Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-235-243

Сокращение числа аварийных отказов узлов карьерных автосамосвалов на основании корректировки регламентной периодичности проведения их ремонтных работ

Е.Ю. Ботян[1]✉, И.А. Королев[1], А.Э. Уразбахтина[1], А.Е. Пушкарев[2]
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ botyan_eyu@pers.spmi.ru

Резюме: В настоящий момент карьерные автосамосвалы являются наиболее широко представленным видом транспортных машин при проведении горных работ открытым способом. Для проведения мероприятий по поддержанию установленного уровня надежности компаниями-производителями горной техники были разработаны соответствующие регламенты, которые не отражают условий эксплуатации техники на конкретном предприятии. Соблюдение регламентов часто приводит к недостаточной готовности ремонтных служб предприятий к возникшему отказу. Цель исследования – установить рациональную периодичность проведения ремонтных работ узлов карьерных автосамосвалов для сокращения числа их аварийных отказов. Авторами была собрана и проанализирована статистика отказов узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов на двух предприятиях по добыче железной руды открытым способом в 2020–2023 гг. Наименьшую надежность показали элементы силовой установки, подвесок, колес и рамы. На основе анализа применяемых предприятиями стратегий по поддержанию установленного уровня надежности машин была определена целевая функция рационального межремонтного интервала для рассматриваемых узлов. После преобразования целевой функции были получены два уравнения, которые позволяют найти рациональную периодичность проведения плановых ремонтных работ. Для апробации полученных выражений было произведено сопоставление ожидаемого числа аварийных отказов с фактически зарегистрированными в 2023 г. Использование рассчитанной периодичности регламентных ремонтных работ показывает сокращение числа аварийных отказов в год: для подвесок на 73% (с 48 до 10), для колес на 76% (с 38 до 9), а для элементов силовой установки на 62 % (с 34 до 13).

Ключевые слова: карьерный автосамосвал, причина простоя машины, аварийный отказ узла, плановые ремонтные работы, горное предприятие

Для цитирования: Ботян Е.Ю., Королев И.А., Уразбахтина А.Э., Пушкарев А.Е. Сокращение числа аварийных отказов узлов карьерных автосамосвалов на основании корректировки регламентной периодичности проведения их ремонтных работ. *Горная промышленность.* 2026;(5):235–243. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-235-243

Reducing the number of component failures in open pit dump trucks based on adjustments to the frequency of scheduled maintenance

E.Y. Botyan[1]✉, I.A. Korolyov[1], A.E. Urazbakhtina[1], A.E. Pushkarev[2]
[1] Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
[2] Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ botyan_eyu@pers.spmi.ru

Abstract: Currently, dump trucks are the most widely used type of transport vehicle in open-pit mining operations. To maintain the established level of technical availability, mining equipment manufacturers have developed relevant regulations that fail to reflect the specific operating conditions of each particular company. However, the use of these regulations often leads to insufficient readiness of the company's maintenance services for potential failures. To address this issue, the authors collected and analyzed statistics on failures of components and assemblies of dump trucks from two open-pit iron ore mining operations for the period of 2020–2023. The analysis revealed that the power unit, suspension, wheels, and frame were the least reliable components. Based on analyzing the strategies employed by the companies to maintain the established level of machine technical

availability, we determined the target function for the optimal maintenance interval for the components considered. Upon transforming the target function according to the established laws of failure rate distribution based on the number of failures, we obtained two expressions that allow us to find the optimal maintenance frequency for the components under consideration. When testing these expressions, we compared the expected number of failures per year with the actual number of failures, which showed a significant reduction. The use of the calculated maintenance intervals resulted in a reduction in the number of emergency failures per year, e.g. by 73% (from 48 to 10) for the suspension; by 76% (from 38 to 9) for the wheels; and by 62% (from 34 to 13) for the power plant components.

Keywords: dump truck, cause of machine downtime, unexpected component failure, scheduled maintenance, mining operation
For citation: Botyan E.Y., Korolyov I.A., Urazbakhtina A.E., Pushkarev A.E. Reducing the number of component failures in open pit dump trucks based on adjustments to the frequency of scheduled maintenance. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):235–243. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-235-243

Введение

На горных предприятиях Российской Федерации, производящих разработку месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом, основным видом транспорта служат большегрузные карьерные автосамосвалы [1; 2]. По разным оценкам, на их долю приходится в среднем 75% от всей перевезенной горной массы в стране, при этом на многих предприятиях они являются единственным видом транспорта [3; 4]. Несмотря на ряд преимуществ, обусловливающих столь широкое распространение рассматриваемых машин, карьерные автосамосвалы также обладают и существенными недостатками, среди которых одним из наиболее существенных является значительная стоимость перевозки 1 т горной массы [5; 6], вызванная высокой стоимостью самой машины и затратами на ее функционирование [7–9]. Среди последнего в наибольшей степени важным аспектом является организация проведения комплекса мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособного состояния их узлов и агрегатов – технического обслуживания и ремонта, направленного на максимизацию времени нахождения машины в работоспособном состоянии.

Для проведения соответствующих мероприятий компаниями-производителями горной техники были разработаны соответствующие регламенты, которые зачастую служат руководящими документами для ремонтно-механических служб предприятий. Однако подобные регламенты разрабатываются на основе усредненных условий эксплуатации и, следовательно, не учитывают специфики конкретного горного предприятия, что негативно сказывается на показателях надежности применяемого парка техники [10–12].

Во многих исследованиях отмечалось, что на предприятиях с осложненными горнотехническими условиями эксплуатации, обусловленных в первую очередь характеристиками технологических трасс транспортирования, значительное число отказов приходится на подвески, раму, колеса, элементы силовой установки: гидротрансформаторы для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией и тяговые электроприводы для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией [13; 14]. К тому же фактический срок их службы зачастую значительно меньше назначенного [15–17]. Среди рассматриваемых узлов наибольшее число аварийных отказов приходится на элементы подвески (в среднем 30–40% от общего числа), лидером же по суммарной длительности нахождения в неработоспособном состоянии машины вследствие отказа является силовая установка.

В существующих исследованиях отмечалось, что к факторам, приводящим к снижению показателей надежности указанных узлов, относят следующие: режимы работы самосвалов, срок службы машины, природно-климатические, дорожные и горнотехнические условия эксплуатации, а также качество сервиса [18–23]. К качеству сервиса относится обеспеченность необходимыми и достаточными для проведения соответствующих мероприятий: ремонтной базой (подготовленное место, наличие инструмента и т.п.), материальными ресурсами (запасные части, горюче-смазочные материалы и т.д.), квалифицированным персоналом и вспомогательными машинами (автокран, тягач и др.) [24; 25]. При этом на каждый из рассматриваемых факторов в значительной степени влияет недостаточная готовность ремонтно-механических служб предприятий к возникшему отказу, что вызвано использованием графика проведения регламентных ремонтных и обслуживающих работ, не учитывающего в достаточной степени условия эксплуатации конкретного предприятия, основанного на нерациональной периодичности проведения соответствующих мероприятий (чаще всего ими являются планово-предупредительные ремонты).

Отмеченное выше становится особенно острым в случае горных предприятий, расположенных на значительном удалении от крупных логистических и ремонтных центров, что особенно актуально для горно-обогатительных комбинатов России. Для них дополнительными осложняющими факторами являются невозможность поддержания значительного штата высококвалифицированных работников ремонтных служб, оперативного пополнения склада запасных частей, а также оснащения ремонтной базы всем спектром необходимого оборудования [26; 27].

Цель исследования – установить рациональную периодичность проведения ремонтных работ узлов карьерных автосамосвалов с целью сокращения числа их аварийных отказов.

Материалы и методы

Исследования проводились на двух горных предприятиях по добыче железной руды открытым способом – АО «Ковдорский ГОК» и ПАО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК» – в 2020–2023 гг. В качестве объекта исследования были выбраны две модели карьерных автосамосвалов – БЕЛАЗ-75131 и БЕЛАЗ-75303.

На первом этапе были проанализированы выгрузки из систем диспетчеризации и информация из журналов ремонтно-механических служб, где фиксировались отказы узлов и агрегатов, значения наработки до отказа, а также

Таблица 1
Характеристика карьерных автосамосвалов и маршрутов транспортирования, участвующих в исследовании

Table 1
Characteristics of the open-pit dump trucks and transport routes included in the study

ГОК	Модель самосвала	Номер маршрута	Начальная точка маршрута	Конечная точка маршрута	Количество самосвалов
Качканарский	БЕЛАЗ-75303	1	гор. +710 м	Отвал гор. +530 м	2
		2	гор. +710 м	Перегрузочный пункт гор. +495 м	4
		3	гор. +605 м	Отвал гор. +530 м	2
		4	гор. +605 м	Перегрузочный пункт гор. +495 м	3
	БЕЛАЗ-75131	5	гор. +39 м	Перегрузочный пункт гор. +153 м	6
Ковдорский	БЕЛАЗ-75131	6	гор. +130 м	Разгрузочно-доставочный пункт гор. +304 м	2
		7	гор. –184 м		7
	БЕЛАЗ-75303	8	гор. –155 м		5
		9	гор. –184 м		2

причины и длительность простоев при проведении мероприятий по восстановлению работоспособного состояния.

Для дальнейших исследований были выбраны автосамосвалы, задействованные на маршрутах транспортирования горной массы, удовлетворяющие следующим условиям:

1. Постоянные маршруты транспортирования (за исключением подвигания фронта погрузочных и разгрузочных работ).

2. Незначительное варьирование физико-механических свойств перевозимой горной массы.

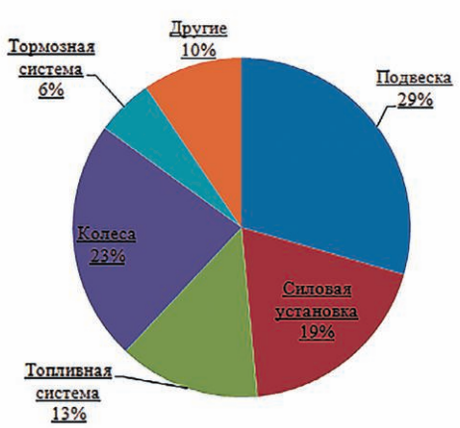
3. Управляются одними и теми же операторами в соответствии с неизменными паспортами ведения работ.

Конечная выборка для исследования составила 33 автосамосвала, которые задействованы на 9 маршрутах транспортирования (табл. 1). Выбранные машины осуществляли транспортирование как только полезного ископаемого, представленного магнетит-гематитовыми рудами (маршруты 2, 4 и 5), так и исключительно вскрышных пород (маршруты 1, 3), сложенных преимущественно штаффелитами. Для маршрутов 6–9 характерно перемещение как полезного ископаемого в виде гематитовых руд, так и вскрыши, состоящей преимущественного из карбонатфторапатитовых пород.

По данным журналов ремонтно-механических служб, выбранных для исследования автосамосвалов, было установлено, что подвески являются узлом с наибольшим потоком отказов, на долю которых приходится 30% от общего числа отказов (рис. 1, *а*), а среди их элементов неисправности шарнирного подшипника являются причиной возникновения 82% отказов. Несмотря на наибольшее число аварийных отказов суммарная длительность пребывания в неработоспособном состояния для этого узла составляет лишь 11% от общего числа. В то же время отказы элементов силовой установки, несмотря на их меньшее число, обусловливают до примерно 75% от суммарной продолжительности восстановительных работ (рис. 1, *б*), что согласуется с ранее проведенными исследованиями [28–30]. Для дальнейших исследований целесообразно выбрать три узла карьерных автосамосвалов, показавших наименьшую надежность: подвески, колеса, силовая установка.

Рассмотрим структуру операций, направленных на восстановление работоспособного состояния объекта на примере узла с наибольшим числом аварийных отказов – подвесок. Исходя из регламентов проведения технического обслуживания и ремонта, принятых предприятиями, нормативный срок службы подвески карьерных автосамосвалов принимается равным 40 000 км, или же примерно

а)



б)

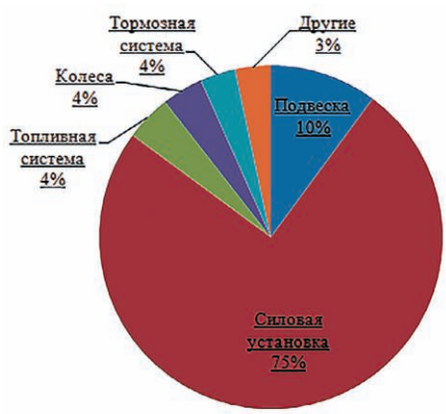


Рис. 1
Структура числа отказов (а) и суммарной длительности пребывания в неработоспособном состоянии вследствие отказа (б) узлов карьерных автосамосвалов, участвующих в исследовании

Fig. 1
A breakdown of the number of failures (a) and the total duration of downtime due to failure (б) of the components of the dump trucks in the study

Рис. 2
Сопоставление наработки до отказа рассматриваемых узлов с числом отказов и длительностью простоев вследствие их

Fig. 2
A comparison of the operating time before suspension failure with the number of failures and the duration of downtime due to these failures

2000 ч, а длительность планового ремонта – 10,2 ч (как сумма времени разборки, поиска неисправности, непосредственного ремонта и сборки). Согласно проанализированной статистике, средняя наработка до отказа рассматриваемого узла составляет 1760 ч. При этом длительность проведения аварийного ремонта (рис. 2, красная линия) значительно выше планового ввиду возникших простоев, обусловленных недостаточной готовностью ремонтных служб к возникшему отказу (рис. 2, синяя линия). Отмеченное особенно заметно на примере 25 отказов (количество отказов за диапазон наработки до отказа обозначено на рис. 2 зеленой линией), которые произошли в диапазоне от 80 до 90% от средней, т.е. значительно раньше нормативного срока службы узла.

Это говорит о том, что принятые предприятиями регламенты проведения технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов, основанные на рекомендациях соответствующих производителей горной техники, требуют корректировки периодичности проведения регламентных ремонтных работ с целью сокращения количества их аварийных отказов.

Для установления рациональной периодичности проведения ремонтных работ узлов и агрегатов техники следует предварительно выбрать модель профилактики карьерных автосамосвалов. В настоящее время на предприятиях горной отрасли в России относительно техники, применяемой для открытой добычи твердых полезных ископаемых, сформировались три модели профилактики для рассматриваемых машин [31–33]:

Проведение только аварийных ремонтов. Согласно этой модели ремонтно-механическими службами горного предприятия не производится никаких предварительных операций, направленных на поддержание установленного уровня надежности узлов и агрегатов автосамосвалов, то есть производятся исключительно реактивно, по факту возникшего отказа.

Проведение плановых ремонтов при внеплановых аварийных ремонтах без переноса времени проведения первых. Согласно этой модели ремонтно-механические службы горных предприятий для одних и тех же объектов проводят как ремонты по факту случившегося аварийного отказа, так и планово-предупредительные ремонты: если объект не отказал к назначенному моменту, то производится плановый ремонт, если же отказ произошел раньше, то производится аварийный ремонт. При этом после аварийного ремонта время проведения очередного планового ремонта не изменяется.

Проведение плановых ремонтов при внеплановых аварийных ремонтах с переносом времени проведения первых. При использовании этой модели после проведения аварийного ремонта ремонтно-механические службы предприятий очередной плановый ремонт переносят таким образом, чтобы следующий плановый ремонт был произведен через промежуток времени, равный наработке до аварийного отказа.

Несмотря на наибольшие количество и длительность простоев и, как следствие, экономические потери вследствие аварийного отказа первая модель получила наибольшее распространение ввиду наименьших материальных вложений, направленных на оснащение ремонтной базы, поддержание нужного штата персонала и т.д. В случае достаточного оснащения, обозначенного выше, перед горными предприятиями ставится вопрос выбора между второй и третьей моделью, выраженный в учете конкретных значений трудоемкости замены узлов, стоимости проведения планового и аварийного ремонтов, потерь от часа простоя машины и т.д. [27; 34]. При этом третья модель используется чаще для узлов со значительной стоимостью и сроком службы (рама, кузов и т.д.), к которым нельзя отнести подвески, колеса и силовую установку, но ввиду значительной разницы между фактическими и номинальными сроками службы рассматриваемых узлов для исследования нами принята третья модель.

Результаты и их обсуждение

Так как наработка до отказа любых объектов относится к категории непрерывных случайных величин, т.е. может принимать одно из множества своих значений в каждом конкретном случае, то для дальнейших действий следует установить закон распределения потока отказов рассматриваемых узлов карьерных автосамосвалов. Для элементов подвесок, колес и силовой установки машин, эксплуатируемых на обоих предприятиях, была произведена проверка согласно критерию согласия Пирсона для четырех теоретически описанных законов распределения (табл. 2).

Таким образом, на основе данных, представленных в табл. 2, можно утверждать, что распределение потока отказов колес и подвесок карьерных автосамосвалов, участвующих в исследовании, наиболее близко к нормальному, а элементов силовой установки – к логарифмически нормальному.

В рамках дальнейших действий приняты несколько допущений: время локализации возникшего отказа незначительно, во время проведения плановых и аварийных ремонтов машина находится в неработоспособном состоянии, в стоимость каждого из видов ремонта заложена стоимость необходимой для их проведения ремонтной базы. Следовательно, искомая рациональная периодичность проведения плановых ремонтных работ будет описываться следующей целевой функцией:

$$\frac{A_{ав}\Omega(T_{межс}) + A_{пл}}{T_{межс}} = \frac{A_{ав}\Omega(T_{межс}) + A_{пл}}{\int_0^{T_{межс}} P(t)dt} \to \min, \quad (1)$$

где $A_{ав}$ и $A_{пл}$ – стоимость проведения аварийного и планового ремонта, руб. [33–35]; $T_{межс}$ – рациональная пери-

Таблица 2
Сопоставление полученных распределений рассматриваемых узлов с теоретически описанными при помощи критерия согласия Пирсона

Table 2
A comparison of the obtained distributions for the considered components with the theoretically described ones using the Pearson's goodness-of-fit test

Закон распределения		Качканарский ГОК			Ковдорский ГОК		
		Силовая установка	Подвески	Колеса	Силовая установка	Подвески	Колеса
Нормальный	χ^2	8,32	4,76	2,72	7,98	3,51	3,02
	α	0,05	0,3	0,5	0,07	0,3	0,5
Логарифмически нормальный	χ^2	3,21	7,67	5,52	2,98	6,51	5,04
	α	0,34	0,1	0,2	0,31	0,1	0,2
Экспоненциальный	χ^2	2789,4	2584,7	2417,1	2321,1	2361,7	2258,1
	α	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Распределение Вейбулла	χ^2	2356,3	1741,1	2153,1	2572,4	1870,7	2218,7
	α	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

одичность проведения плановых ремонтных работ, ч; $\Omega(T_{межд})$ – математическое ожидание числа отказов за межремонтный интервал $T_{межд}$; $\int_0^{T_{межд}} P(t)dt$ – средняя наработка между отказами, ч.

Ввиду того что искомая периодичность проведения плановых ремонтных работ должна стремиться к значению наработки между отказами, становится возможным преобразовать знаменатель следующим образом:

$$\int_0^{T_{межд}} P(t)dt = \int_0^{T_{межд}} t \cdot f(t)dt + T_{межд} P(T_{межд}), \quad (2)$$

где $f(t)dt$ – плотность вероятности возникновения отказа машины; $P(T_{межд})$– требуемый уровень вероятности безотказной работы машины за межремонтный период.

Плотность вероятности возникновения отказа:

– для узлов с нормальным законом распределения числа отказов по их наработке:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T_{нi} - T_{н\,ср})^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

где $T_{н\,ср}$ и σ – среднеарифметическая и среднеквадратичная наработка между отказами подвески, ч;

– для узлов с логарифмически нормальным распределением:

$$f(t) = \frac{1}{T_{нi}\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg T_{нi} - \lg T_{н\,ср})^2}{2\sigma^2}}. \quad (4)$$

Подставив выражения (2) и (3) в выражение (1), получим, что искомая периодичность проведения регламентных ремонтных работ для подвесок и колес, распределение числа отказов которых по наработке принимается нормальным, определяется согласно следующему выражению:

$$T_{межд} = T_{н\,ср} - \sqrt{-2\sigma^2 \ln\left(\sqrt{2\pi}\sigma \frac{\left(\frac{A_{ав}}{A_{пл}} + 1\right)/\left(1 - \frac{A_{ав}}{A_{пл}}\right) - \Omega(T_{межд})}{T_{н\,ср}}\right)}. \quad (5)$$

Для элементов силовой установки, распределения потока отказов которых принимается логарифмически нормальным, после подстановки выражения (4) и (2) в выражение (1) получим:

$$T_{межд} = T_{н\,ср} + 2\sigma \ln \frac{T_{н\,ср}}{\left[\left(\frac{A_{ав}}{A_{пл}} + 1\right)/\left(1 - \frac{A_{ав}}{A_{пл}}\right) - \Omega(T_{межд})\right]\sigma^2\sqrt{2\pi}}. \quad (6)$$

С целью апробации предлагаемого решения по корректировке периодичности проведения регламентных ремонтных работ карьерных автосамосвалов была установлена вероятность возникновения аварийного отказа путем анализа фактически зарегистрированных за 2023 г. аварийных отказов выбранных автосамосвалов, функционирующих на двух предприятиях, использующих периодичность регламентных ремонтных работ рассматриваемых узлов равной регламентной. Полученные значения были сопоставлены с ожидаемым количеством отказов, полученным при использовании предлагаемой периодичности регламентных ремонтных работ при составлении графика проведения планово-предупредительных ремонтов (табл. 3).

Как следует из табл. 3, при использовании предлагаемой периодичности регламентных ремонтных работ обеспечивается сокращение числа аварийных отказов в год: для подвесок с 48 до 10 (на 73%), для колес – с 38 до 9 (на 76%), а для элементов силовой установки – с 34 до 13 (на 62 %).

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Использование периодичности ремонтных работ узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов, указанной в регламентах производителей горной техники, является нерациональным, так как приводит к внезапным и аварийным отказам, что увеличивает число и длительность простоев этих машин.

2. Для применяемой предприятиями модели профилактики узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов была установлена целевая функция периодичности проведения плановых ремонтных работ для рассматриваемых узлов.

Таблица 3
Сопоставление фактически зарегистрированного числа аварийных отказов за 2023 г. с ожидаемым при использовании предлагаемой периодичности регламентных ремонтов

Table 3
A comparison of the actually registered number of emergency failures in 2023 with the expected number using the proposed frequency of preventive repairs

Узел	Номер маршрута	Периодичность регламентных ремонтных работ узла, ч		Число аварийных отказов, ед.	
		фактическая	предлагаемая	фактически зарегистрированное в 2023 г.	ожидаемое
Подвеска	1	1931	1923	3	1
	2	1909	1899	3	1
	3	1842	1825	5	2
	4	1833	1819	7	2
	5	1674	1658	8	2
	6	1763	1747	3	1
	7	1801	1788	11	3
	8	1624	1609	6	1
	9	1726	1705	2	0
Колеса	1	2157	2143	2	0
	2	2118	2099	5	2
	3	2052	2034	3	1
	4	2048	2027	4	1
	5	1984	1968	6	2
	6	2039	2024	2	0
	7	2075	2058	8	2
	8	1967	1951	6	1
	9	2019	1997	2	0
Силовая установка	1	2271	2256	3	1
	2	2256	2223	5	2
	3	2221	2204	5	2
	4	2211	2187	3	0
	5	2120	2098	4	1
	6	2152	2145	3	1
	7	2174	2156	8	3
	8	2096	2078	6	2
	9	2118	2101	2	1

Согласно известным распределениям числа отказов рассматриваемых узлов по наработке до их отказа была рассчитана рациональная периодичность проведения плановых ремонтных работ.

3. Построение графика регламентных ремонтных работ карьерных автосамосвалов с установленной периодичностью проведения операций по восстановлению работоспособности рассматриваемых узлов карьерных автосамосвалов позволяет сократить число внезапных отказов в год для подвесок с 48 до 10 (на 73%), для колес – с 38 до 9 (на 76%), а для элементов силовой установки – с 34 до 13 (на 62 %).

Вклад авторов
Е.Ю. Ботян – написание текста статьи, сбор данных.
И.А. Королев – анализ результатов исследования, ранжирование и поиск материалов по теме исследования, обработка данных.
А.Э. Уразбахтина – установление целевой функции и создание алгоритма расчета рациональной периодичности регламентных ремонтных работ узлов.
А.Е. Пушкарев – постановка цели и задач исследования, определение методов и материалов исследования.

Authors' contribution
Evgeny Yu. Botyan – writing the article and data collection.
Igor A. Korolyov – analyzing the research results, ranking and searching for materials related to the research topic, and data processing.
Anna E. Urazbakhtina – establishing the objective function and developing an algorithm for calculating the optimal intervals between scheduled maintenance of components.
Aleksandr E. Pushkarev – defining the research objectives and tasks, and determining the research methods and materials.

Список литературы / References

1. Невзоров Д.Н., Труфанова И.С. Повышение эффективности работы конвейерного поезда: исследование влияния параметров приводной станции на силу сцепления. *Горная промышленность*. 2025;(1):184–191. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-184-191
Nevzorov D.N., Trufanova I.S. Improving the efficiency of the conveyor train: investigation of the impact of the drive station parameters on the traction force. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):184–191. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-184-191

2. Ворошилов Г.А., Лель Ю.И. Энергоемкость транспортных систем карьеров: оценка и перспективы. *Горная техника*. 2009;(1):42–49. Режим доступа: https://stroit.ru/stati/energoemkost-transportnyh-sistem-karerov-otsenka-i-perspektivy/ (дата обращения: 19.03.2026).
Voroshilov G.A., Lel Yu.I. Energy intensity of quarry transport systems: assessment and prospects. *Gornaya Tekhnika*. 2009;(1):42–49. (In Russ.) Available at: https://stroit.ru/stati/energoemkost-transportnyh-sistem-karerov-otsenka-i-perspektivy/ (accessed: 19.03.2026).

3. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов. *Записки Горного института*. 2025;275:5–17. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16670 (дата обращения: 19.03.2026).
Zhukovskiy Y.L., Suslikov P.K. Identification and classification of electrical loads in mining enterprises based on signal decomposition methods. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:5–17. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16670 (accessed: 19.03.2026).

4. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloev H., Suslov K., Beloev I. Review of operating conditions, diagnostic methods, and technical condition assessment to improve reliability and develop a maintenance strategy for electrical equipment. *Energies*. 2025;18(21):5832. https://doi.org/10.3390/en18215832

5. Kuznetsov D., Kosolapov A. Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:1042–1048. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.104

6. Hasan H., Octariando R. *The effect of road grade on dump truck fuel consumption*. SAE Technical Paper Series, April 20, 2022, 2022-01-5030. https://doi.org/10.4271/2022-01-5030

7. Kumykova T.M., Kumykov V.Kh. Method of shaping loading-and-transportation system in deep open pit complex ore mines. *Journal of Mining Science*. 2018;53(4):708–717. https://doi.org/10.1134/S1062739117042702

8. Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А., Лю Ц. Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):5–21. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5
Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Evsiukova A.A., Liu Z. Justification of the longwall panel entries support technology when mining gently inclined coal seams at large depths. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):5–21. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_5

9. Афанасьев П.И., Белов А.А. Оценка сейсмовзрывного воздействия на приконтурный массив по амплитудно-частотным характеристикам взрыва. *Горная промышленность*. 2025;(3):138–145. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-138-145
Afanasev P.I., Belov A.A. Assessment of the seismic-blast effects on the marginal rock mass due to the amplitude-frequency characteristics of the blast. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):138–145. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-138-145

10. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Шишкин П.В. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2). *Горная промышленность*. 2024;(4):108–114. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114
Sheshukova E.I., Shibanov D.A., Ivanov S.L., Shishkin P.V. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (Part 2). *Russian Mining Industry*. 2024;(4):108–114. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114

11. Глебов А.В., Кармаев Г.Д. Определение предельных сроков эксплуатации карьерных самосвалов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(1):50–61. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2015/01/09-50-61_Glebov.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
Glebov A.V., Karmaev G.D. Estimation of service life limit for open pit dump-trucks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(1):50–61. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2015/01/09-50-61_Glebov.pdf (accessed: 19.03.2026).

12. Федорина А.В., Шаронова А.А., Осинцев Н.А., Пыталев И.А. Использование системы диспетчерского управления для повышения производительности работы автосамосвалов (на примере угольного разреза). *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2015;5(1):29–33. Режим доступа: https://transcience.ru/index.php/MPRTC/article/view/36/0 (дата обращения: 19.03.2026).
Fedorina A.V., Sharonova A.A., Osintsev N.A., Pytalev I.A. The usage of dispatch control system to improve productivity of dump trucks (on the example of the coal mine). *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2015;5(1):29–33. (In Russ.) Available at: https://transcience.ru/index.php/MPRTC/article/view/36/0 (accessed: 19.03.2026).

13. Андреева Л.И., Ушаков Ю.Ю. Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2016;(3):74–77. Режим доступа: https://www.iuggu.ru/download/Andreeva-3-16.pdf (дата обращения: 19.03.2026).
Andreeva L.I., Ushakov Yu.Yu. Research of operational reliability of quarry dump trucks. *News of the Ural State Mining University*. 2016;(3):74–77. (In Russ.) Available at: https://www.iuggu.ru/download/Andreeva-3-16.pdf (accessed: 19.03.2026).

14. Yan Q.-D., Chen X.-Q., Jian H.-C., Wei W., Wang W.-D., Wang H. Design of a deep inference framework for required power forecasting and predictive control on a hybrid electric mining truck. *Energy.* 2022;238:121960. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121960

15. Lagunova Yu., Bochkov V., Horoshavin S. Analysis of the operational characteristics of the main units of BelAZ vehicles in a coal mine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;709:022048. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022048

16. Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е. Мультиуровневая модель управления экскаваторно-автомобильными комплексами разрезов. *Горное оборудование и электромеханика.* 2019;(5):8–15. https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-5-8-15
Voronov A.Yu., Voronov Yu.E. Multistage model for shovel-truck system management at open-pit coal mines. *Mining Equipment and Electromechanics.* 2019;(5):8–15. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-5-8-15

17. Бурмистров К.В., Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю. Выбор и оценка системы вскрытия при разработке крутопадающих месторождений открытым способом. *Записки Горного института.* 2025;274:95–103. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16370 (дата обращения: 19.03.2026).
Burmistrov K.V., Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Y. Selection and assessment of the stripping system in open pit mining of steeply dipping deposits. *Journal of Mining Institute.* 2025;274:95–103. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16370 (accessed: 19.03.2026).

18. Umirzokov A.M., Mallaboev U.M., Saidullozoda S.S., Khabibullozoda Kh.Kh. Classification of factors influencing the reliability of the driver-vehicle-road-environment (DVRE) system in the conditions of mountain quarries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;817:012036. https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012036

19. Maior G.R.S., Peroni R.L., Mariz J.L.V. Assessing the impact of road geometry and rolling resistance on transportation costs and productivity in an iron ore mine in Brazil. *REM – International Engineering Journal.* 2025;78(4):e250002. https://doi.org/10.1590/0370-44672025780002

20. Яковлев В.Л., Яковлев В.А. Формирование транспортных систем карьеров с учетом адаптации к изменяющимся условиям разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал.* 2018;(6):118–126. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-6-118-126
Iakovlev V.L., Iakovlev V.A. Open pit transport systems formation with the account of adaptation to deep-lying complex-structured deposits development changing conditions. I*zvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal.* 2018;(6):118–126. (In Russ.) https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-6-118-126

21. Ramesh Kumar A., Krishnan V. A study on reliability analysis of haul trucks. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology.* 2017;4(3):76–85. https://doi.org/10.17148/IARJSET.2017.4317

22. Клюев Р.В., Босиков И.И., Егорова Е.В., Гаврина О.А. Оценка горно-геологических и горнотехнических условий карьера «Северный» с помощью математических моделей. *Устойчивое развитие горных территорий.* 2020;12(3):418–427.
Klyuev R.V., Bosikov I.I., Egorova E.V., Gavrina O.A. Assessment of mining-geological and mining technical conditions of the Severny pit with the use of mathematical models. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2020;12(3):418–427. (In Russ.)

23. Bochkaryov Yu.S., Ishkov A.M. The operational reliability of quarry dump trucks BELAZ-7540 in the placer deposits. In: *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM 2020, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Albena, August 18–24, 2020.* Sofia: STEF92 Technology; 2020, pp. 325–332. https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s03.042

24. Pryalukhin A.F., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Filina O.A., Konyukhov V.Y., Makarov A.A. Improvement of operational reliability of units and elements of dump trucks taking into account the least reliable elements of the system. *World Electric Vehicle Journal.* 2024;15(8):365. https://doi.org/10.3390/wevj15080365

25. Цупкина М.В., Кирков А.Е., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Обоснование необходимости улучшения стратегии управления функционированием горно-технической системы на основе анализа данных об отработке сложноструктурных блоков. *Записки Горного института.* 2024;266:316–325. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16302 (дата обращения: 19.03.2026).
Tsupkina M.V., Kirkov A.E., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Justification of the approaches to improve management strategy of the mining system based on the analysis of data on the mining of complex structural rock blocks. *Journal of Mining Institute.* 2024;266:316–325. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16302 (accessed: 19.03.2026).

26. Бердников И.Е., Озорнин С.П. Математические модели определения количества отказов транспортно-технологических машин в зависимости от факторов условий эксплуатации. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2017;(2):134–141.
Berdnikov I.E., Ozornin S.P. Mathematical models for determining the transport-technological machines failure rate depending on the factors of operating conditions. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling.* 2017;(2):134–141. (In Russ.)

27. Мариев П.Л., Егоров А.Н., Войтов В.Т. Особенности работы карьерных самосвалов в условиях глубоких карьеров и повышенных уклонов карьерных дорог. *Горный журнал.* 2011;(10):63–66.
Mariev P.L., Egorov A.N., Voytov V.T. Features of mine dump truck working in the conditions of deep quarry and higher slopes of pit roads. *Gornyi Zhurnal.* 2011;(10):63–66. (In Russ.)

28. Бочкарев Ю.С., Зырянов И.В. Повышение эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5-2):80–90. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_80
Bochkaryov Yu.S., Zyryanov I.V. Improving the efficiency of operation quarry dump trucks on placer deposits in the north conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5-2):80–90. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_80

29. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Голубев О.В. Эволюция карьерного автотранспорта. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2021;(2):67–74. https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-2-67-74
Tarasov P.I., Khazin M.L., Golubev O.V. The evolution of quarry vehicles. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2021;(2):67–74. https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-2-67-74

30. Wang H. Underground mine planning optimization process to improve values and reduce risks. In: Mueller C., Assibey-Bonsu W., Baafi E., Dauber C., Doran C., Jaszczuk M., Nagovitsyn O. (eds) Mining goes Digital: *Proceedings of the 39th International Symposium "Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry" (APCOM 2019), Wroclaw, June 4-6, 2019*. London: CRC Press; 2019, pp. 335–343. https://doi.org/10.1201/9780429320774-39

31. Novak D., Kozhubaev Y., Kang H., Cheng H., Ershov R. Intelligent system study for asymmetric positioning of personnel, transport, and equipment monitoring in coal mines. *Symmetry*. 2025;17(5):755. https://doi.org/10.3390/sym17050755

32. Лель Ю.И., Глебов И.А., Буднев А.Б., Исаков С.В., Ганиев Р.С. К обоснованию параметров крутонаклонных автосъездов при вскрытии глубоких горизонтов кимберлитовых карьеров. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(7):21–32. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-21-32
Lel Iu.I., Glebov I.A., Budnev A.B., Isakov S.V., Ganiev R.S. Rationale for the parameters of steeply inclined ramps of kimberlite pits deep horizons exposing. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2020;(7):21–32. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-21-32

33. Filatova I., Shabalov M., Nikolaichuk L. Regulation methods in natural monopoly markets case of Russian gas network companies. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2019;12(5):624–630. Available at: http://www.irphouse.com/ijert19/ijertv12n5_06.pdf (accessed: 19.03.2026).

34. Зайцева Е.В., Кочнева А.А., Катунцов Е.В. Оптимизация технологического процесса повышения контрастности на изображениях, полученных в шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(7):115–130. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_115
Zaitseva E.V., Kochneva A.A., Katuntsov E.V. Optimization of contrast enhancement in images obtained in mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(7):115–130. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_115

Информация об авторах
Ботян Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, ассистент кафедры информатики и компьютерных технологий, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3395-935X; e-mail: botyan_eyu@pers.spmi.ru
Королев Игорь Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-0337-3999
Уразбахтина Анна Эдуардовна – кандидат технических наук, ассистент кафедры информатики и компьютерных технологий, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Пушкарев Александр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Информация о статье
Поступила в редакцию: 19.05.2026
Поступила после рецензирования: 01.07.2026
Принята к публикации: 10.07.2026

Information about the authors
Evgeny Yu. Botyan – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Department of Informatics and Computer Technologies, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3395-935X; e-mail: botyan_eyu@pers.spmi.ru
Igor A. Korolyov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-0337-3999
Anna E. Urazbakhtina – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Department of Informatics and Computer Technologies, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
Aleksandr E. Pushkarev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Surface Transport and Technological Machines, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Article info
Received: 19.05.2026
Revised: 01.07.2026
Accepted: 10.07.2026