



Внедрение системы heads-up display для предиктивной диагностики и повышения надежности в процессе эксплуатации карьерных самосвалов БелАЗ

П.Н. Махараткин ✉, Е.А. Тарабрина

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ Pavelnik@spmi.ru

Резюме: В статье обоснована целесообразность внедрения трех интегральных показателей: экологичное вождение (цветовая оценка стиля управления), комплексный запас хода (мониторинг аномального расхода жидкостей) и ходимость шин (раннее предупреждение о проколах, перегреве и перекосах), на базе проекционного экрана (heads-up display, HUD) для большегрузного автосамосвала БелАЗ. На основе анализа фактических данных эксплуатации самосвала БелАЗ грузоподъемностью 220 т за период с ноября 2025 г. по март 2026 г. (204 480 мин работы) выявлены доминирующие типы аномалий, приводящие к аварийным простоям. Проведен корреляционный анализ совместного проявления различных аномалий при эксплуатации в карьере большегрузных автосамосвалов БелАЗ с определением тождественных по времени событий, совпадающих с зафиксированными ошибками в работе системы мониторинга. Рассчитано, что внедрение системы позволит сократить аварийные простои более чем на треть, обеспечит быструю окупаемость и снизит затраты на ремонт шин и гидрооборудования. Достигнуто увеличение комплексного показателя надежности, а в частности, коэффициента использования за счет снижения простоя техники и уменьшения количества эксплуатационных отказов путем повышения эффективности и ранжирования поступающей информации машинисту при использовании предиктивной диагностики в эксплуатации автосамосвалов на предприятиях горнорудной промышленности.

Ключевые слова: карьерный автосамосвал, проекционный экран, heads-up display, коэффициент технического использования, система мониторинга, аварийные простои, разрушение шин, отказ гидронасоса, эксплуатационные затраты

Для цитирования: Махараткин П.Н., Тарабрина Е.А. Внедрение системы heads-up display для предиктивной диагностики и повышения надежности в процессе эксплуатации карьерных самосвалов БелАЗ. *Горная промышленность*. 2026;(4S):210–216. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-210-216>

Implementation of heads-up display system for predictive diagnostics and reliability enhancement in operation of BelAZ mine dump trucks

P.N. Makharatkin ✉, E.A. Tarabrina

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ Pavelnik@spmi.ru

Abstract: The paper justifies implementation of three integrated indicators, i.e. eco-driving (color-coded driving style assessment), comprehensive driving range (monitoring abnormal fluid consumption), and tire mileage (early warning of punctures, overheating, and tilting) using a head-up display for a BelAZ heavy-duty dump truck. Based on an analysis of the actual operating data for a 220-ton BelAZ dump truck for the period from November 2025 to March 2026 (204,480 minutes of operation), the dominant types of anomalies leading to emergency downtime were identified. A correlation analysis was conducted of the joint occurrence of various anomalies during the operation of BelAZ heavy-duty dump trucks in a quarry, with the identification of events that coincided in time with the recorded errors in the monitoring system. The system's implementation is expected to reduce emergency downtime by more than a third, ensure rapid return on investment, and reduce tire and hydraulic equipment repair costs. An increase in the comprehensive reliability indicator, specifically the utilization rate, has been achieved by reducing equipment downtime and the number of operational failures through improved efficiency and prioritization of the information received by the operator using predictive diagnostics in dump truck operations at mining facilities.

Keywords: dump truck, heads-up display, utilization rate, monitoring system, unplanned downtime, tyre failure, hydraulic pump failure, operating costs

For citation: Makharatkin P.N., Tarabrina E.A. Implementation of heads-up display system for predictive diagnostics and reliability enhancement in operation of BelAZ mine dump trucks. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):210–216. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-210-216>

Введение

Вектор развития горнодобывающей промышленности [1–3], а также горных машин [4–6] направлен на повышение производительности и в то же время понижение эксплуатационных затрат [7–9], что, в свою очередь, требует обоснования рациональных параметров [10–12] и повышения надежности используемого оборудования [13–15]. Самосвалы, задействованные на горных работах, эксплуатируются в экстремальных условиях [16–18], это ведет к повышенному износу узлов и агрегатов [19–21], а также к увеличению возникновения аварийных ситуаций [22; 23]. Внедрение современных диагностических систем [24–26] способно существенно повысить эффективность эксплуатации техники [27; 28]. Предлагаемым решением является внедрение проекционного экрана на лобовое стекло (Heads-Up Display, HUD), что позволит водителю получать необходимую информацию без отвлечения от дорожной обстановки [29–31].

Цель исследования: оценить эффективность и практическую значимость внедрения проекционного экрана (HUD) на лобовое стекло для большегрузных автосамосвалов, эксплуатируемых на горных работах, с выбором специализированных индикаторов для повышения надежности в процессе эксплуатации карьерных самосвалов БелАЗ.

Материалы и методы

Для реализации работы была проведена обработка данных эксплуатации карьерного самосвала БелАЗ грузоподъемностью 220 т. Особенностью работы является актуальность используемых данных по автосамосвалам, находящимся в работе на действующем карьере. Рассматриваемый период – с 1 ноября 2025 г. по 22 марта 2026 г., что составляет 204 480 мин непрерывного учета (142 сут). Исходные данные включали anomalies событий по всем бортовым системам, временные метки простоев с классификацией причин, а также записи о нарушениях режимов работы.

Этапы работы выполнялись в следующей последовательности:

1. Вычисление общего времени простоя и его структуры.
2. Расчет коэффициента технического использования (КТИ).
3. Определение ошибок в работе тождественных времени регистрации в системе с построением диаграммы Парето для выявления «критического меньшинства» причин.
4. Классификация anomalies по типам последствий для выявления устойчивых паттернов при эксплуатации.
5. Корреляционный анализ совместного проявления различных anomalies в работе самосвала БелАЗ грузоподъемностью 220 т. За 142 дня наблюдения суммарное время простоев самосвала составило 59 219 мин, что эквивалентно 41 дню, или 29% от общего календарного времени.

Результаты

Коэффициент технического использования рассчитан по формуле:

$$\text{КТИ} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{раб}}$ – математическое ожидание суммарного времени пребывания в работоспособном состоянии; $T_{\text{пр}}$ – математическое ожидание суммарного времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом.

Полученный при этом коэффициент технического использования составил 0,71, что характерно для техники, эксплуатируемой в тяжелых горно-геологических условиях, в то же время он указывает на потенциальный резерв повышения эффективности.

При выделении событий, совпадающих по времени с регистрацией ошибок в работе систем, структура простоя распределилась следующим образом: организационные простои (по причинам, не связанным непосредственно с ошибками в работе систем) – 38 232 мин (64,6%); простои, совпадающие по времени с регистрацией ошибок, – 20 988 мин (35,4%).

Из числа простоев, совпадающих с ошибками, выделены аварийные простои, причиной которых стали непосредственно зафиксированные системой anomalies. Их объем составил 6684,5 мин – это 32% от времени совпадения с ошибками и около 11,3% от общего времени простоя. Экономический ущерб от этих аварийных простоев, исходя из средней стоимости простоя БелАЗа 220 т (60 000 руб/ч, или 1000 руб/мин), достиг 6,685 млн руб. за 5 мес наблюдения, что соответствует примерно 1,337 млн руб/мес.

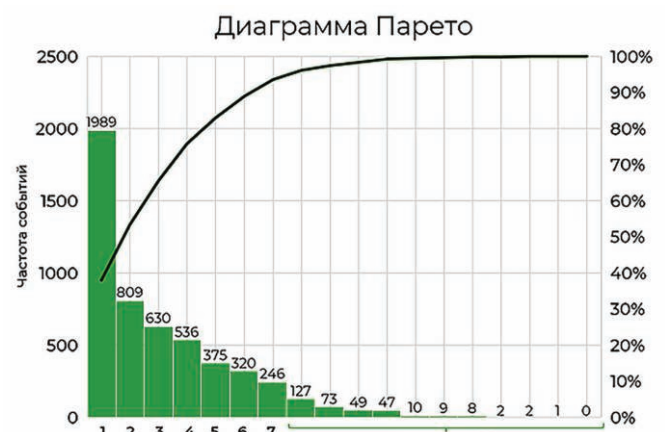


Рис. 1
Диаграмма Парето для БелАЗа 220 т

Fig. 1
A Pareto chart for a 220 tons BelAZ



Таблица 1
Распределение ошибок
по принципу Парето

Table 1
The Pareto error distribution

№	Тип аномалии	Частота	Доля, %	Кумулята, %
1	Нет связи с CAN-шиной	1989	38,01	38,01
2	Аварийный уровень масла (гидросистема)	809	15,46	53,47
3	Передняя правая подвеска – отклонение давления	630	12,04	65,51
4	Передняя левая подвеска – отклонение давления	536	10,25	75,76
5	Не видно лица (контроль оператора)	375	7,17	82,93
6	Закрыты глаза (оператор)	320	6,12	89,05
7	Задняя правая подвеска – отклонение давления	246	4,70	93,75
	Остальные 10 типов*	328	6,25	100

Примечание. * Превышение предельной допустимой скорости движения на спуске; аварийное давление в рулевом управлении; задняя левая подвеска – отклонение от рабочего диапазона; движение с поднятой платформой, одна из камер отвернута; остановка ДВС под нагрузкой; переключение движения вперед-назад без полной остановки; аварийное давление в тормозном контуре; движение с включенным стояночным тормозом.

Note: * Exceeding the maximum permitted speed when driving downhill; abnormal pressure in the steering system; rear left suspension – deviation from the operating range; driving with the lifted box, one of the tyres turned out; engine stalling under load; switching between forward and reverse without coming to a complete stop; abnormal pressure in the brake circuit; driving with the parking brake engaged.

Обработка данных о возникших событиях в разных узлах самосвала за рассматриваемый период для выявления доминирующих аномалий в работе машины была выполнена по диаграмме Парето [32] (рис. 1), пояснения по аномалиям приведены в табл. 1.

Кумулятивная кривая демонстрирует ярко выраженный эффект «критического меньшинства»:

1. Первые 4 типа аномалий (потеря связи CAN-шины, аварийный уровень масла, отклонения давления в переднем правом и левом цилиндре подвески) составили 75,8% всех нештатных ситуаций.

2. Первые 5 типов (добавляется событие «не видно лица») покрывают уже 82,9%. Оставшиеся 10 типов аномалий в сумме дают менее 7% от общего объема. Таким образом, фокус управленческих и технических решений должен быть направлен именно на малую группу доминирующих причин, что полностью соответствует принципу Парето.

При выявлении устойчивых паттернов в эксплуатации все события были сгруппированы по четырем категориям последствий (табл. 2) для оценки их влияния на надежность.

Наибольшую долю (53,5%) составляют аномалии, ведущие к разрушению шин. Шины для карьерных самосвалов относятся к наиболее дорогостоящим расходным материалам: комплект шин для БелАЗа 220 т стоит около 6 млн руб. Внутри этой группы 65,1% случаев приходится на отклонения давления в передней подвеске, 30,8% – на заднюю подвеску, причем в 49,5% случаев эти отклонения проявляются одновременно с превышением скоростного режима на спуске.

Таблица 2
Классификация аномалий по
последствиям

Table 2
A classification of anomalies
by their consequences

Группа	Доля от всех аномалий, %	Ключевые события
Разрушение шин	53,5	Отклонения в гидроцилиндрах подвески (передняя – 65,1%, задняя – 30,8%) + превышение скорости на спуске
Отказ гидросистемы	31,5	Аварийный уровень масла + движение с поднятой платформой
Потеря управляемости	9	Аварийное давление в рулевом (6,6%) и тормозном управлении + превышение скорости на спуске (87,6%) + движение с поднятой платформой (5,6%)
Разрушение трансмиссии	6	Остановка ДВС под нагрузкой + переключение реверса без остановки + движение со стояночным тормозом

Корреляционный анализ совместного проявления аномалий позволил выявить следующие устойчивые паттерны:

Аварийное состояние рулевого управления срабатывало совместно с движением с поднятой платформой в 89% случаев. Это указывает на то, что водитель систематически начинает маневрирование при не приведенной к рабочему виду платформе, что создает чрезмерные нагрузки на рулевое управление.

В группе «Потеря управляемости» 87,5% времени фиксировалось превышение скорости на спуске: зарегистрированные значения достигали 39 км/ч при допустимых 30 км/ч. При этом в 79,6% случаев наблюдались три аномалии одновременно: превышение скорости, движение с поднятой платформой, аварийное давление в рулевом управлении.

50% совместного проявления превышения давления на передней подвеске и нарушения скоростного режима на спуске свидетельствует о существовании устойчивого эксплуатационного паттерна, при котором машина одновременно испытывает перегрузки по всем осям, особенно на передней.

Корреляционный анализ событий показывает, что действия машиниста носят системный характер и аномалии обусловлены именно стилем вождения, а не случайными отказами оборудования. Это открывает возможность для воздействия на поведение оператора через средства обратной связи. Учитывая опыт [33] и существующие исследования [34; 35], можно констатировать, что при избыточной визуализации вероятность игнорирования важных данных достигает 7–10%, а вот сфокусированный интерфейс обеспечивает самую эффективную концентрацию оператора и снижает вероятность аварийных ситуаций, что и стало основой для выбора показателей предиктивной диагностики и повышения надежности при эксплуатации.



Рис. 2
Индикаторы проекционного
экрана на лобовом стекле

Fig. 2
Heads-up display indicators
on the windshield

С учетом вышесказанного предложена концепция вывода на лобовое стекло всего трёх интегральных показателей (рис. 2) – «экологичное вождение», «комплексный запас хода» и «ходимость шин» – включающих обоснование возможного исключения аномалий:

1. Показатель «Экологичное вождение» формируется на основе анализа функций – движение с включенным стояночным тормозом, переключение реверса без полной остановки, превышение предельно допустимой скорости на спуске, остановка двигателя внутреннего сгорания под нагрузкой, данные системы контроля состояния оператора. На основе анализа этих параметров формируется цветовой индикатор (зеленый – все в норме, желтый – есть негрубые нарушения, красный – критический стиль вождения), выводимый на проекционный экран. Показатель выполняет две функции: предупреждение водителя о необходимости коррекции поведения в реальном времени и мотивирующий инструмент (возможность премирования по итогам смены на основе объективных данных). CAN-шина является основным каналом передачи диагностической информации на штатные приборы. Её отказ делает невозможным своевременное отображение любых параметров – от уровня жидкостей до давления в системах. Водитель теряет контроль над техническим состоянием машины, что в условиях горных работ создаёт недопустимые риски. Проекционный экран, имеющий резервное питание и альтернативные каналы получения данных, обеспечивает сохранение критической информации даже при пропадании связи с CAN-шиной. Это позволяет водителю безопасно завершить цикл работ и/или направить машину в ремонт, а не действовать интуитивно (рис. 2, П1).

2. При срабатывании индикатора «Комплексный запас хода» контролируются и анализируются – аварийный уровень масла, движение с поднятой платформой, наличие связи с CAN-шиной. Изменение состояния рабочих жидкостей – признак разгерметизации (в т.ч. резкое падение уровня масла – прямой признак разрыва рукава высокого давления). Штатные указатели уровня, расположенные на консоли, не обеспечивают мгновенной реакции водителя, сконцентрированного на маневрировании в карьере. Вывод данного параметра в показатель «комплексный запас хода» с цветовой индикацией (зелёный – жёлтый – красный) на лобовое стекло позволяет оценить техническое состояние агрегатов задействованных систем и предотвра-

тить их разрушение, используя предиктивную диагностику (рис. 2, П2).

3. «Ходимость шин» объединяет показатели превышения давления в цилиндрах задней и передней подвески, а также аварийное давление в задних и передних тормозных контурах. Давление в подвеске напрямую определяет равномерность нагрузки на шину. Перегруз одного колеса ведёт к его перегреву, расслоению каркаса и термомеханическому разрушению. Шины для карьерных самосвалов относятся к наиболее дорогостоящим расходным материалам, а их выход из строя создаёт аварийную ситуацию. Интеграция этих параметров в показатель «Ходимость шин» позволяет водителю в реальном времени видеть критические отклонения и корректировать нагрузку, скорость или немедленную остановку (рис. 2, П3).

Заключение

На основе анализа данных эксплуатации техники и построения диаграммы Парето выявлены ключевые типы аномалий и критических событий, приводящих к простоям, повышенному расходу материалов и риску аварийных ситуаций. Ключевой результат исследования – количественная оценка потенциального эффекта от внедрения HUD. Внедрение предложенной HUD-системы позволяет достичь следующих количественных результатов:

1. Сокращение аварийных простоев на 32% за счет своевременного предупреждения водителя о критических режимах и предотвращения развития отказов. Абсолютное снижение простоев составит ориентировочно 2139 мин за 5 мес, или около 428 мин в месяц.

2. Прямой экономический эффект для одиночного самосвала:

- потери от аварийных простоев за 5 мес – 6,685 млн руб. (1,337 млн руб/мес);

- стоимость внедрения HUD – от 50 до 250 тыс. руб. в зависимости от конфигурации;

- окупаемость достигается в течение одного месяца;

- эффект от снижения разрушения шин (53,5% всех аномалий). Комплект шин для БелАЗа 220 т стоит около 6 млн руб. Даже предотвращение одного выхода из строя шин за год окупает систему многократно;

- предотвращение отказов гидронасосов (31,5% аномалий). Стоимость ремонта гидравлической системы от 500 тыс. до 2 млн руб. Раннее обнаружение утечки через индикатор «комплексный запас хода» позволяет остановить машину до разрушения насоса.

3. Масштабирование на парк техники. Для парка из 10 самосвалов экономия только от сокращения аварийных простоев (без учета шин и гидравлики) составит 13 млн руб/мес.

4. Эргономичное решение HUD минимизирует риск пропуска критических сигналов за счёт ограничения информационного потока до трёх чётко структурированных индикаторов.

5. Техническая реализация не требует установки датчиков и может быть выполнена на существующих CAN-интерфейсах с организацией резервного питания и альтернативных каналов передачи.

Таким образом, внедрение HUD-системы для предиктивной диагностики с предложенным набором интегральных показателей является экономически эффективным решением для повышения надежности и снижения эксплуатационных затрат при работе карьерных самосвалов в экстремальных условиях горных предприятий.



Список литературы / References

1. Карпова С.В., Устинова О.Е. Технологические и маркетинговые тенденции в горнодобывающей промышленности. *Горная промышленность*. 2025;(3):170–179. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-170-179>
Karpova S.V., Ustinova O.E. Technological and marketing trends in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):170–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-170-179>
2. Шедько Ю.Н., Харченко К.В., Зуденкова С.А., Москвитина Е.И., Бабаян Л.К. Синергетический подход к управлению карьерами с применением больших данных и интеллектуальных систем предиктивной аналитики. *Горная промышленность*. 2025;(1):154–160. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-154-160>
Shedko Yu.N., Kharchenko K.V., Zudenkova S.A., Moskvitina E.I., Babayan L.K. A synergetic approach to openpit mine management using big data and intelligent predictive analytics systems. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):154–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-154-160>
3. Чернухин С.А., Кольцов Н.С., Бодров Д.А., Романов Н.С. Применение цифровых технологий с целью повышения эффективности карьерного автотранспорта. В кн.: *Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: материалы 6-й Всерос. науч.-практ. конф., г. Екатеринбург, 13 декабря 2024 г.* Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2025. С. 124–129. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/143216> (дата обращения: 27.12.2026).
4. 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>
5. Ганин А.Р., Самолазов А.В., Донченко Т.В. Стратегия развития и новая линейка карьерных экскаваторов производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» (группа ОМЗ). *Горная промышленность*. 2012;(4):28–33.
Ganin A.R., Samolazov A.V., Donchenko T.V. Development strategy and new line of mining excavators manufactured by IZ-KARTEX (OMZ Group). *Russian Mining Industry*. 2012;(4):28–33. (In Russ.)
6. Дорошев Ю.С., Нестругин С.В. *Повышение технологической надежности карьерных экскаваторов*. Владивосток: Изд-во ДВГТУ; 2009. 192 с.
7. Махараткин П.Н., Абдулаев Э.К., Вишняков Г.Ю., Ботян Е.Ю., Пушкарев А.Е. Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обоснования их рациональной скорости с помощью имитационного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6-2):237–250. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_237
Makharatkin P.N., Abdulaev E.K., Vishnyakov G.Yu., Botyan E.Yu., Pushkarev A.E. Increase of efficiency of dump trucks functioning on the basis of justification of their rational speed by means of simulation modeling. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6-2):237–250. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_237
8. Журавлев А.Г., Исаков М.В. Экспериментальные исследования работы карьерных автосамосвалов в условиях эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3-1):530–542. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-530-542>
Zhuravlev A.G., Isakov M.V. Experimental testing of open pit dump trucks in operating conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(3-1):530–542. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-530-542>
9. Вишняков Г.Ю., Пушкарев А.Е., Ботян Е.Ю., Хлопонина В.С. Обоснование рациональных режимов работы карьерных автосамосвалов при сверхнормативной эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):24–37. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_24
Vishnyakov G.Yu., Pushkarev A.E., Botyan E.Yu., Khloponina V.S. Justification of rational modes of operation of quarry dump trucks in case of over-normative operation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):24–37. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_24
10. Авксентьев С.Ю., Белоусов В.И. Определение рациональных параметров для безостановочной работы гидротранспортных систем в условиях низких температур. *Горная промышленность*. 2025;(1S):86–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91>
Avksentiev S.Yu., Belousov V.I. Determination of rational parameters for non-stop operation of hydraulic transport systems in low temperature conditions. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):86–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91>
11. Troyanovskaya I. Influence of mountain conditions on road fuel consumption (Example of the Republic of Tajikistan). *Transportation Research Procedia*. 2022;61:273–279. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.045>
12. Yi K., Feng H., Liu X. Analysis and optimization of stiffness damping characteristics on hydro-pneumatic suspension in mine dump truck. *Journal of Nantong University (Natural Science Edition)*. 2024;23(4):54–63. (In Chinese). <https://doi.org/10.12194/j.ntu.20231226001>
13. Pryalukhin A.F., Martyshev 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>



14. Назарычев А.Н., Дяченко Г.В., Сычев Ю.А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов. *Записки Горного института*. 2023;261:363–373. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16189> (дата обращения: 20.02.2026).
Nazarychev A.N., Dyachenok G.V., Sychev Y.A. A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:363–373. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16189> (accessed: 20.02.2026).
15. Андреева Л.И., Ушаков Ю.Ю. Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2016;(3):74–77. Режим доступа: <http://iuggu.ru/index.php/archive/xxi-vek/2016/3-2016/78-ru/479-14-3-16> (дата обращения: 18.01.2026).
Andreeva L.I., Ushakov Yu.Yu. Research of operational reliability of quarry dump trucks. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*. 2016;(3):74–77. (In Russ.) Available at: <http://iuggu.ru/index.php/archive/xxi-vek/2016/3-2016/78-ru/479-14-3-16> accessed: 18.01.2026).
16. Lan K., Yu W., Huang C., Zhou Y., Li Z., Huang W. Multi-objective optimization design for anti-fatigue lightweight of dump truck carriage combined with machine learning. *Advances in Mechanical Engineering*. 2024;16(9). <https://doi.org/10.1177/16878132241269244>
17. Власов Ю.А., Спиринов Е.Н., Ляпин А.Н., Ляпина О.В., Чечулин К.Н. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов. *Научное обозрение. Технические науки*. 2016;(5):37–44. Режим доступа: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1110> (дата обращения: 20.02.2026).
Vlasov Yu.A., Spirin E.N., Lyapin A.N., Lyapina O.V., Chechulin K.N. Analysis of the reasons of low operational reliability of career dump trucks. *Scientific Review. Technical science*. 2016;(5):37–44. (In Russ.) Available at: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1110> (accessed: 20.02.2026).
18. Рахутин М.Г., Занг К.К., Кривенко А.Е., Чан В.Х. Оценка влияния температуры рабочей жидкости на потери мощности карьерного гидравлического экскаватора. *Записки Горного института*. 2023;261:374–383. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16193> (дата обращения: 20.02.2026).
Rakhutin M.G., Giang K.Q., Krivenko A.E., Tran V.H. Evaluation of the influence of the hydraulic fluid temperature on power loss of the mining hydraulic excavator. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:374–383. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16193> (accessed: 20.02.2026).
19. Seifoori S., Parrany A.M., Khodayari M. A high-cycle fatigue failure analysis for the turbocharger shaft of BELAZ 75131 mining dump truck. *Engineering Failure Analysis*. 2020;116:104752. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104752>
20. Carman D.S.I.A.B., Zainuri A.M. Analisis Perawatan pada Unit Dump Truck FMX 440 Kapasitas 30 Ton dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM). *AI-DYAS*. 2024;3(3):1070–1079. <https://doi.org/10.58578/aldyas.v3i3.3642>
21. Luo C., Gao J., Xue J., Zhang Z. Fatigue and fracture performance of sealing ring of hydraulic lifting system of dump truck under different working conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1177/09544089241304291>
22. Long L.X., Van Quynh L., Tuan N.V., Chau N.M., Minh N.K. A study on the nonlinear characteristics of hydro-pneumatic suspension systems for mining dump trucks. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2025;15(1):20249–20257. <https://doi.org/10.48084/etasr.9744>
23. Сычев Ю.А., Назарычев А.Н., Дяченко Г.В. Повышение безопасности труда водителей карьерных самосвалов путем снижения риска возникновения отказов функциональных узлов тягового электропривода в условиях эксплуатации. *Безопасность труда в промышленности*. 2023;(9):52–58. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-9-52-58>
Sychev Yu.A., Nazarychev A.N., Dyachenok G.V. Improving the labor safety of mining dump truck drivers by reducing the risk of failure of the functional units of the traction electric drive under operating conditions. *Occupational Safety in Industry*. 2023;(9):52–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-9-52-58>
24. Mikhailov A.V., Bouguebrine C. Analysis excavator equipping with lidar sensors for functionality improving. *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*. 2026;39(6):1414–1421. Available at: https://www.ije.ir/article_226623.html (accessed: 20.02.2026).
25. Zadkov D.A., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Demin A.Y., Pogrebnoy A.V., Kuleshova E.E., Valuev D.V. Mathematical modeling of operational reliability of mine lifting equipment based on censored data. *Mathematics*. 2026;14(4):716. <https://doi.org/10.3390/math14040716>
26. Клебанов А.Ф., Сиземов Д.Н., Кадочников М.В. О Комплексный подход к удаленному мониторингу технического состояния и режимов эксплуатации карьерного автосамосвала. *Горная промышленность*. 2020;(2):75–81. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-2-75-81>
Klebanov A.F., Sizemov D.N., Kadochnikov M.V. Integrated approach to remote monitoring of technical and operating conditions of mine dump trucks. *Russian Mining Industry*. 2020;(2):75–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-2-75-81>
27. Moniri-Morad A., Sattarvand J. A comparative study between the system reliability evaluation methods: case study of mining dump trucks. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023;70:103. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00272-y>



28. Ботян Е.Ю., Лавренко С.А., Пушкарев А.Е. Методика уточненного расчета межремонтного периода элементов подвески карьерных автосамосвалов посредством учета горнотехнических условий их эксплуатации. *Горная промышленность*. 2024;(1):71–76. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-71-76>
Botyan E.Y., Lavrenko S.A., Pushkarev A.E. Methodology for refined calculation of mean time to repair of mining dump truck suspension elements with account of mining and technical conditions of their operation. *Russian Mining Industry*. 2024;(1):71–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-71-76>
29. Горячкин Б.С., Гаранов К.В., Бгатцев А.В. Повышение эргономичности транспортных средств путем внедрения проекционных дисплеев. *E-SCIO*. 2020;(6):104–118. Режим доступа: <https://e-scio.ru/wp-content/uploads/2020/06/Горячкин-Б.-С.-Гаранов-К.-В.-Бгатцев-А.-В..pdf> (дата обращения: 20.02.2026).
Goryachkin B.S., Garanov K.V., Bgattsev A.V. Improving the ergonomics of vehicles by introducing projection displays. *E-SCIO*. 2020;(6):104–118. (In Russ.) Available at: <https://e-scio.ru/wp-content/uploads/2020/06/Горячкин-Б.-С.-Гаранов-К.-В.-Бгатцев-А.-В..pdf> (accessed: 20.02.2026).
30. Малина К.А. Повышение безопасности эксплуатации автомобиля за счет применения HUD технологии. В кн.: Халиков А.Р. (ред.) *Инновационные подходы в решении научных проблем: сб. тр. по материалам 13-й Междунар. конкурса науч.-исслед. работ, г. Уфа, 22 мая 2023 г.* Уфа: НИЦ «Вестник науки»; 2023 С. 24–31.
31. AlHayek S., Souib S., Meechang K., Medini K. Exploring agile methods application in manufacturing. In: Thürrer M., Riedel R., von Cieminski G., Romero D. (eds) *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Volatile, Uncertain, Complex, and Ambiguous Environments. APMS 2024. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 732. Cham: Springer; 2024, pp. 48–60. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71637-9_4
32. Поцбенева И.В. *Средства и методы управления качеством*. Воронеж: Изд-во ВГТУ; 2021. 35 с.
33. Jahed A., Moghaddam R.T. Mathematical modeling for a flexible manufacturing scheduling problem in an intelligent transportation system. *Interdisciplinary Journal of Management Studies*. 2021;14(1):189–208. <https://doi.org/10.22059/ijms.2020.261618.673203>
34. Буйленко В.Я., Жанказиев С.В., Дементенко В.В., Короткова Ю.А., Гаврилюк М.В. *Психологические особенности человека при управлении автомобильным транспортом*. М.: Изд-во МАДИ; 2017. 172 с.
35. Боханцев Т.Ф., Подгорный А.И. Особенности методологии расчета ТКВЧ. *Вестник науки*. 2024;2(11):1181–1186. Режим доступа: <https://www.вестник-науки.рф/article/18601> (дата обращения: 20.02.2026).
Bokhantsev T.F., Podgorny A.I. Features of methodology for calculating tonne-kilometers per hour. *Science Bulletin*. 2024;2(11):1181–1186. (In Russ.) Available at: <https://www.вестник-науки.рф/article/18601> (accessed: 20.02.2026).

Информация об авторах

Махараткин Павел Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9376-061X>; e-mail: Pavelnik@spmi.ru
Тарабрина Елизавета Андреевна – студент специальности горные транспортные системы кафедры горных машин и комплексов, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Information about the authors

Pavel N. Makharatkin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mining Machinery and Complexes, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9376-061X>; e-mail: Pavelnik@spmi.ru
Elizaveta A. Tarabrina – Student Majoring in Mining Transport Systems of the Department of Mining Machinery and Complexes, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.05.2026
Поступила после рецензирования: 29.07.2026
Принята к публикации: 13.08.2026

Article info

Received: 20.05.2026
Revised: 29.07.2026
Accepted: 13.08.2026