элементов путевой инфраструктуры, а также ее содержание и обслуживание с целью максимального снижения силового воздействия подвижного состава на ВСП, в частности уменьшение угла набегания колеса на рельс, применение новых подходов в лубрикации рельсов [6, 10, 23], оптимизация нормы зашивки ширины рельсовой колеи и возвышения упорной нити под реализуемые условия эксплуатации, подбор оптимальных параметров подуклонки

рельсов для уменьшения контактных напряжений в системе «колесо – рельс» и другие варианты увеличения ресурса железнодорожного пути в условиях системного нарастания грузопотока и увеличения осевых нагрузок.

Заключение

Существующие методики определения предиктивных состояний путевой инфраструктуры, в том числе реализованные в ЕК АСУИ СДМИ, несовершенны. Применение математического прогноза, ограниченного обработкой ретроспективных данных состояния каждой неисправности, не позволит сформировать объективный результат фактического состояния пути. В основе предиктивного анализа должна быть заложена логическая физико-математическая модель, разделенная на области, фазы развития неисправностей, где основой анализа является многофакторная система определения точного состояния пути, учитывающая условия эксплуатации, контактные напряжения, расчетные интенсивности износа путевой инфраструктуры в комплексе.

Работа над усовершенствованием методики предиктивного анализа является актуальной темой настоящего времени. Исследовательская деятельность будет продолжена в системе многофакторного прогнозирования и влияния конструктивных параметров пути на характер деградационного процесса путевой инфраструктуры [13, 15, 16].

Список литературы

1. Восточный полигон – Трансиб и БАМ. Итоги развития в 2013–2024 гг. // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19721> (дата обращения 11.06.2025).
2. Тарабрин В.Ф., Юрченко Е.В., Лохач А.В. ЕК АСУИ СДМИ – цифровая платформа для предиктивного анализа и управления состоянием железнодорожной инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 6. С. 25–28.
3. Бурнаев Е.В. Алгоритмические основы предиктивной аналитики в задачах индустриального проектирования // Информационные процессы. 2019. Т. 19. № 3. С. 271–283.
4. Тарасов Е.М., Бредун И.С. Влияние предиктивной аналитики на восстанавливаемость систем // Наука и образование транспорту. 2023. № 1. С. 243–245.
5. Айдульдинов Д.М. Планирование ремонта с применением предиктивной аналитики // Научный потенциал-2023 : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 2023. С. 164–168.
6. Певзнер В.О., Белоцветова О.Ю., Потапов А.В. Результаты наблюдений по оценке влияния эксплуатационных факторов на боковой износ рельсов // Вестн. науч.-исследоват. ин-та ж.-д. трансп. 2016. Т. 75. № 4. С. 242–247.
7. Параметры колеи и износ рельсов в кривых / Н.И. Карпушенко, А.П. Козлов, И.А. Котова и др. // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 11. С. 7–9.
8. Исследование напряжений в контакте колесо – рельс // Железные дороги мира. 2011. № 1. С. 54–58.
9. Взаимодействие колес и рельсов в кривых участках / Н.И. Карпушенко, И.А. Котова, Ю.Н. Ликратов и др. // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 6. С. 2–5.
10. Краснов О.Г., Акашев М.Г., Никонова Н.М. Влияние лубрикации на силовую нагруженность внутреннего рельса // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 1. С. 6–9.
11. Цихалевский И.С., Нафиков Г.-А.М., Стаценко К.А. Вписывание тележки подвижного состава в кривую. Екатеринбург : УрГУПС, 2017. 47 с.

12. Поздняков А.С. Применение метода Хольта-Винтерса при анализе и прогнозировании динамики временных рядов // Проблемы организации и управления на транспорте : материалы межвуз. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2016. Вып. 11 (230). С. 57–64.
13. Бурнаев Е.В. Модели, методы и алгоритмы предиктивной аналитики на многообразиях данных : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2021. 498 с.
14. Ларченко Ю.Г., Котляров В.П. Построение уравнения предиктивной аналитики производительности труда промышленного предприятия // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2022. № 7 (63). С. 69–76.
15. Тимофеев Е.Н., Севостьянов А.А. Перспективы цифровой трансформации путевого хозяйства // Наука и молодежь XXI века : материалы регионал. форума. Новосибирск, 2022. Ч. 1. С. 143–147.
16. Ведение рельсового хозяйства на основе предиктивных методов / В.М. Ермаков, С.А. Васильева, О.А. Янович и др. // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 12. С. 2–7.
17. Ивашов В.А., Орлов М.В., Сирина Н.Ф. Расчет и выбор норм проектирования, ремонта и технического обслуживания тележек грузовых вагонов из условия уменьшения интенсивности износа гребней колес. Екатеринбург : УрГАПС, 1997. 19 с.
18. Оптимизация взаимодействия в системе «колесо – рельс» / С.А. Виноградов, А.В. Сухов, А.А. Лунин и др. // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 37–45.
19. Чечельницкий И.А. Оптимизация жизненного цикла системы «колесо – рельс» // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 3. С. 99–108.
20. Марков Д.П. Трибология железнодорожной тележки // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2018. Т. 77. № 4. С. 230–240.
21. Севостьянова Л.Л. Устройство, проектирование и расчеты рельсовой колеи. Ч. 1. Хабаровск : ДВГУПС, 2007. 47 с.
22. Ромен Ю.С. Факторы, обуславливающие процессы взаимодействия в системе колесо – рельс при движении поездов в кривых // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2015. № 1. С. 17–26.
23. Царёв Н.С. Прогнозирование износа железнодорожного рельса // Вестник транспорта Поволжья. 2024. № 3 (105). С. 91–101.

References

1. Vostochnyi poligon – Transsib i BAM. Itogi razvitiya v 2013–2024 gg. (elektronnyi resurs) [The eastern polygon is Transsib and Baikal-Amur Railway. Development results in 2013-2024 (electronic resource)]. Available at: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19721> (Accessed June 11, 2025).
2. Tarabrin V.F., Yurchenko E.V., Lokhach A.V. EK ASUI SDMI — tsifrovaya platforma dlya prediktivnogo analiza i upravleniya sostoyaniem zheleznodorozhnoi infrastruktury [Integrated diagnostics and Monitoring System of railway infrastructure as part of a Unified corporate automated Infrastructure Management System is a digital platform for predictive analysis and management of the state of railway infrastructure]. Put' i putevye khozyaistvo [Track and track facilities], 2022, no 6, pp. 25–28.
3. Burnaev E.V. Algoritmicheskie osnovy prediktivnoi analitiki v zadachakh industrial'nogo proektirovaniya [Algorithmic foundations of predictive analytics in industrial design tasks]. *Informatsionnye protsessy* [Information processes], 2019, Vol. 19, no 3, pp. 271–283.
4. Tarasov E.M., Bredun I.S. Vliyanie prediktivnoi analitiki na vosstanavliyaemost' sistem [The influence of predictive analytics on the recoverability of systems]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and Education for Transport], 2023, no 1, pp. 243–245.
5. Aidul'dinov D.M. Planirovanie remonta s primeneniem prediktivnoi analitiki [Planning repairs using predictive analytics]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnyi potentsial-2023»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Scientific potential-2023»]. Petrozavodsk, 2023, pp. 164–168.
6. Pevzner V.O., Belotsvetova O.Yu., Potapov A.V. Rezul'taty nablyudenií po otsenke vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov na bokovoi iznos rel'sov [The results of observations on the assessment of the influence of operational factors on lateral wear of rails]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2016, Vol. 75, no 4, pp. 242–247.
7. Karpushchenko N.I., Kozlov A.P., Kotova I.A., Antereikin E.S. Parametry kolei i iznos rel'sov v krivyykh [Gauge parameters and rail wear in curves]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2007, no 11, pp. 7–9.
8. Issledovanie napryazhenii v kontakte koleso – rel's [Investigation of stresses in wheel – rail contact]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world], 2011, no 1, pp. 54–58.
9. Karpushchenko N.I., Kotova I.A., Likratov Yu.N., Surovin P.G., Antereikin E.S. Vzaimodeistvie koles i rel'sov v krivyykh uchastkakh [Interaction of wheels and rails in curved sections]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2008, no 6, pp. 2–5.
10. Krasnov O.G., Akashev M.G., Nikonova N.M. Vliyanie lubrikatsii na silovuyu nagruzhennost' vnutrennego rel'sa [The influence of lubrication on the power load of the inner rail]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2024, no 1, pp. 6–9.
11. Tsikhalevskii I.S., Nafikov G.-A.M., Statsenko K.A. Vpisyvanie telezhki podvizhnogo sostava v krivuyu [Fitting a rolling stock trolley into a curve]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2017. 47 p.
12. Pozdnyakov A.S. Primenenie metoda Khol'ta-Vintersa pri analize i prognozirovanii dinamiki vremennykh ryadov [Application of the Holt-Winters method in the analysis and forecasting of time series dynamics]. *Materialy mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy organizatsii i upravleniya na transporte»* [Proceedings of the interuniversity scientific and practical conference «Problems of organization and management in transport»]. Ekaterinburg, 2016, iss. 11 (230), pp. 57–64.
13. Burnaev E.V. Modeli, metody i algoritmy prediktivnoi analitiki na mnogoobraziyakh dannykh [Models, methods and algorithms of predictive analytics on data manifolds]. Doctor's theses. Moscow, 2021. 498 p.

14. Larchenko Yu.G., Kotlyarov V.P. Postroenie uravneniya prediktivnoi analitiki proizvoditel'nosti truda promyshlennogo predpriyatiya [Construction of the equation of predictive analytics of labor productivity of an industrial enterprise]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University], 2022, no 7 (63), pp. 69–76.
15. Timofeev E.N., Sevost'yanov A.A. Perspektivy tsifrovoy transformatsii putevogo khozyaistva [Prospects for digital transformation of the track economy]. *Materialy regional'nogo foruma «Nauka i molodezh' XXI veka»* [Materials of the regional forum «Science and youth of the XXI century»]. Novosibirsk, 2022, part 1, pp. 143–147.
16. Ermakov V.M., Vasil'eva S.A., Yanovich O.A., Egorov M.A. Vedenie rel'sovogo khozyaistva na osnove prediktivnykh metodov [Maintaining a track facilities based on predictive methods]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2022, no 12, pp. 2–7.
17. Ivashov V.A., Orlov M.V., Sirina N.F. Raschet i vybor norm proektirovaniya, remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya telezhek gruzovykh vagonov iz usloviya umen'sheniya intensivnosti iznosa grebnei koles [Calculation and selection of standards for the design, repair and maintenance of trolleys of freight wagons based on the condition of reducing the wear rate of wheel ridges]. Ekaterinburg: UrGAPS Publ., 1997. 19 p.
18. Vinogradov S.A., Sukhov A.V., Lunin A.A., Suslov O.A., Nazarov I.V., Zagranichnik K.L. Optimizatsiya vzaimodeistviya v sisteme «koleso – rel's» [Optimization of interaction in the «wheel – rail» system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no 3, pp. 37–45.
19. Chechel'nitskii I.A. Optimizatsiya zhiznennogo tsikla sistemy «koleso – rel's» [Optimization of the life cycle of the wheel–rail system]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2020, no 3, pp. 99–108.
20. Markov D.P. Tribologiya zheleznodorozhnoi telezhki [Tribology of a railway trolley]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2018, Vol. 77, no 4, pp. 230–240.
21. Sevost'yanova L.L. Ustroystvo, proektirovanie i raschety rel'sovoi kolei. Ch. 1 [Device, design and calculations of the rail track. Part 1]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2007. 47 p.
22. Romen Yu.S. Faktory, obuslavlivayushchie protsessy vzaimodeistviya v sisteme koleso – rel's pri dvizhenii poezda v krivykh [Factors determining the processes of interaction in the wheel–rail system when a train is moving in curves]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2015, no 1, pp. 17–26.
23. Tsarev N.S. Prognozirovanie iznosa zheleznodorozhnogo rel'sa [Forecasting of railway rail wear]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2024, no 3 (105), pp. 91–101.

Информация об авторах

Асалханова Татьяна Николаевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.

Осколков Андрей Александрович, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru.

Information about the authors

Tat'yana N. Asalkhanova, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.

Andrei A. Oskolkov, Ph.D. Student of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: di_oskolkovaa@esrr.ru.