ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):28-46
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 656.13 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_28

МЕТОД МНОГОУРОВНЕВОЙ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Р.Н. Сафиуллин[1], Р.Р. Сафиуллин[1], А.В. Хохлов[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: lehasport98@mail.ru

Аннотация: Рассматривается проблема обеспечения функциональной безопасности карьерных самосвалов в процессе их эксплуатации. Анализ статистики отказов показал, что выход из строя элементов электрооборудования обусловлен экстремальными условиями эксплуатации карьерных самосвалов, которые подвергаются воздействию агрессивных факторов: значительных колебаний температур, высокой запыленности, повышенной влажности, а также интенсивных тепловых и вибрационных нагрузок. Цель исследования заключается в обеспечении требуемой эффективности функционирования системы перевозочного процесса и восстановления транспортных средств в течение заданного времени путем обоснования рациональных параметров рассматриваемой системы на основе моделирования и оценки функциональной безопасности, при которой минимизируются затраты на построение и функционирование данной системы. Достижение цели, поставленной в работе, осуществляется путем решения научной задачи, состоящей в разработке совокупности взаимосвязанных моделей и методик обоснования рациональных параметров системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств на основе моделирования и оценки ее эффективности, при которых обеспечивается требуемая эффективность функционирования данной системы в течение заданного времени при минимуме затрат. В работе применен комплексный подход, включающий системный анализ, теорию графов, методы экспертных оценок и анализ иерархий. Разработана методика количественной оценки эффективности системы восстановления функциональной безопасности, учитывающая внешние и внутренние факторы.

Ключевые слова: функциональная безопасность, карьерные самосвалы, отказ, электрические и электронные системы, метод многоуровневой оценки, метод анализа иерархий, интегрированные интеллектуальные технологии, интеллектуальные транспортные системы.

Для цитирования: *Сафиуллин Р. Н., Сафиуллин Р. Р., Хохлов А. В.* Метод многоуровневой оценки функциональной безопасности карьерных самосвалов в процессе их эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 28–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_28.

Multilevel evaluation of functional safety of dump trucks during operation in open pit mines

R.N. Safiullin[1], R.R. Safiullin[1], A.V. Hohlov[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: lehasport98@mail.ru

Abstract: The article discusses functional safety of dump trucks during operation in open pit mines. The fault statistics analysis shows that failure of components of electric equipment is conditioned by extreme operating conditions of dump trucks exposed to impact of aggressive factors: great temperature fluctuations, high dust content and humidity, as well heavy heat and vibration loading. The goal of the research is to ensure efficient functioning of a transportation process system and recovery of dump trucks within the assigned time through justification of rational parameters of the system under consideration by way of modeling and evaluation of functional safety at minimized cost of construction and operation of this system. The goal achievement includes solution of a scientific problem connected with the development of a set of interconnected models and procedures for substantiating rational parameters of functional safety of the system on the basis of functional safety modeling and evaluation. These rational parameters should ensure efficient function of the system within the preset time period and at the minimum cost. This study used an integrated approach including the system analysis, theory of graphs, methods of expert evaluations and the analysis of hierarchies. The procedure developed for the quantitative evaluation of the functional safety recovery efficiency takes into account external and internal influences.

Key words: functional safety, open pit dump trucks, failure, electric and electronic systems, multilevel evaluation method, hierarchy analysis method, integrated intelligent technologies, intelligent transport systems.

For citation: Safiullin R. N., Safiullin R. R., Hohlov A. V. Multilevel evaluation of functional safety of dump trucks during operation in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2):28-46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_28.

Введение

Современные предприятия минерально-сырьевого комплекса активно используют карьерные самосвалы для транспортировки горных пород при открытой разработке месторождений [1]. При этом значительная часть эксплуатационных расходов, достигающая 70% от общей себестоимости добычи, связана именно с транспортировкой [2]. Однако существенная доля этих затрат обусловлена необходимостью восстановления работоспособности транспортных средств в связи с отказами электрических и электронных систем управления [3]. Особенно остро эта проблема проявляется в условиях карьеров, где оборудование работает при экстремальных нагрузках, а простои из-за отказов ведут к значительным финансовым потерям [4]. По данным исследования [5], «анализ 326 отказов электрических и электронных систем управления карьерных самосвалов за 2018 — 2022 гг. показал, что 35% повреждений приходятся на обмотку статора генератора, а 29% — на подшипниковый узел, при этом затраты на восстановление синхронного тягового генератора составляют 75% от общих расходов на ремонт комплекта тягового электропривода». Структура причин отказов и продолжительность простоев карьерных самосвалов БелАЗ за 2018 г. приведены в табл. 1 [6]. В таблице приняты сокращения: ДВС — двигатель внутреннего сгорания; РМК — редуктор мотор-колеса; ЦОМ — цилиндр опрокидывающего механизма; ГМП — гидромеханическая передача; РЗМ — редуктор заднего моста.

Таким образом, выход из строя элементов электрооборудования обуслов-

Таблица 1

Отказы узлов и простои самосвалов [6]
Node failures and dump truck downtime [6]

Наименование причины отказа	БелАЗ-7555		БелАЗ-75581	
	общее количество отказов	часы простоя на 1 ед. ТС	общее количество отказов	часы простоя на 1 ед. ТС
ДВС	135	220	142	246
Электрооборудование	117	32	102	37
ГМП	21	39	—	—
РЗМ	18	29	—	—
Шиномонтажные работы	38	42	27	42
Гидросистема	191	42	17	36
Тормозная система	188	39	113	56
ЦОМ	65	54	24	32
Ходовая часть	657	147	752	138
Сварные работы	113	48	95	24
РМК	—	—	245	289
Итого	1543	692	1517	900

лен экстремальными условиями эксплуатации карьерных самосвалов, которые подвергаются воздействию агрессивных факторов: значительных колебаний температур, высокой запыленности, повышенной влажности, а также интенсивных тепловых и вибрационных нагрузок.

На сегодняшний день горная отрасль сталкивается с парадоксом: чем выше уровень автоматизации, тем больше разрыв между технологическими возможностями техники и методами обеспечения ее функциональной безопасности [7]. В условиях интенсивной эксплуатации в различных климатических зонах и при экстремальных нагрузках требования к функциональной безопасности карьерных самосвалов становятся особенно актуальными. Устойчивость электрических и электронных систем управления к внешним воздействиям, включая вибрации, перепады температур и механические перегрузки, напрямую влияет на бесперебойность работы техники [8]. В этой связи функциональная безопасность карьерных самосвалов становится ключевым фактором эффективности современных горнодобывающих предприятий.

С развитием автономных технологий и цифровизацией производственных процессов традиционные подходы к обеспечению функциональной безопасности уже не отвечают вызовам, связанным с эксплуатацией карьерных самосвалов, которые представляют собой сложные киберфизические комплексы, где механическая надежность сочетается с интеллектуальными системами управления, телематикой и алгоритмами автономного принятия решений [9]. Однако именно эта сложность создает новые риски — от программных сбоев до каскадных отказов, требующих принципиально иных методов анализа и управления функциональной безопасностью [10]. Согласно ГОСТ Р ИСО 26262, функциональная безопасность — это отсутствие неоправданного риска вследствие опасностей, вызванных отклонением от предписан-

ного функционирования электрических и электронных систем.

Функциональная безопасность современных карьерных самосвалов обеспечивается комплексом взаимосвязанных систем управления, каждая из которых выполняет критически важные функции по предотвращению аварийных ситуаций и обеспечению устойчивой работы в экстремальных условиях эксплуатации. К числу таких систем относятся:

1. Системы управления силовой установкой и трансмиссией, включающие электронный блок управления двигателем, который осуществляет непрерывный мониторинг рабочих параметров (обороты коленчатого вала, температура охлаждающей жидкости, давление моторного масла) и предотвращает выход за критические эксплуатационные режимы. Система адаптивного управления трансмиссией обеспечивает оптимальное переключение передач с учетом текущей нагрузки и профиля дорожного покрытия, тем самым минимизируя динамические нагрузки на узлы и агрегаты;

2. Системы активной безопасности, включающие:

• датчики угла наклона кузова и гироскопические системы, анализирующие пространственное положение машины и предотвращающие риск опрокидывания;

• адаптивная подвеска, автоматически регулирующая демпфирующие характеристики в зависимости от условий движения;

• антиблокировочная система тормозов и система динамической стабилизации, исключающая потерю управляемости при экстренном торможении;

3. Автоматизированные системы управления движением, к которым относятся:

• адаптивный круиз-контроль, поддерживающий безопасную дистанцию между транспортными средствами;

• системы предотвращения столкновений на основе радарных, лидарных и видеокамерных технологий;

• алгоритмы автоматического торможения при обнаружении препятствий;

4. Аварийные системы защиты, такие как:

• автоматическая система аварийной остановки при возникновении критических неисправностей;

• комплекс пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения;

• система ограничения скорости при превышении допустимой грузоподъемности;

5. Телематические системы, обеспечивающие дистанционный мониторинг параметров работы, передачу данных в диспетчерский центр и экстренную связь в аварийных ситуациях.

Эффективность обеспечения функциональной безопасности карьерных самосвалов определяется степенью интеграции перечисленных систем, их отказоустойчивостью и соответствием международным и российским стандартам (табл. 2).

Однако существующие подходы, разработанные для техники предыдущего поколения, зачастую не учитывают динамическую природу современных перевозочных процессов, влияние цифровых платформ на работу электрических и электронных систем управления и последствия различных стратегий обеспечения функциональной безопасности.

Несмотря на существующие исследования, посвященные повышению надежности отдельных узлов карьерных самосвалов (таких как двигатели внутреннего сгорания, ходовые части и редукторы), вопросы, связанные с функциональной безопасностью, изучены недостаточно глубоко.

В этой связи обеспечение функциональной безопасности требует принципиально новых подходов, сочетающих

Таблица 2

Нормативные требования по обеспечению функциональной безопасности электрических и электронных систем управления [составлено авторами]
Regulatory requirements for ensuring the functional safety of electrical and electronic control systems [compiled by the authors]

Наименование стандарта	Требования
ГОСТ Р ИСО 26262-1-2020 «Дорожные транспортные средства. Функциональная безопасность»	– Требования к мерам по выполнению менеджмента функциональной безопасности, проектирования, реализации, верификации, валидации, а также к мерам их подтверждения; – Требования к взаимодействию между заказчиками и поставщиками
ГОСТ IEC 61508-3-2018 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью»	– Требования к предотвращению и управлению систематическими отказами; – Требования к инструментальным средствам поддержки, используемым для разрабатываемой и конфигурируемой системы, связанной с безопасностью; – Требования к стадиям жизненного цикла системы безопасности и действиям, которые должны предприниматься в процессе проектирования и разработки программного обеспечения, связанного с безопасностью; – Требования к информации, относящейся к вопросам подтверждения соответствия аспектов программного обеспечения безопасности системы, которая должна передаваться в организацию, выполняющую интеграцию E/E/PE системы; – Требования к подготовке информации и процедур, касающихся программного обеспечения, которое необходимо пользователям для эксплуатации и технического обслуживания E/E/PE системы, связанной с безопасностью; – Требования, предъявляемые к организациям, выполняющим модификацию программного обеспечения, связанного с безопасностью
ГОСТ ISO 13849-1-2014 «Безопасность оборудования. Элементы систем управления, связанные с безопасностью»	– Требования безопасности и общие принципы конструирования элементов систем управления, связанных с безопасностью (SRP/CS); – Требования к SRP/CS, которые используют программируемые системы

динамический мониторинг критических параметров работы систем, адаптивные алгоритмы прогнозирования отказов и многоуровневую архитектуру защиты, способную минимизировать последствия как механических, так и кибернетических угроз в реальном времени.

Как было отмечено, современные карьерные самосвалы представляют собой сложные киберфизические системы, интегрирующие аппаратные и программные решения для обеспечения функциональной безопасности и эффективности эксплуатации.

На рис. 1 представлена схема интегрированных интеллектуальных технологий, включая системы телеметрии, автономного управления, цифровые сервисы и платформы для обработки больших данных. Эти технологии обеспечивают непрерывный мониторинг параметров работы, минимизацию рисков для

персонала и адаптацию к экстремальным условиям карьеров. Их внедрение позволяет сократить эксплуатационные расходы за счет прогнозирования отказов [11].

Таким образом, ключевым элементом современных систем является использование технологий V2X, IoT и 5G, которые обеспечивают высокоскоростную передачу данных между самосвалами, диспетчерскими центрами и инфраструктурой. Это создает основу для реализации концепции «цифрового двойника» транспорта, где каждый параметр работы анализируется в реальном времени [12].

Такая интеграция особенно актуальна для глубоких карьеров, где традиционные методы контроля недостаточно эффективны [13].

Для реализации интеллектуальных технологий, представленных на рис. 1, требуется сложное программное обеспечение, способное обрабатывать разнородные данные и принимать решения в реальном времени. На рис. 2 показана архитектура алгоритмов, включая распознавание дорожной обстановки, обработку сенсорных данных, управление движением и взаимодействие с оператором. Эти алгоритмы объединены в единый контур управления, что обеспечивает устойчивость работы даже при частичных отказах.

Представленные алгоритмы демонстрируют, как комбинация технического

Рис. 1. Интегрированные интеллектуальные технологии [составлено авторами]
Fig. 1. Integrated intelligent technologies [compiled by the authors]

Рис. 2. Интегрированные интеллектуальные технологии по программному обеспечению эффективного функционирования транспорта [составлено авторами]

Fig. 2. Integrated intelligent technologies for software support of efficient functioning of transport [compiled by the authors]

зрения, навигации и дополненной реальности повышает точность управления. Например, полноразмерное видеоизображение с обзором в 360° и наложением тактических карт позволяет оператору или автономной системе оценивать обстановку без «мертвых зон» [14]. Кроме того, обработка данных диагностики в реальном времени сокращает время реакции на критические события, что соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 26262 по функциональной безопасности.

Таким образом, выявленное в предметной области несоответствие между необходимостью эффективного применения карьерных самосвалов в различных условиях, их возрастающими функциональными возможностями и возможностями существующей системы обеспечения перевозочного процесса и восстановления транспортных средств определило цель исследования, заключающуюся в обеспечении требуемой эффективности функционирования системы перевозочного процесса и восстановления транспортных средств в течение заданного времени путем обоснования рациональных параметров рассматриваемой системы на основе моделирования и оценки функциональной безопасности, при которой минимизируются затраты на построение и функционирование данной системы.

Методы

В основе обоснования рациональных параметров различных систем лежит ряд общенаучных методов, к которым относятся: теория игр, общая теория систем, теория надежности структурно-сложных систем, методы исследования операций, прямого поиска экстремума, нелинейное программирование и другие. Разработанные общенаучные основы позволяют серьезно развивать теоретическую и методологическую базу обеспечения системы перевозочного процесса транспортными средствами в целом и обоснования рациональных параметров доставки грузов и пассажиров [15].

Проведенный информационно-патентный поиск показал, что имеется ряд близких по теме данного исследования работ, в которых авторы внесли большой вклад в развитие теоретических основ и методологической базы обеспечения перевозочного процесса транспортных средств в общем, и обоснования рациональных параметров и структур систем восстановления и обеспечения перевозочного процесса транспортных средств в частности, но представленный в них научно-методический аппарат не позволяет обеспечить достижение поставленной цели исследования [16, 17]. Так, в ряде научных работ не учитывается влияние интегрированных технологий транспортных средств на эффективность перевозочного процесса [18, 19].

В работах [20, 21] вопросы внедрения технологий, интегрированных в систему обеспечения перевозочного процесса и восстановления или ремонта транспортных средств, в надсистемы более высокого уровня не рассматриваются, а применяемые методики не позволяют учесть влияние уровня внедрения интегрированных технологий в систему обеспечения перевозочного процесса на степень и структуру функциональной безопасности транспортных средств (рассматривается соотношение количества систем управления на транспортном средстве и общего объема выполняемой транспортной работы, что в различных эксплуатационных условиях неприемлемо).

Работы [22, 23] посвящены также вопросам исследования производственных процессов обеспечения перевозочного процесса карьерных самосвалов в различных условиях, оптимизации их параметров и методам оценки их эффективности. Основное внимание уделяется повышению эффективности перевозок, оценке рабочих параметров, а также совершенствованию организации труда. В частности, изучаются принципы формирования специализированных бригад, технологии восстановления горной техники, а также вопросы рационализации использования ремонтных служб и оборудования.

В ряде исследований главным ограничением научно-методического аппарата является использование нормативного подхода (коэффициентных методик) в определении качественных и количественных характеристик систем управления карьерных самосвалов, где не учитывается обстановка в динамике действий перевозочного процесса [24, 25]. В данных работах отсутствует комплексный учет параметров, характеризующих структуру системы обеспечения перевозочного процесса и восстановления высокоавтоматизированных горных машин в течение заданного времени путем обоснования рациональных параметров рассматриваемой системы на основе моделирования и оценки функциональной безопасности карьерных самосвалов.

Анализ данных работ позволил выявить несоответствие в науке между необходимостью обосновать рациональные параметры системы обеспечения пере-

возочного процесса и восстановления функциональной безопасности транспортных средств в различных условиях и возможностями существующего научно-методического аппарата, который не позволяет:

• учесть влияние интегрированных технологий на систему обеспечения перевозочного процесса и восстановления функциональной безопасности транспортных средств;

• детально учесть влияние уровня внедрения интегрированных технологий в перевозочный процесс на степень и структуру производственного процесса;

• осуществить комплексный анализ параметров, определяющих организационную структуру системы управления перевозочным процессом и поддержания эксплуатационной надежности транспортных средств. На основе полученных данных требуется решить задачу оптимизации с целью определения наиболее эффективных значений рассматриваемых показателей, учитывая влияние внедрения интегрированных технологических решений на результативность перевозок.

Существующие методические разработки не дают возможности точно определить ключевые параметры организации перевозок и восстановления функциональной безопасности подвижного состава, которые позволили бы системе устойчиво функционировать в заданных временных рамках с максимальной эффективностью и минимальными затратами.

Эффективность обеспечения перевозочного процесса транспортными средствами определяется способностью рассматриваемой системы обеспечить требуемый уровень ее технической готовности к заданному моменту времени. Затраты на обеспечение перевозочного процесса и восстановления функциональной безопасности транспортных средств в достаточных объемах может быть осуществлено за время, не превышающее заданное, только за счет создания необходимого резерва, адекватно отражающего его функционирование. Однако это потребует существенных затрат материальных ресурсов, хотя эффективность функционирования системы будет весьма высока. Компенсировать потери времени можно путем повышения производительности транспортной работы или увеличения средств интегрированных технологий на определенном уровне рассматриваемой системы.

Восстановление функциональной безопасности транспортных средств, у которых возник эксплуатационный отказ систем управления, в достаточном количестве, адекватно отражающем необходимость в их использовании в ходе дальнейшей эксплуатации, и жесткость временных рамок функционирования системы восстановления требуют решения задачи по критерию «эффективность — стоимость — время» [26 — 28].

Для постановки научной задачи необходимо вначале формализовать факторы, оказывающие влияние на систему восстановления функциональной безопасности транспортных средств. Анализ факторов, действующих на систему восстановления функциональной безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС), позволил выделить основные из них (рис. 3).

Как видно из рис. 3, на систему восстановления функциональной безопасности напрямую влияют параметры ремонтного фонда — количество и состояние ВАТС с отказами. Эти параметры (количество ВАТС с отказами по функциональной безопасности Y_0 или эксплуатационными отказами X_0) зависят от внешних факторов, связанных с транспортной инфраструктурой (ТИ).

К внешним факторам, определяющим ТИ, относятся: свойства и состоя-

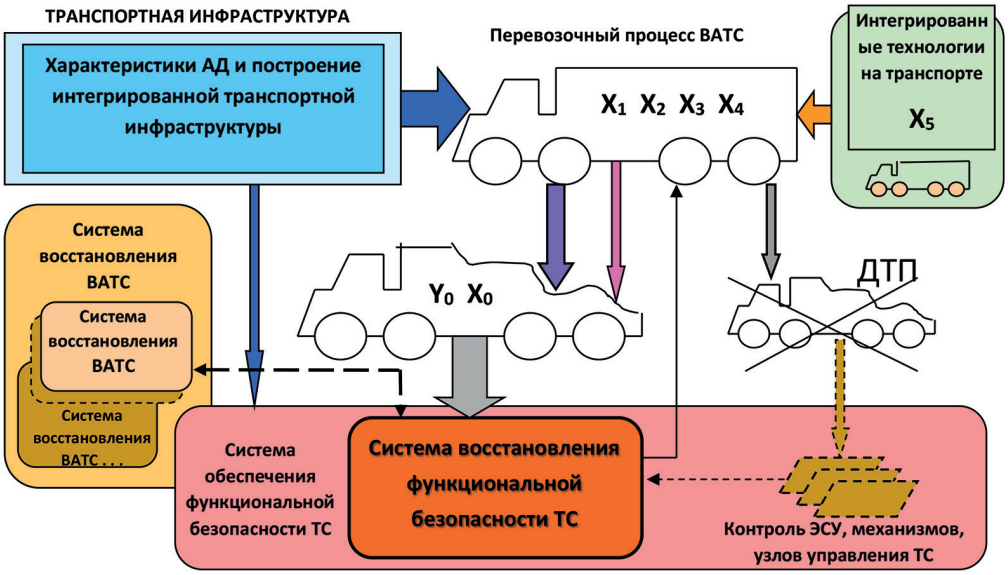

Рис. 3. Совокупность факторов, действующих на систему восстановления функциональной безопасности транспортных средств [составлено авторами]

Fig. 3. A set of factors affecting the system of restoration of functional safety of vehicles [compiled by the authors]

ние автомобильных дорог, а также построение интеллектуальных транспортных систем, включая инфраструктуру, функционирующую с целью обеспечения устойчивого и безопасного процесса перевозок грузов и пассажиров $Y_{пр}$.

Процесс по перемещению грузов и пассажиров с использованием ВАТС характеризуется следующими факторами: подвижной состав X_1, технико-эксплуатационные характеристики ВАТС X_2, технические характеристики ТС X_3, ремонтно-технологические характеристики электронных систем управления (ЭСУ) ТС X_4, а также эксплуатационные факторы, воздействующие на перевозочный процесс ТС X_5.

Кроме внешних факторов, на систему восстановления функциональной безопасности транспортных средств действуют внутренние факторы G, которые оказывают непосредственное влияние на устойчивую, безопасную и эффективную работу и включают в себя подсистемы технического обслуживания и ремонта ЭСУ G_1, а также подсистемы функциональной безопасности подвижного состава G_2 (определяют возможности системы по диагностированию ЭСУ); подсистемы обеспечения перевозочным процессом G_3 (определяют обеспеченность необходимым для технической эксплуатации машин имуществом).

Достижение цели, поставленной в работе, осуществляется путем решения научной задачи, состоящей в разработке совокупности взаимосвязанных моделей и методик обоснования рациональных параметров системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств на основе моделирования и оценки эффективности ее функционирования, при которых обеспечивается требуемая эффективность функционирования данной системы в течение заданного времени при минимуме затрат.

Формализованная постановка данной научной задачи имеет следующий вид:

$$C_в\left(G / X_{св}, Y_{пр}\right) \to \min_{G \in \Omega_2},$$
$$Э_в\left(G / X_{св}, Y_{пр}\right) \geq Э_{в.тр}, \qquad (1)$$
$$T_в\left(G / X_{св}, Y_{пр}\right) \leq T_{зад},$$

где $C_в$ — суммарные затраты на построение и функционирование системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств; G — варьируемые параметры, характеризующие структуру системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств; $X_{св}$ — параметры, характеризующие ВАТС; $Y_{пр}$ — параметры, характеризующие ТИ; $\Omega_в$ — область допустимых значений параметров, характеризующих структуру системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств; $Э_в$ — показатель эффективности функционирования системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств; $Э_{в.тр}$ — требуемое значение показателя эффективности; $T_в$ — время функционирования системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств; $T_{зад}$ — заданное время функционирования системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств.

По существу, решение задачи сводится к определению таких значений параметров, характеризующих структуру системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств $G \in \Omega_в$ (при заданных характеристиках ВАТС $Y_{пр}$ и $X_{св}$), при которых обеспечивается требуемая эффективность ее функционирования $Э_{в.тр}$ в течение заданного времени $T_{зад}$ при минимуме затрат.

Решение поставленной научной задачи требует разработки совокупности взаимосвязанных моделей и методик, обоснования рациональных параметров системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств на основе моделирования и оценки эффективности ее функционирования.

При этом частными задачами исследования являются:

- разработка методики количественной оценки показателя эффективности функционирования системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств, позволяющей учесть влияние на данный показатель внешних факторов, действующих на рассматриваемую систему, а также результатов функционирования самой системы;
- разработка модели обеспечения функциональной безопасности транспортных средств;
- разработка методики прогноза эксплуатационных отказов в ЭСУ ВАТС в ходе перевозочного процесса;
- разработка комплексной модели функционирования системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств, позволяющей имитировать многоуровневый процесс ее ремонта в ходе эксплуатации;
- разработка методики формирования стоимостных зависимостей системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств, проведение анализа оптимизационной задачи и выбор метода ее решения.

Как следует из представленной схемы (рис. 4), исследование проводится в четыре этапа.

На первом этапе на основе проведенного системного анализа определяются необходимые для решения научной задачи исходные данные. На втором этапе разрабатываются методики и модели количественной оценки показателя эффективности системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств. На третьем этапе разрабатывается многоуровневая комплексная модель функционирования системы

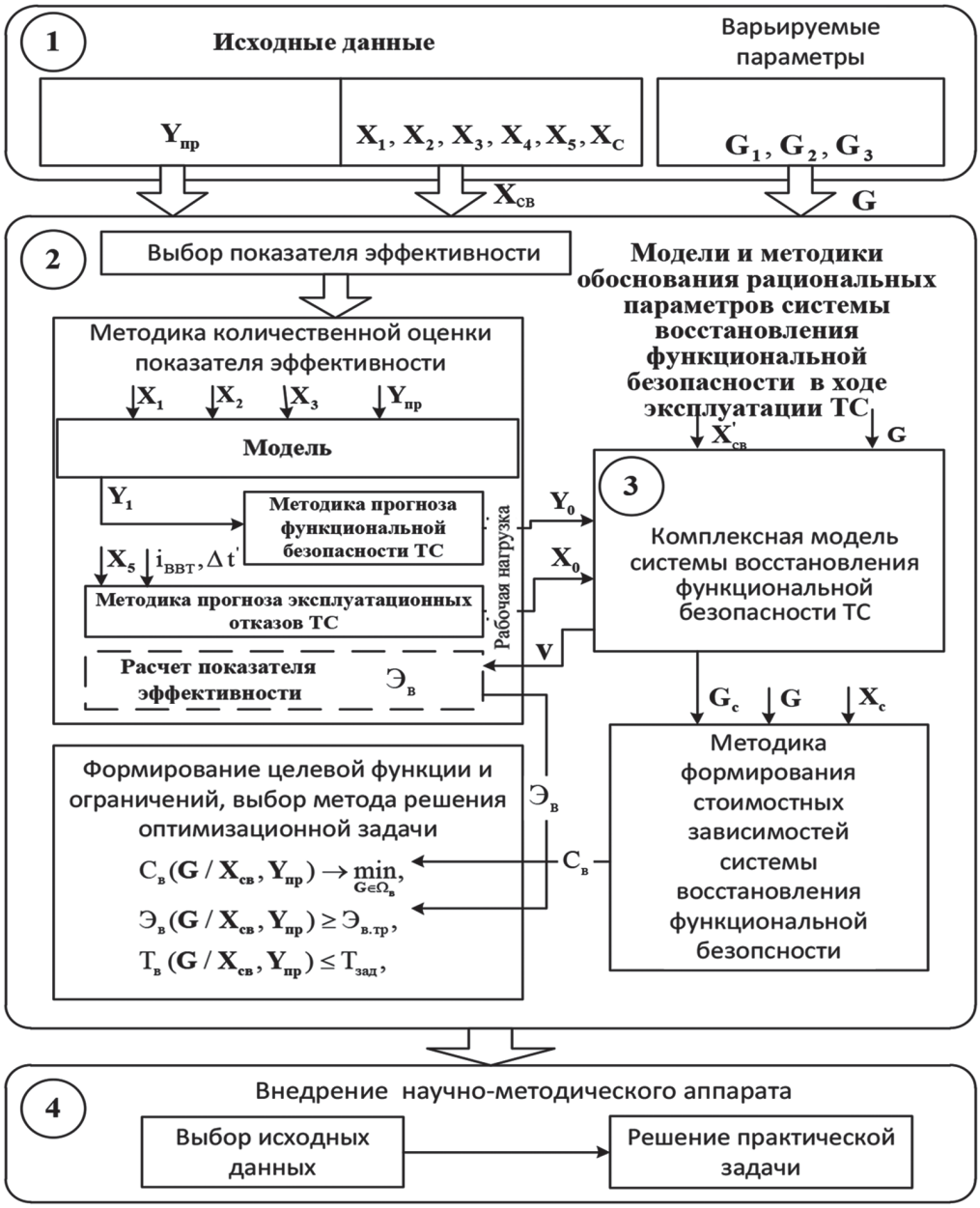

Рис. 4. Схема исследования функциональной безопасности транспортных средств [составлено авторами]

Fig. 4. Scheme of the study of functional safety of vehicles [compiled by the authors]

восстановления функциональной безопасности транспортных средств. На четвертом этапе осуществляется практическое решение поставленной задачи по обоснованию рациональных параметров системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств в ходе эксплуатации на основе имита-

ционного моделирования и оценки эффективности ее функционирования.

Результаты

Методика количественной оценки показателя эффективности функционирования системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств подразумевает последовательность действий в виде алгоритма, являющихся шагами к решению сложной задачи, включающей множество критериев.

На начальном этапе построения методики необходимо проанализировать нормативно-правовую документацию на предмет требований к обеспечению функциональной безопасности подвижного состава с последующим определением и обоснованием критериев.

Для достижения указанных целей необходимо с помощью метода экспертных оценок сформировать матрицу критериев с последующей оценкой их весомости [29]:

$$\begin{cases} Y = \{y_1, y_2, y_3 \ldots y_n\} \\ P(Y) = 80\% \end{cases}, \qquad (2)$$

где Y — Парето-оптимальное множество критериев; y_1, y_2, y_3, … y_n — множество критериев функциональной безопасности подвижного состава; P — вероятность выбора экспертами того или иного критерия.

При этом следует создать различные сочетания базовых элементов функциональной безопасности подвижного состава, рассматриваемые далее как конкурирующие альтернативы при выборе оптимальной конфигурации.

В этой связи для получения решения данной многокритериальной задачи были использованы фундаментальные положения теории графов:

$$G = (X;\ U), \qquad (3)$$

где G — это граф, через который будет выражена рациональная структура функциональной безопасности транспортных средств; X — вершина графа, через которую выражаются основные элементы структуры; U — дуги графа, которые объединяют элементы структуры и создают конкурирующие комбинации.

Следующим этапом разработки методики является формирование конкурирующих комбинаций, включающих не

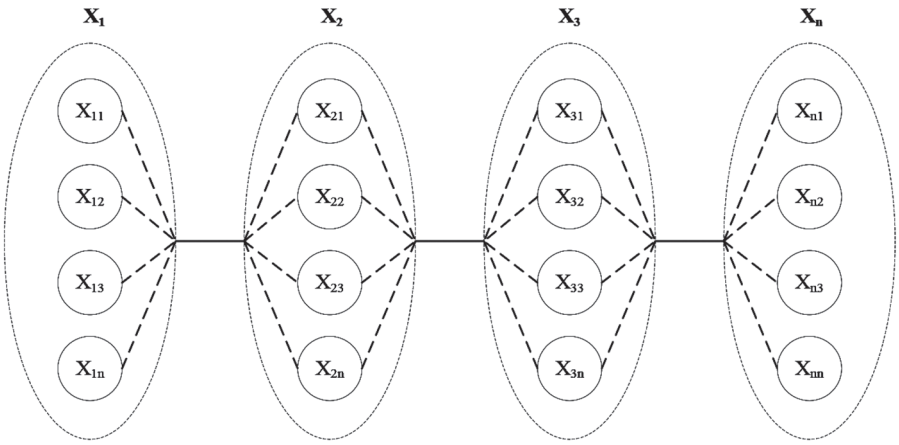

Рис. 5. Графы, описывающие структуру функциональной безопасности транспортных средств [составлено авторами]

Fig. 5. Graphs describing the structure of functional safety of vehicles [compiled by the authors]

менее одной вершины каждого слоя графа (рис. 5).

При решении многокритериальной задачи строится древовидная структура, начинающаяся с целевого показателя системы на верхнем уровне. Средний уровень содержит ключевые критерии, влияющие на нижестоящие элементы, а базовый уровень включает альтернативные варианты компонентов. Для определения значимости критериев применяется метод парных сравнений с использованием шкалы относительной важности, разработанной Т. Саати, доказавшей свою эффективность в подобных исследованиях (табл. 3) [30].

Определение вектора локального приоритета производится через расчет множества собственных векторов для каждой матрицы сравнений с последующей нормализацией полученных значений к единичной шкале.

В качестве примера рассмотрим процедуру вычисления для матрицы парных сравнений критериев второго уровня иерархической структуры. Алгоритм расчета компонентов собственных векторов для данной матрицы осуществляется по следующей формуле:

$$k_1 = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} k_{1i}} \,. \qquad (4)$$

Нормирование вектора приоритетов достигается делением его компонентов на суммы соответствующих столбцов матрицы:

$$x_1 = \frac{k_1}{k_{11} + k_{12} + k_{13} + k_{1n}} \,. \qquad (5)$$

Первый локальный приоритет вычисляется как произведение матрицы критериев второго уровня на нормированный вектор весов:

Таблица 3

Иерархия экспертных сравнений соотношения критериев [30]
Hierarchy of expert comparisons and criteria ratios [30]

№	Суждение	Пояснение
1	Нулевая дифференциация	Альтернативы обладают идентичной ценностью относительно целевого показателя
2	Минимальное превосходство	Пограничное состояние между равенством и умеренным превосходством
3	Умеренное превосходство	Экспертная оценка фиксирует незначительное превосходство одного варианта
4	Повышенное превосходство	Переходный уровень между умеренным и явным превосходством
5	Явное превосходство	Объективные данные подтверждают существенное преимущество альтернативы
6	Значительное превосходство	Промежуточная степень между явным и критическим превосходством
7	Критическое превосходство	Опыт эксперта позволяет считать одну из альтернатив гораздо предпочтительнее другой
8	Экстремальное превосходство	Пограничное состояние перед абсолютным приоритетом
9	Абсолютный приоритет	Наличие неопровержимых доказательств подавляющего преимущества

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{3n} \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & k_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Расчет приоритетов альтернатив третьего уровня выполняется аналогично. Метод предполагает синтез через умножение матрицы локальных приоритетов нижнего уровня на вектор глобальных приоритетов вышестоящего уровня, что обеспечивает каскадное агрегирование оценок и конечный выбор оптимальной структуры.

Обсуждение результатов

Разработанная методика многоуровневой оценки функциональной безопасности карьерных самосвалов представляет собой подход, который выгодно отличается от традиционных нормативных методов своей динамичностью и адаптивностью. В отличие от статичных коэффициентных моделей, она учитывает реальные условия эксплуатации, что особенно важно для карьерной техники. Использование комбинации экспертных оценок, теории графов и методов анализа иерархий позволяет не только выявлять критические угрозы для систем управления, но и оптимизировать их работу в режиме реального времени. Особенно ценно, что методика интегрирует современные цифровые технологии (V2X, IoT, 5G), создавая основу для предиктивного обслуживания и минимизации простоев.

Однако стоит отметить, что эффективность такого подхода во многом зависит от качества исходных данных и вычислительных мощностей, что может стать ограничением в условиях некоторых карьеров. Тем не менее, сама концепция многоуровневой оценки открывает новые перспективы для повышения надежности сложных киберфизических систем в горнодобывающей отрасли.

Полученные результаты полностью подтверждают первоначальную гипотезу о том, что применение методики многоуровневой оценки функциональной безопасности, основанной на интеграции современных технологий и адаптивных алгоритмов, позволит повысить надежность карьерных самосвалов. Это даст возможность минимизировать финансовые потери и улучшить показатели безопасности в горнодобывающей отрасли.

Заключение

Таким образом, с использованием совокупности методов была разработана методика количественной оценки показателя эффективности функционирования системы восстановления функциональной безопасности транспортных средств, которая позволяет определить Парето-оптимальное множество критериев, на основе которых будет определяться рациональная структура функциональной безопасности транспортных средств.

Результаты исследования:

- обоснована необходимость перехода от традиционных нормативных подходов к динамической многоуровневой системе оценки, интегрирующей аппаратные и программные решения для прогнозирования отказов;
- разработана модель, сочетающая методы экспертных оценок, теорию графов и анализ иерархий, что позволило формализовать критерии функциональной безопасности и оптимизировать структуру защитных систем;
- предложен алгоритм адаптивного управления, основанный на технологиях V2X, IoT и 5G, обеспечивающий мониторинг критических параметров в реальном времени и минимизацию рисков каскадных отказов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ilyushin Y. V.*, *Nosova V. A.* Development of mathematical model for forecasting the production rate // International Journal of Engineering. 2025, vol. 38, pp. 1749—1757. DOI: 10.5829/ije.2025.38.08b.02.

2. *Kuznetsov D., Kosolapov A.* Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment // Transportation Research Procedia. 2022, vol. 63, pp. 1042—1048. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.104.

3. *Салимов А. Э.*, *Шибанов Д. А.*, *Иванов С. Л.* Риски отказов карьерного экскаватора, связанные с его техническим обслуживанием и ремонтом // Горная промышленность. — 2024. — № 2. — С. 97—102. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-97-102.

4. *Череповицын А. Е.*, *Дорожкина И. П.*, *Соловьева В. М.* Прогнозы потребления редкоземельных металлов в России: базовые и формирующиеся отрасли промышленности // Проблемы прогнозирования. — 2024. — № 5(206). — С. 115—127. DOI: 10.47711/0868-6351-206-115-127.

5. *Назарычев А. Н.*, *Дяченок Г. В.*, *Сычев Ю. А.* Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов // Записки Горного института. — 2023. — Т. 261. — С. 363—373.

6. *Кузин Е. Г.*, *Пудов Е. Ю.*, *Дубинкин Д. М.* Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 2. — С. 55—61. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-55-61.

7. *Братских Д. С.*, *Ромашева Н. В.*, *Конопелько А. Ю.*, *Николайчук Л. А.* Модель управления цепями поставок в нефтегазовой отрасли с использованием цифровых технологий // Нефтяное хозяйство. — 2024. — № 7. — С. 120—125. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-7-120-125.

8. *Хамидов О. У.*, *Шибанов Д. А.*, *Шишкин П. В.*, *Колпаков В. О.* Эффективность применения экскаваторов на карьерах Узбекистана // Горная промышленность. — 2024. — № 5. — С. 135—142. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-135-142.

9. *Лигоцкий Д. Н.*, *Долгушин Н. А.* Анализ опыта применения безлюдных технологий при открытой разработке месторождений и перспективы их развития // Горный журнал. — 2025. — № 2. — С. 42—47. DOI: 10.17580/gzh.2025.02.06.

10. *Liu S., Wang X., Hassanin O., Xu X., Yang M., Hurwitz D., Wu X.* Calibration and evaluation of responsibility-sensitive safety (RSS) in automated vehicle performance during cut-in scenarios // Transportation research. Part C: Emerging Technologies. 2021, vol. 125, article 103037. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103037.

11. *Невская М. А.*, *Беляев В. В.*, *Пастернак С. Н.*, *Виноградова В. В.*, *Шагидулина Д. И.* Оценка потенциального ущерба почвам от аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на территории арктического региона // Север и рынок: формирование экономического порядка. — 2024. — Т. 27. — № 3 (85). DOI: 10.37614/2220-802X.3.2024.85.007.

12. *Жуковский Ю. Л.*, *Сусликов П. К.* Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — № 16(3). — С. 895—908. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.

13. *Гусев В. Н.*, *Одинцов Е. Е.*, *Жерлыгина Е. С.* Расчет сдвижений и деформаций массива горных пород с учетом натурных данных // Горный журнал. — 2025. — № 4. — С. 18—25. DOI: 10.17580/gzh.2025.04.03.

14. *Симаков А. С.*, *Масько О. Н.*, *Николаев М. Ю.* Система технического зрения для оценки качества кварцевого сырья // Цветные металлы. — 2025. — № 5. — С. 81—88. DOI: 10.17580/tsm.2025.03.12.

15. *Shojaee Barjoee S., Rodionov V., Vaziri Sereshk A. M.* Noise climate assessment in ceramic industries (Iran) using acoustic indices and its control solutions // Advances in Environmental Technology. 2025, vol. 11, no. 1, pp. 91—115. DOI: 10.22104/aet.2024.6922.1899.

16. *Fedorova E. R.*, *Morgunov V. V.*, *Pupysheva E. A.* Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement // Non-ferrous Metals. 2024, vol. 1, pp. 28—34. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.05.

17. *Shojaee Barjoee S., Rodionov V. A.* Respirable dust in ceramic industries (Iran) and its health risk assessment using deterministic and probabilistic approaches // Pollution. 2024, vol. 10, no. 4, pp. 1206—1226. DOI: 10.22059/poll.2024.376043.2360.

18. *Авксентьев С. Ю.*, *Белоусов В. И.* Определение рациональных параметров для безостановочной работы гидротранспортных систем в условиях низких температур // Горная промышленность. — 2025. — № 1S. — С. 86—91. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91.

19. *Babyr N. V.* Topical themes and new trends in mining industry: Scientometric analysis and research visualization // International Journal of Engineering. 2024, vol. 37, no. 2, pp. 439—451. DOI: 10.5829/ije.2024.37.02b.18.

20. *Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К.* Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов // Записки Горного института. — 2025. — Т. 275. — С. 5—17. EDN HPZAGK.

21. *Aramrattana M., Larsson T., Jansson J., Nabo A.* A simulation framework for cooperative intelligent transport systems testing and evaluation // Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behavior. 2019, vol. 61, pp. 268—280. DOI: 10.1016/j.trf.2017.08.004.

22. *Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В.* Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. — 2020. — № 241. — С. 10—21. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.

23. *Грабский А. А., Сергеев В. Ю., Грабская Е. П.* Обоснование выбора стратегии технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов // Уголь. — 2021. — № 2. — С. 14—17. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.

24. *Салихов Р. Ф., Бердников И. Е.* Метод расчета годовой продолжительности проведения технических обслуживаний и ремонтов для отечественных и зарубежных экскаваторов с течением наработки // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2024. — № 21(1). — С. 26—37. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-1-26-37.

25. *Комиссаров А. П., Масленников О. А., Набиуллин Р. Ш., Хорошавин С. А.* Оценка степени противодействия двигателей приводов главных механизмов карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. — 2022. — № 6. — С. 10—16. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-10-16.

26. *Kruk M. N., Shabalina A. Yu.* Optimization of the investment portfolio for oil and gas projects under conditions of risk and uncertainty // Journal of Infrastructure, Policy and Development. 2025, vol. 9, no. 2, article 10928. DOI: 10.24294/jipd10928.

27. *Xu Z., Wang X., Wang X., Zheng N.* Safety validation for connected autonomous vehicles using large-scale testing tracks in high-fidelity simulation environment // Accident Analysis & Prevention. 2025, vol. 215, article 108011. DOI: 10.1016/j.aap.2025.108011.

28. *Moradloo N., Mahdinia I., Khattak A. J.* Safety in higher level automated vehicles: Investigating edge cases in crashes of vehicles equipped with automated driving systems // Accident Analysis & Prevention. 2024, vol. 203, article 107607. DOI: 10.1016/j.aap.2024.107607.

29. *Yadav P., Yadav S., Singh D., Kapoor R. M., Giri B. S.* An analytical hierarchy process based decision support system for the selection of biogas up-gradation technologies // Chemosphere. 2022, vol. 302, article 134741. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134741.

30. *Tavana M., Soltanifar M.*, Santos-*Arteaga F. J.* Analytical hierarchy process: Revolution and evolution // Annals of Operations Research. 2023, vol. 326, no. 2, pp. 879—907. DOI: 10.1007/s10479-021-04432-2. ГИАБ

REFERENCES

1. Ilyushin Y. V., Nosova V. A. Development of mathematical model for forecasting the production rate. *International Journal of Engineering*. 2025, vol. 38, pp. 1749—1757. DOI: 10.5829/ije.2025.38.08b.02.

2. Kuznetsov D., Kosolapov A. Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment. *Transportation Research Procedia*. 2022, vol. 63, pp. 1042—1048. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.104.

3. Salimov A. E., Shibanov D. A., Ivanov S. L. Failure risks of mine excavator associated with its maintenance and repair. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 2, pp. 97—102. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-97-102.

4. Cherepovitsyn A. E., Dorozhkina I. P., Solov'eva V. M. Forecasts of rareearth elements consumption in Russia: basic and emerging industries. *Problems of Forecasting*. 2024, no. 5(206), pp. 115—127. [In Russ]. DOI: 10.47711/0868-6351-206-115-127.

5. 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, vol. 261, pp. 363—373. [In Russ].

6. Kuzin E. G., Pudov E. Yu., Dubinkin D. M. Analysis of failures of mining dump truck components under operating conditions. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021, no. 2, pp. 55—61. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-55-61.

7. Bratskikh D. S., Romashova N. V., Konopelko A. Yu., Nikolaichuk L. A. A model of supply chain management in the oil and gas industry using digital technologies. *Oil industry*. 2024, no. 7, pp. 120—125. [In Russ]. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-7-120-125.

8. Khamidov O. U., Shibanov D. A., Shishkin P. V., Kolpakov V. O. Efficiency of excavators application in open pit mines of Uzbekistan. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 5, pp. 135—142. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-135-142.

9. Ligotsky D. N., Dolgushin N. A. Analysis of experience in the use of unmanned technologies in open pit mining and prospects for their development. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 2, pp. 42—47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.02.06.

10. Liu S., Wang X., Hassanin O., Xu X., Yang M., Hurwitz D., Wu X. Calibration and evaluation of responsibility-sensitive safety (RSS) in automated vehicle performance during cut-in scenarios. *Transportation research. Part C: Emerging Technologies*. 2021, vol. 125, article 103037. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103037.

11. Nevskaya M. A., Belyaev V. V., Pasternak S. N., Vinogradova V. V., Shagidulina D. I. Accidental oil spills in the Arctic: An assessment of potential soil damage. *The North and the Market: Forming the Economic Order*. 2024, vol. 27, no. 3 (85). [In Russ]. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2024.85.007.

12. Zhukovsky Yu. L., Suslikov P. K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, no. 16(3), pp. 895—908. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.

13. Gusev V. N., Odintsov E. E., Zherlygina E. S. Calculation of rock mass displacements and deformations based on field data. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 4, pp. 18—25. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.04.03.

14. Simakov A. S., Masko O. N., Nikolaev M. Y. Technical vision system for quartz raw material quality assessment. *Tsvetnye Metally*. 2025, no. 5, pp. 81—88. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2025.03.12.

15. Shojaee Barjoee S., Rodionov V., Vaziri Sereshk A. M. Noise climate assessment in ceramic industries (Iran) using acoustic indices and its control solutions. *Advances in Environmental Technology*. 2025, vol. 11, no. 1, pp. 91—115. DOI: 10.22104/aet.2024.6922.1899.

16. Fedorova E. R., Morgunov V. V., Pupysheva E. A. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement. *Non-ferrous Metals*. 2024, vol. 1, pp. 28—34. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.05.

17. Shojaee Barjoee S., Rodionov V. A. Respirable dust in ceramic industries (Iran) and its health risk assessment using deterministic and probabilistic approaches. *Pollution*. 2024, vol. 10, no. 4, pp. 1206—1226. DOI: 10.22059/poll.2024.376043.2360.

18. 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 Journal*. 2025, no. 1S, pp. 86—91. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1S-86-91.

19. Babyr N. V. Topical themes and new trends in mining industry: Scientometric analysis and research visualization. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 2, pp. 439—451. DOI: 10.5829/ije.2024.37.02b.18.

20. Zhukovskii Yu. L., Suslikov P. K. Identification and classification of electrical loads in mining enterprises based on signal decomposition methods. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 275, pp. 5—17. [In Russ].

21. Aramrattana M., Larsson T., Jansson J., Nabo A. A simulation framework for cooperative intelligent transport systems testing and evaluation. *Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behavior*. 2019, vol. 61, pp. 268—280. DOI: 10.1016/j.trf.2017.08.004.

22. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020, no. 241, pp. 10—21. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.

23. Grabsky A. A., Sergeev V. Yu., Grabskaya E. P. Rationale for choosing a strategy for maintenance and repair of quarry excavators. *Ugol'*. 2021, no. 2, pp. 14—17. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.

24. Salikhov R. F., Berdnikov I. E. Method for calculating annual duration of maintenance and repairs of domestic and foreign excavators considering time in service. *The Russian Automobile and*

Highway Industry Journal. 2024, no. 21(1), pp. 26 — 37. [In Russ]. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-1-26-37.

25. Komissarov A. P., Maslennikov O. A., Nabiullin R. S., Khoroshavin S. A. Assessment of the degree of counteraction of the drive motors of the main mechanisms of the quarry excavator. *Mining equipment and electromechanics*. 2022, no. 6, pp. 10 — 16. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-10-16.

26. Kruk M. N., Shabalina A. Yu. Optimization of the investment portfolio for oil and gas projects under conditions of risk and uncertainty. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 2025, vol. 9, no. 2, article 10928. DOI: 10.24294/jipd10928.

27. Xu Z., Wang X., Wang X., Zheng N. Safety validation for connected autonomous vehicles using large-scale testing tracks in high-fidelity simulation environment. *Accident Analysis & Prevention*. 2025, vol. 215, article 108011. DOI: 10.1016/j.aap.2025.108011.

28. Moradloo N., Mahdinia I., Khattak A. J. Safety in higher level automated vehicles: Investigating edge cases in crashes of vehicles equipped with automated driving systems. *Accident Analysis & Prevention*. 2024, vol. 203, article 107607. DOI: 10.1016/j.aap.2024.107607.

29. Yadav P., Yadav S., Singh D., Kapoor R. M., Giri B. S. An analytical hierarchy process based decision support system for the selection of biogas up-gradation technologies. *Chemosphere*. 2022, vol. 302, article 134741. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134741.

30. Tavana M., Soltanifar M., Santos-Arteaga F. J. Analytical hierarchy process: Revolution and evolution. *Annals of Operations Research*. 2023, vol. 326, no. 2, pp. 879 — 907. DOI: 10.1007/s10479-021-04432-2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сафиуллин Равилл Нуруллович[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: safravi@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8765-6461,
Сафиуллин Руслан Равиллович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: safiullin_rr@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2315-3678,
Хохлов Алексей Владимирович[1] — аспирант,
e-mail: lehasport98@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2771-1318,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Хохлов А.В., e-mail: lehasport98@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.N. Safiullin[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: safravi@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8765-6461,
R.R. Safiullin[1], Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor,
e-mail: safiullin_rr@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2315-3678,
A.V. Hohlov[1], Graduate Student,
e-mail: lehasport98@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2771-1318,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199026, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.V. Hohlov, e-mail: lehasport98@mail.ru.

Получена редакцией 23.05.2025; получена после рецензии 02.07.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 23.05.2025; received after the review 02.07.2025; accepted for printing 10.01.2026.