Центр под эгидой ЮНЕСКО

Международный центр компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО

Статья подготовлена при содействии АНО «Международный центр компетенций в горнотехническом образовании» под эгидой ЮНЕСКО

ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень / MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-2):137-152

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.684 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_137

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДА К ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕМОНТОВ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ИХ УЗЛОВ

Е.Ю. Ботян[1], Л.А. Николайчук[1], А.Н. Мартемьянова[1], Е.И. Степук[1], А.Е. Пушкарев[2]

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

[2] Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Учитывая исключительно важную роль карьерных автосамосвалов в общей технологической цепочке добычи полезного ископаемого, в качестве объекта исследований был выбран узел с наибольшей частотой отказов – подвеска. Авторами предложен метод количественной оценки группы параметров технологической трассы транспортирования, обусловленной осложненными горнотехническими условиями эксплуатации. При помощи данных с двух горных предприятий за трехлетний период наблюдений была установлена зависимость между сокращением срока службы подвесок автосамосвалов и каждым из выявленных факторов групп параметров трассы. Оценка проводилась с использованием данных систем удаленного мониторинга, установленных на машины. На основе полученной зависимости был определен критерий рационализации межремонтного периода подвесок автосамосвалов, учитывающий совокупность планово-экономических факторов. Данный критерий позволяет принимать решения о целесообразности мероприятий, направленных на обеспечение заданного уровня надежности рассматриваемого узла в рамках принятой на предприятиях стратегии технического обслуживания, сочетающей плановые и аварийные ремонты узлов и агрегатов горных машин. С применением предложенного критерия было определено оптимальное соотношение между количеством планировочной и транспортной техники при формировании парка техники. На основе предлагаемого критерия также разработан алгоритм определения рационального межремонтного интервала для подвесок автосамосвалов. Внедрение данного алгоритма на рассматриваемых в исследовании горных предприятиях позволило значительно сократить продолжительность простоев, вызванных отказами подвески, а также время, затрачиваемое на ремонт.

Ключевые слова: карьерный автосамосвал, надежность, горнотехнические условия, эксплуатация, сервис, ремонт, подвеска, горное предприятие, простой, транспортная система, затраты.

Для цитирования: *Ботян Е. Ю., Николайчук Л. А., Мартемьянова А. Н., Степук Е. И., Пушкарев А. Е.* Совершенствование подхода к организации технических ремонтов карьерных автосамосвалов при помощи систем удаленного мониторинга их узлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 137–152. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_137.

Improving the approach to the organization of technical repairs of dump trucks using remote monitoring systems of their nodes

E.Y. Botyan[1], L.A. Nikolaichuk[1], A.N. Martemyanova[1], E.I. Stepuk[1], A.E. Pushkarev[2]

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

[2] Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: Given the critically important role of haul trucks in the overall mineral extraction process chain, the suspension system — the component with the highest failure frequency — was selected as the research object. The authors propose a method for quantitatively assessing a group of parameters of a technological transportation route due to challenging mining operating conditions. Using data from two mining enterprises over a three-year period, dependence was established between the reduction in the service life of dump truck suspensions and each of the identified factors in the route parameter groups. The assessment was carried out using data from remote monitoring systems installed on the vehicles. Based on the derived dependence, a criterion for optimizing the overhaul interval of haul truck suspensions was developed, incorporating a set of planning and economic factors. This criterion allows decisions to be made on the advisability of implementing measures aimed at achieving a target reliability level for the suspension system within the framework of the maintenance strategy adopted by mining enterprises, which combines scheduled and emergency repairs of machine components and assemblies. Using the proposed criterion, an optimal ratio between grading equipment and haulage equipment was determined when forming the vehicle fleet. Furthermore, an algorithm for determining a rational overhaul interval for haul truck suspensions was developed based on this criterion. Implementation of the algorithm at the mining enterprises under study has significantly reduced both the duration of unplanned downtime caused by suspension failures and the time required for repair activities.

Key words: dump truck, reliability, mining conditions, exploitation, service, repair, suspension, mining enterprise, downtime, transportation system, expenses.

For citation: Botyan E. Y., Nikolaichuk L. A., Martemyanova A. N., Stepuk E. I., Pushkarev A. E. Improving the approach to the organization of technical repairs of dump trucks using remote monitoring systems of their nodes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-2):137-152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_137.

Введение

В настоящее время ведущие мировые горнодобывающие компании отказываются от стратегии линейного наращивания объемов добычи твердых полезных ископаемых за счет увеличения числа применяемой техники и переходят к повышению эффективности ее эксплуатации [1, 2], обусловливает необходимость пересмотра существующих подходов к использованию каждого элемента технологической цепочки извлечения минерального сырья [3—4]. Именно по этой причине повышение эффек-

тивности функционирования объектов по добыче полезных ископаемых является предметом пристального внимания со стороны множества ученых.

В структуре себестоимости добычи полезного ископаемого значительную долю составляют транспортные расходы, достигающие в отдельных случаях 70%. Основным видом технологического транспорта на горных предприятиях, осуществляющих разработку месторождений железной руды открытым способом, являются большегрузные карьерные автосамосвалы, на долю которых приходится по разным оценкам от 50 до 80% всего грузопотока полезного ископаемого [5, 6]. Указанное обусловлено тем, что на большинстве карьеров наблюдается увеличение глубины нижних рабочих горизонтов [7], рост величины руководящего уклона трасс [8], ухудшение качества верхнего дорожного слоя покрытия технологических дорог и т.д. [9, 10]. В совокупности эти условия приводят к появлению дополнительных требований к обоснованию стратегий технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов [11, 12].

Немаловажным аспектом, обуславливающим актуальность настоящего исследования, является уход с российского рынка в 2022 г. большинства международных производителей горной техники. Это привело к прекращению доступа к информационным базам, содержащим накопленную статистику по отказам отдельных элементов техники на различных горных предприятиях, к регламентам по восстановлению их работоспособности, инструментам мониторинга текущего технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Кроме того, стало невозможным взаимодействие с техническими службами указанных компаний, включая подачу запросов и получение экспертных рекомендаций по вопросам эксплуатации и ремонта техники.

Согласно имеющимся исследованиям [13, 14], при эксплуатации различных моделей карьерных автосамосвалов в усложненных горнотехнических условиях, именно элементы подвески демонстрируют наибольшую частоту отказов среди всех узлов и агрегатов этих машин. Учитывая объективную сложность и зачастую невозможность существенного изменения условий эксплуатации большегрузных самосвалов, для ремонтно-механических служб горных предприятий, осуществляющих открытую разработку месторождений твердых полезных ископаемых, обоснование рациональной стратегии технического обслуживания и ремонта именно подвески приобретает ключевое значение.

Сегодня на предприятиях горной отрасли в России при обосновании мероприятий по поддержанию установленного уровня надежности автосамосвалов применяются различные подходы по учету негативного влияния, в том числе горнотехнических условий [15, 16]. Среди них наибольшее распространение получили следующие два подхода:

I. На основе статического анализа причин и периодичности отказов оборудования. Этот подход требует сбора и классификации информации об отказах однотипных объектов.

II. На основе контроля технического состояния элементов и узлов машины в сочетании с прогнозированием их остаточного ресурса. Этот подход требует непрерывного и удаленного мониторинга технического состояния объекта.

Горнодобывающие предприятия России, осуществляющие открытую разработку рудных месторождений, оснащены автоматизированными системами удаленного мониторинга технического состояния применяемой техники [17—19]. Даже самая устаревшая из таких систем оснащена модулями для формирования, хранения и обработки отчетов

о простоях, вызванных отказами узлов горной техники [20, 21]. Это позволяет применять первую модель даже на предприятиях со относительно скромными инвестициями в цифровизацию производственных процессов [22, 23].

Выбор первой модели дополнительно обоснован тем, что на предприятиях горной отрасли, за исключением удаленного мониторинга электромеханического оборудования машин при использовании систем «Wenco», «VIMS» и «Карьер», непрерывный мониторинг технического состояния узлов и элементов карьерных автосамосвалов встречается сравнительно редко. Это связано с необходимостью значительных капитальных затрат на приобретение специализированного оборудования и программного обеспечения, стоимость которых может достигать сотен миллионов рублей [24]. Зачастую контролируемые в ходе мониторинга параметры ограничиваются лишь теми, которые позволяют оценить лишь основные эксплуатационные показатели карьерных автосамосвалов [25], а именно: величину преодоленного машиной расстояния за смену, вес перевезенной горной массы, текущую скорость движения, количество выполненных рейсов за смену и т.п. [26, 27]. Следует отметить то, что описанные системы обладают значительным потенциалом для применения благодаря возможности мониторинга широкого спектра параметров, отражающих техническое состояние узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов [28 — 30].

В связи с изложенным выше, для дальнейшего рассмотрения будет взят подход к проведению ремонтных работ элементов подвески карьерных автосамосвалов, базирующийся на статическом анализе причин и периодичности их отказов. С целью снижения длительности простоев по внешним причинам, вызванных отказом подвески, следует выявить зависимость между факторами, обуславливающими осложненные горнотехнические условия эксплуатации техники, и величиной их срока службы, а также провести ее учет при уточнении существующих мероприятий по поддержанию установленного уровня надежности подвесок этих машин [31 — 32].

Методы исследований

В качестве выходного параметра, характеризующего негативное воздействие осложненных горнотехнических условий эксплуатации, предлагается использовать величину сокращения срока службы подвески карьерных автосамосвалов ΔT, как разницу между номинальным сроком службы, установленным заводом-изготовителем, и фактически зафиксированным в процессе эксплуатации.

Для оценки степени влияния осложненных горнотехнических условий эксплуатации карьерных автосамосвалов на сокращение срока службы их подвесок были выбраны два предприятия, осуществляющих добычу железной руды: Ковдорский горно-обогатительный комбинат (ГОК), на котором разработка одноименного месторождения ведется в пределах одного карьера, и Качканарский ГОК, на котором производится отработка открытым способом с использованием шести карьеров сразу двух месторождений: Гусевогорского и Собственно Качканарского (СКМ).

С целью установления искомой зависимости из всего парка карьерных автосамосвалов рассматриваемых предприятий были выбраны те, которые удовлетворяют следующим требованиям:

- автосамосвалы задействованы для перевозки руды или вскрыши с незначительно варьирующимися физико-механическими свойствами;
- маршруты транспортирования самосвалов не изменяются кроме как при перемещении фронта погрузочных работ;

Таблица 1

Распределение моделей и количества задействованных автосамосвалов по маршрутам горно-обогатительных комбинатов [составлено авторами]
Distribution of dump truck models and their quantities deployed along mining and processing plant routes [compiled by the authors]

ГОК	Номер маршрута	Модель задействованного автосамосвала	Количество задействованных автосамосвалов
Качканарский	1	БЕЛАЗ-75303	2
	2		4
	3		2
	4		3
	5	БЕЛАЗ-75131	6
Ковдорский	6	БЕЛАЗ-75131	8
	7		4
	8	БЕЛАЗ-75303	5
	9		3

• самосвалы управляются одними и теми же операторами, что сводит к минимуму варьирование фактора квалификации водителя;

• вес горной массы и ее распределение по площади кузова соответствуют спецификациям паспорта ведения погрузочных работ, принятому на предприятии;

• машины обладают одинаковым сроком службы.

Из парка, состоящего из 143 автосамосвалов, указанным требованиям соответствуют 37 единиц карьерных автосамосвалов двух моделей: БЕЛАЗ-75303 грузоподъемностью 220 т и БЕЛАЗ-75131 грузоподъемностью 131 т. Сведения об автосамосвалах, рассматриваемых в дальнейшем исследовании, а также их распределение по маршрутам транспортирования руды и вскрышных пород представлены в табл. 1.

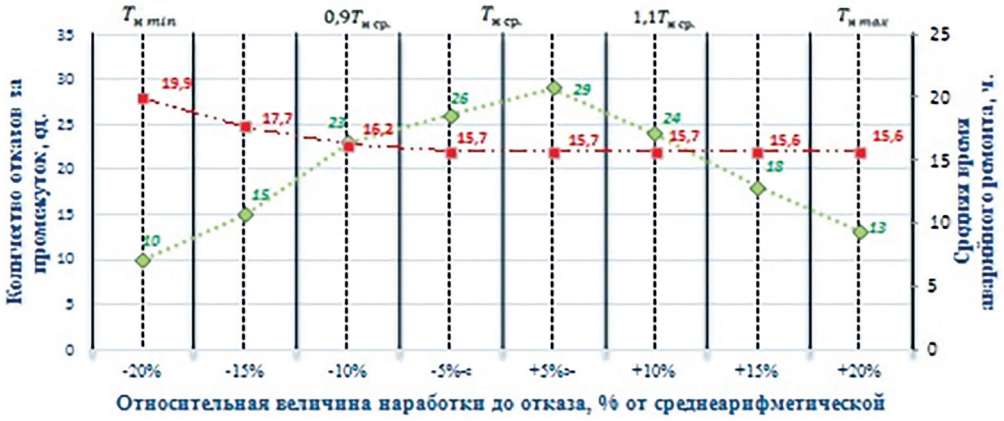

Рис. 1. Графическая зависимость числа отказов подвески и средней продолжительности их ремонта от величины наработки до отказа за 2020-2022 гг. [составлено авторами]

Fig. 1. Graphical dependence of the number of suspension failures and the average duration of their repair on the operating time before failure for 2020-2022 [compiled by the authors]

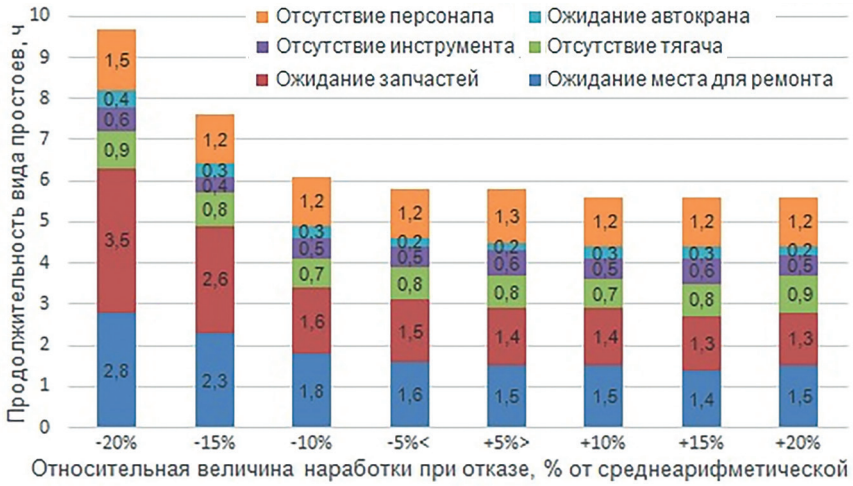

Рис. 2. Гистограмма, отображающая удельный вес каждой из причин возникновения простоев по внешним причинам вследствие отказа подвески за 2020–2022 гг. [составлено авторами]

Fig. 2. Histogram showing the specific weight of each of the causes of downtime due to external reasons due to suspension failure for 2020–2022 [compiled by the authors]

На основании анализа журналов ремонтно-механических служб исследуемых предприятий, включающих данные о 158 случаях выхода подвесок из работоспособного состояния за 2020—2022 гг., установлено, что для отказов, произошедших при наработке до отказа в диапазоне от минимальной до 90% от средней, продолжительность ремонтных работ рассматриваемого узла оказалась значительно выше в сравнении с остальными диапазонами (рис. 1). Полученные данные объясняются тем, что ремонтные службы горных предприятий не были в достаточной степени подготовлены к отказам, возникшим на столь раннем этапе эксплуатации. Результатом чего стала нехватка необходимых для своевременного проведения ремонтных работ запасных частей, инструмента, персонала и т.д. (рис. 2), что привело к увеличению продолжительности простоев по внешним причинам, а также к увеличению времени восстановления работоспособности рассматриваемого узла после отказа.

Для оценки горнотехнических условий эксплуатации карьерного автотранспорта предлагается использовать совокупность параметров технологической трассы транспортирования, складывающуюся из трех факторов:

1. Геометрия отдельных участков трассы транспортирования $C_{геом}$

Данный фактор целесообразно представить в виде совокупности трех составляющих подфакторов:

• Средневзвешенный продольный уклон трассы $i_{св.в.прод.}$, ‰, определяемый согласно следующему выражению:

$$i_{св.в.прод} = \frac{\sum_{k=1}^{n} i_{k\ прод}\, l_k}{\sum_{k=1}^{n} l_k} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \left(P_{пер.ср.k} - P_{3ср.k}\right) K l_k}{\sum_{k=1}^{n} l_k} \quad (1)$$

где $i_{k\ прод}$ — продольный уклон k-го участка, ‰; l_k — длина участка, м; n — количество участков трассы; $P_{пер.ср.k}$ и $P_{3.ср.k}$ — среднее значение давления в

передних и задних пневмогидроцилиндрах подвески на *k*-ом участке, МПа; *K* — переводной коэффициент из МПа в м (для установленного на автосамосвалы преобразователя давления MBS 1200 принят равным 0,005 МПа на 1 м трассы в вертикальной проекции).

Чем круче продольный уклон на отдельных участках технологической трассы, тем интенсивнее изнашиваются подвески на задней оси при подъеме и передней при спуске на карьерах нагорного типа. Его можно количественно оценить посредством учета средневзвешенного продольного уклона через отношение удельного веса уклонов отдельных участков к общей длине трассы.

• Средневзвешенный поперечный уклон трассы $i_{св.в.попер.}$, ‰, определяемый согласно следующему выражению:

$$i_{св.в.попер.} = \frac{\sum_{k=1}^{n} i_{k\ попер.} l_k}{\sum_{k=1}^{n} l_k} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \left(P_{Пр.ср.k} - P_{Л.ср.k}\right) K l_k}{\sum_{k=1}^{n} l_k} \quad (2)$$

где $i_{k\ попер.}$ — поперечный уклон участка, ‰; l_k — длина участка, м; n — количество участков трассы; $P_{Пр.ср.k}$ и $P_{Л.ср.k}$ — среднее значение давления в правых и левых пневмогидроцилиндрах подвески, МПа;

При больших значениях поперечного уклона нагрузка от внешних сил неравномерно распределяется между левой и правой парами подвесок, на одну из них она действует значительно интенсивнее, что приводит к сокращению срока службы ее пневмогидроцилиндров.

• Средневзвешенная величина криволинейности трассы $R_{п.тр.}$, определяемая согласно следующему выражению:

$$R_{п.тр.} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \frac{S_m}{T_m} l_{п.k}}{\sum_{k=1}^{n} l_k}, \quad (3)$$

где S_m — протяженность криволинейного участка m, м; T_m — кратчайшее расстояние между начальной и конечной точками участка m, м; $l_{п.k}$ — длина криволинейного участка, м; m — количество участков трассы с поворотами.

Частое изменение направления движения, равно как и приложение нагрузок преимущественно с одной стороны, приводит к сокращению срока службы пневмогидроцилиндров соответствующей части подвески.

Таким образом, для оценки рассматриваемого фактора предлагается следующее выражение:

$$C_{геом} = i_{св.в.прод.} + i_{св.в.попер.} + R_{п.тр.} \quad (4)$$

2. Сочетания соседних участков между собой $C_{соч}$

Помимо геометрии отдельных участков трассы транспортирования, немаловажную роль в развитии деградационных процессов ходовой части автосамосвалов занимают сочетания участков трассы, параметры которых отказывают непосредственное влияние на срок службы ходовой части автосамосвала. Данное влияние можно оценить исходя из следующего выражения:

$$C_{соч.} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \left| i_k l_k - i_{k-1} l_{k-1} \right|}{\sum_{k=1}^{n} l_k} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \left| \left(P_{Пер.ср.k} - P_{З.ср.k}\right) l_k - \left(P_{Пер.ср.k-1} - P_{З.ср.k-1}\right) l_{k-1} \right|}{\sum_{k=1}^{n} l_k} \quad (5)$$

3. Макропрофиль участков трассы $C_{кач}$

В ходе анализа технологических трасс транспортирования среди наиболее распространенных проблем качества дорожного покрытия были выявлены отклонения от заданного поперечного профиля участков технологических дорог, преимущественно проявляющиеся в виде возвышения и ям.

Основными количественными характеристиками отклонений от заданного продольного профиля выступают их глубина и протяженность, следовательно, с целью оценки качества верхнего дорожного слоя на всем протяжении технологической трассы транспортирования, как средневзвешенной глубины отклонений на всем маршруте, целесообразно использовать следующее выражение:

$$C_{кач.} = \frac{\sum_{k=1}^{n} h_k l_{откл.k}}{\sum_{k=1}^{n} l_k}, \qquad (6)$$

где h_k — глубина отклонения, м; $l_{откл.k}$ — протяженность отклонения, м.

Отклонения от установленного поперечного профиля можно оценить с использованием систем удаленного мониторинга технического состояния, устанавливаемых на различные узлы и агрегаты карьерных автосамосвалов.

В частности, одним из мониторируемых параметров, который позволяет производить необходимую оценку, является величина давления в каждом из четырех пневмогидроцилиндров подвески. Таким образом, отклонение от установленного профиля участка трассы может быть выявлено посредством анализа «флуктуаций» давления (локальный «скачок» давления длительностью больше 1 с) на графике изменения давления на протяжении всего маршрута. Следовательно, глубина отклонений может быть выражена в виде разницы между пиковым и средним давлением на участке, а их протяженность — как произведение времени «флуктуации» на скорость движения на заданном участке:

$$C_{кач} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \left| \frac{P_{ПЛпик} + P_{ППпик}}{2} - \frac{P_{ПЛср} + P_{ППср}}{2} \right| K t_{пик} v}{\sum_{k=1}^{n} l_k} \qquad (7)$$

где $P_{ПЛпик}$ и $P_{ППпик}$ — величина пикового давления в переднем левом и правом гидроцилиндрах подвески, МПа; $P_{ПЛср}$ и $P_{ППср}$ — величина среднего давления на участке в переднем левом и правом пневмогидроцилиндрах подвески, МПа; $t_{пик}$ — длительность флуктуации давления, с; v — средняя скорость движения автосамосвала на участке, м/с.

При этом определение значений осуществлялось как с использованием модуля позиционирования машин, так и

Таблица 2

Статистические характеристики полученной регрессионной модели [составлено авторами]

Statistical characteristics of the obtained regression model [compiled by the authors]

Фактор	Значение	Значимость	t–критерий
Константа	5,38	0,851	0,21
$C_{геом}$	5,99	0,824	1,56
$C_{соч}$	7,32	0,844	0,29
$C_{кач}$	2,69	0,935	0,33

модуля мониторинга давления в пневмогидроцилиндрах ходовой части, что обеспечивает адаптируемость метода оценки негативного влияния осложненных горнотехнических условий к системам удаленного мониторинга с различным функционалом [33 — 35].

Результаты

На основе аналитических отчетов, выгруженных из базы накопленных данных, снятых системами удаленного мониторинга АСУ ГТК за период 2020 — 2022 гг., а также месячных отчетов ремонтной службы о простоях техники, при помощи трехфакторного регрессионного анализа, была получена следующая зависимость:

$$\Delta T = 5{,}38 + 5{,}99\, C_{\text{геом.}} + \\ + 7{,}32\, C_{\text{соч.}} + 2{,}69\, C_{\text{кач.}} \qquad (8)$$

Статистические параметры регрессионной модели (8) (табл. 2)., прошли проверку по критериям Фишера и Стьюдента, что подтверждает адекватность полученной модели.

После установления искомой зависимости становится возможным определить рациональный межремонтный период для подвесок карьерных автосамосвалов. При стратегии технического обслуживания, сочетающей плановые ремонты с внеплановыми аварийными ремонтами без переноса сроков очередного технического обслуживания, критерий рационализации будет включать не только величину снижения ресурса подвески, но и соответствующие экономические показатели. Для их учета требуется обоснование каждого вида затрат. Как уже было сказано выше, выбранный метод обслуживания включает в себя аварийные и плановые ремонты. Таким образом, средние затраты, связанные с аварийным ремонтом будут определяться по формуле:

$$A_{\text{ав}} = \beta_3 + \varepsilon_1 t_3 + \varepsilon_2 \qquad (9)$$

где β_3 — средние затраты на восстановление работоспособности объекта после его отказа, руб.; ε_1 — средний ущерб в единицу времени при простое, руб.; t_3 — средняя продолжительность аварийного ремонта, ч; ε_2 — средний ущерб от отказа объекта, руб.

Средние затраты, связанные с проведением одного планового ремонта, определяются следующим выражением:

$$A_{\text{пл}} = \beta_1 + \varepsilon_1 t_1 \qquad (10)$$

где β_1 — средние затраты на проведение планового ремонта, руб.; t_1 — средняя продолжительность планового ремонта, ч.

Поскольку техника эксплуатируется в осложненных горнотехнических условиях, пренебрежение мероприятиями, направленными на снижение их негативного влияния на надежность машин, повлечет за собой существенные экономические потери для предприятия. В связи с этим необходимо учитывать вид затрат, связанный с реализацией мер по минимизации влияния осложненных горнотехнических условий эксплуатации технологической трассы транспортирования на ресурс подвесок. Речь идет о средних затратах на поддержание установленного уровня качества верхнего дорожного слоя трасс транспортирования горной массы. Также очевидно, что при проведении работ по поддержанию установленного уровня качества верхнего дорожного слоя невозможно движение транспортной техники по реконструируемому участку. Таким образом, получено следующее выражение:

$$A_{\text{геом}} = \beta_2 + \varepsilon_1 t_2 \qquad (11)$$

где β_2 — средние затраты на проведение реконструкции участка, руб.; t_2 — средняя продолжительность проведения работ по реконструкции участка, ч.

Следовательно, искомый критерий рационализации принимает следующий вид:

Таблица 3

Фактические и прогнозируемые значения продолжительности простоев и ремонтных работ по маршрутам транспортировки [составлено авторами]
Actual and predicted values of downtime and repair work duration along transportation routes [compiled by the authors]

Номер маршрута	Продолжительность простоев по внешним причинам, ч		Длительность ремонтных работ, ч	
	фактическая	ожидаемая	фактическая	ожидаемая
1	5,3	3,9	15,2	13,8
2	6,2	3,4	15,7	12,9
3	5,8	3,5	14,6	12,3
4	6,3	3,7	16,4	13,8
5	5,4	3,6	14,7	12,9
6	6,1	3,5	15,2	12,6
7	6,2	3,9	14,9	12,6
8	5,4	3,6	15,5	13,7
9	6,6	3,8	15,6	12,8

$$K_{опт} = \frac{\left(A_{пл} + A_{геом}\right)K_{г} + A_{ав}[1 - K_{г}]}{K' \int_{0}^{T} P(T)dT} \rightarrow \min \quad (12)$$

где $\int_{0}^{T} P(T)dT$ — средняя наработка до отказа подвески, ч; $K_{г}$ — коэффициент технической готовности за межремонтный период T; K' — коэффициент, отражающий влияние горнотехнических условий эксплуатации на среднюю наработку до отказа в % от нормативного, устанавливаемой заводом-изготовителем техники.

Принимая во внимание тот факт, что распределение потока отказов подвесок является наиболее близким к нормальному, для установления рационального межремонтного периода целесообразно использовать следующее выражение:

$$T = T_{ср} - \sqrt{-2\sigma^2 \ln\left[\frac{\left(\frac{A_{пл} + A_{геом}}{A_{ав}} + 1\right) / \left(1 - \frac{A_{пл} + A_{геом}}{A_{ав}}\right)}{T_{норм} - \Delta T}\sigma\sqrt{2\pi}\right]} \quad (13)$$

где $T_{ср}$ — средняя наработка до отказа подвески, ч; σ — среднеквадратичное отклонение наработки между отказами подвески, ч; $T_{норм}$ — устанавливаемый заводом-изготовителем нормативный срок службы подвески, ч.

Ввиду того, что в разработанном методе определения рационального межремонтного периода учитывается экономическая составляющая, включающая не только затраты на различные виды ремонта, затраты на выполнение планировоч-

ных работ, возникает необходимость дополнительного обоснования рационального соотношения планировочной и транспортной техники в составе парка. Целесообразность затрат на поддержание установленного уровня воздействия горнотехнических условий эксплуатации трассы на безаварийный срок службы карьерных автосамосвалов обусловлена снижением расходов на восстановление работоспособности машин после их отказа, а также сокращением затрат, связанных с проведением плановых ремонтов. Следовательно, при расчете отношения $(A_{пл} + A_{геом})/A_{ав}$, одним из ключевых показателей является количество и время работы грейдеров, помимо самого автопарка транспортных машин. Как показали проведенные расчеты с учетом рационального соотношения между числом планировочной и транспортной техники, которое находится в диапазоне от 1 к 7 до 1 к 20, оптимальный уровень отношения следует принять в диапазоне от 0,2 до 0,4.

Обсуждение результатов

Как отмечалось ранее, разработанный алгоритм установления рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, основан на зависимости, полученной с использованием трехфакторного регрессионного анализа массива данных, полученных за период с 2020 по 2022 гг. Для апробации алгоритма использовалась собранная информация с двух рассматриваемых предприятий за 2023 гг. На этой основе проведено сопоставление ожидаемой продолжительности ремонтных работ и простоев по внешним причинам с фактически зафиксированными значениями (табл. 3).

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что применение разработанного алгоритма позволяет сократить продолжительность простоев по внешним причинам вследствие отказа подвески автосамосвалов в среднем на 2,27 ч или же на 38%, а длительность ремонтных работ — на 15%.

Заключение

Результатами проведенного исследования является следующее:

1. На основе анализа данных, полученных с двух предприятий по добыче железной руды, эксплуатирующих технику в схожих горнотехнических условиях, с использованием трехфакторного регрессионного анализа была установлена эмпирическая зависимость между сокращением срока службы подвесок карьерных автосамосвалов и каждым из факторов, входящих в группу параметров технологической трассы транспортирования горной массы и обусловленных осложненными условиями эксплуатации. Полученная зависимость прошла статистическую проверку по критериям Стьюдента и Фишера, что подтверждает ее адекватность.

2. Обоснован критерий рационализации межремонтного периода для подвесок карьерных автосамосвалов, соответствующий принятым на предприятиях стратегиям обеспечения установленного уровня надежности за счет сочетания плановых и аварийных ремонтов. Критерий учитывает стохастический характер наработки до отказа рассматриваемого узла, а также ряд планово-экономических параметров.

3. Согласно предложенному критерию рационализации межремонтного периода подвесок установлено оптимальное соотношение между числом планировочной и транспортной техники, которое находится в диапазоне от 1 к 7 до 1 к 20, что обосновывается экономической целесообразностью капитальных и эксплуатационных затрат при формировании и эксплуатации парка техники.

4. Разработан алгоритм определения рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов. Его апробация на рассматриваемых предприятиях позволила сократить длительность простоев по внешним причинам после отказа подвески в среднем на 38% и, тем самым, сократить среднюю длительность ремонтных работ этого узла на 15%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov V. V.*, *Sidorenko S. A.*, *Sidorenko A. A.* Justification of the method for determination the optimum performance of limestone quarry for steel and cement production // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015, vol. 12, no. 2, pp. 1797 — 1803. DOI: 10.13005/bbra/1844.

2. *Эрикссон М., Леф А., Леф О.* Обзор мирового рынка железной руды за 2019 — 2020 годы // Горная промышленность. — 2021. — № 1. — С. 74 — 82. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-74-82.

3. *Литвиненко В. С.*, *Петров Е. И.*, *Василевская Д. В.*, *Яковенко А. В.*, *Наумов И. А.*, *Ратников М. А.* Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 95 — 111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

4. *Матрохина К. В.*, *Трофимец В. Я.*, *Мазаков Е. Б.*, *Маховиков А. Б.*, *Хайкин М. М.* Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 112 — 124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3.

5. *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 вузов. Горный журнал. — 2020. — № 7. — С. 21 — 32. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32.

6. *Михайлов А. В.*, *Казаков Ю. А.* Методология оценки многократной проходимости горно-транспортного агрегата по слабым грунтам // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 8. — С. 95 — 110. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_95.

7. *Гаращенко Ж. М.*, *Теремецкая В. А.*, *Габов В. В.* Отработка угольных целиков унифицированными выемочными модулями локальными забоями // Горная промышленность. — 2024. — № 5. — С. 151 — 157. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-151-157.

8. *Мякотных А. А.*, *Иванова П. В.*, *Иванов С. Л.* Критерии и технологические требования создания мостовой платформы добычи торфяного сырья для климатически нейтральной геотехнологии // Горная промышленность. — 2024. — № 4. — С. 116 — 120. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-116-120.

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

10. *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 Electrical Vehical Journal. 2024, vol. 15, no. 8, article 365. DOI: 10.3390/wevj1508036.

11. *Troyanovskaya I.* Influence of mountain conditions on road fuel consumption (Example of the Republic of Tajikistan) // Transportation Research Procedia. 2022, vol. 61, pp. 273 — 279. DOI:10.1016/j.trpro.2022.01.045.

12. *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, vol. 53, pp. 708 — 717. DOI: 10.1134/S1062739117042702.

13. *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. — № 3. — С. 418 — 427. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-418-427.

14. *Safiullin R., Efremova V., Ivanov B.* The method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of the integrated control system of a highly automated vehicle // Open Transplantation Journal. 2024, vol. 18. DOI: 10.2174/0118744478309909240807051315.

15. *Zhukovskiy Y., Tsvetkov P., Koshenkova A., Skvortsov I., Andreeva I., Vorobeva V.* A methodology for forecasting the KPIs of a region's development: Case of the Russian Arctic // Sustainability. 2024, vol. 16, no. 15, article 6597. DOI: 10.3390/su16156597.

16. *Stoianova A. D.*, *Trofimets V. Y.*, *Stoianova O. V.*, *Matrokhina K. V.* Structural model of decision support system for sustainable development of oil and gas companies // International Journal of Engineering. 2025, vol. 38, no. 4, pp. 701 — 709. DOI: 10.5829/ije.2025.38.04a.03.

17. *Кузин А. А.*, *Филиппов В. Г.* Прогнозирование величин оползневых смещений на основе геодезических данных // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 1176 — 1191. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191.

18. *Кузин А. А.*, *Филиппов В. Г.* Метод определения плановых координат и высоты рабочего репера на оползне с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения // Геодезия и картография. — 2024. — № 85(9). — С. 2 — 11. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11.

19. *Мустафин М. Г.*, *Валькова Е. О.* Маркшейдерско-геомеханическое обоснование методики наблюдений за деформациями бортов карьеров // Уголь. — 2024. — № 7. — С. 55 — 61. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-55-61.

20. *Massel L., Komendantova N., Massel A., Tsvetkova A., Zaikov K., Marinina O.* Resilience of socio-ecological and energy systems: Intelligent information technologies for risk assessment of natural and technogenic threats // Journal of Infrastructure Policy and Development. 2024, vol. 8, no. 7. DOI: 10.24294/jipd.v8i7.4700.

21. *Martirosyan A. V.*, *Ilyushin Y. V.* Modeling of the natural objects'temperature field distribution using a supercomputer // Informatics. 2022, vol. 9, no. 3, article 62. DOI: 10.3390/informatics9030062.

22. *Воронов А. Ю.*, *Воронов Ю. Е.* Мультиуровневая модель управления экскаваторно-автомобильными комплексами разрезов // Горное оборудование и электромеханика. — 2019. — № 5. — С. 8 — 15. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-8-15.

23. *Nagovitsyn G. O.* Short-term planning of surface mining operations in the MINEFRAME mining and geological information system // Russian Mining Industry. 2023, no. 5S, pp. 130 — 134. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-130-134.

24. *Бочкарев Ю. С.*, *Зырянов И. В.* Повышение эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-2. — С. 80 — 90. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_80.

25. *Bochkaryov Yu., Ishkov A.* The operational reliability of quarry dump trucks BELAZ7540 in the placer deposits / International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Sofia. 2020, vol. 20, pp. 325 — 332. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.042.

26. *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. — С. 21 — 32.

27. *Андреева Л. И.* Оценка резервов повышения эффективности процесса рудоподготовки в АО «Ковдрский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 185 — 192. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-185-192.

28. *Тарасов П. И.*, *Хазин М. Л.*, *Голубев О. В.* Эволюция карьерных машин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 2(50). — С. 67 — 74. DOI: 10.20291/ 2079-0392-2021-2-67-74.

29. *Qing-dong Ya., Xiu-qi Ch., Hong-chao J., Wei W., Wei-da W., Heng W.* Design of a deep inference framework for required power forecasting and predictive control on a hybrid electric mining truck // Energy. 2022, vol. 238, pp. 121 — 141. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121960.

30. *Hristova T., Mitev I., Balev V.* Monitoring of geotechnical facilities through DLT solution // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2021, vol. 970, no. 1, article 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012011.

31. *Lagunova Y., 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, vol. 709, no. 2, article 022048. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022048.

32. *Kumar A.*, *Krishnan V. A.* Study on reliability analysis of haul trucks // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. 2017, vol. 4, no. 3. DOI: 10.17148/IARJSET.2017.4317.

33. *Umirzokov A., Mallaboev U., Saidullozoda S., Khabibullozoda 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, vol. 817, no. 1, article 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012036.

34. *Максаров В. В.*, *Минин А. О.*, *Васильков Д. В.* Применение высокочастотного волнового воздействия для технологического обеспечения качества расточных поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов // Цветные металлы. — 2025. — № 1. — С. 76—83. DOI: 10.17580/tsm.2025.01.11.

35. *Qun W., Ruixin Zh., Shuaikang Lv., Yangting W.* Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021, vol. 43, pp. 89—99. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100977. ГИАБ

REFERENCES

1. Ivanov V. V., Sidorenko S. A., Sidorenko A. A. Justification of the method for determination the optimum performance of limestone quarry for steel and cement production. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2015, vol. 12, no. 2, pp. 1797—1803. DOI: 10.13005/bbra/1844.

2. Iron ore market report 2019-2020. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 1, pp. 74—82. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-74-82.

3. Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V., Naumov I. A., Ratnikov M. A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 95—111. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

4. Matrokhina K. V., Trofimets V. Y., Mazakov E. B., Makhovikov A. B., Khaykin M. M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 112—124. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.3.

5. 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. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 7, pp. 21—32. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-21-32.

6. Mikhailov A. V., Kazakov Yu. A. Estimation procedure of multiple passability of hauling unit on weak ground. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 8, pp. 95—110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_95.

7. Garashchenko Zh. M., Teremetskaya V. A., Gabov V. V. Mining of coal pillars using unified excavation modules with local faces. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 5, pp. 151—157. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-151-157.

8. Myakotnykh A. A., Ivanova P. V., Ivanov S. L. Criteria and technological requirements for creation of a bridge platform to extract peat raw materials for climate-neutral geotechnology. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 4, pp. 116—120. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-116-120.

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

10. 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 Electrical Vehical Journal*. 2024, vol. 15, no. 8, article 365. DOI: 10.3390/wevj1508036.

11. Troyanovskaya I. Influence of mountain conditions on road fuel consumption (Example of the Republic of Tajikistan). *Transportation Research Procedia*. 2022, vol. 61, pp. 273—279. DOI:10.1016/j.trpro.2022.01.045.

12. 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, vol. 53, pp. 708—717. DOI: 10.1134/S1062739117042702.

13. Klyev 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, no. 3, pp. 418—427. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-418-427.

14. Safiullin R., Efremova V., Ivanov B. The method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of the integrated control system of a highly automated vehicle. *Open Transplantation Journal*. 2024, vol. 18. DOI: 10.2174/0118744478309909240807051315.

15. Zhukovskiy Y., Tsvetkov P., Koshenkova A., Skvortsov I., Andreeva I., Vorobeva V. A methodology for forecasting the KPIs of a region's development: Case of the Russian Arctic. *Sustainability*. 2024, vol. 16, no. 15, article 6597. DOI: 10.3390/su16156597.

16. Stoianova A. D., Trofimets V. Y., Stoianova O. V., Matrokhina K. V. Structural model of decision support system for sustainable development of oil and gas companies. *International Journal of Engineering*. 2025, vol. 38, no. 4, pp. 701 — 709. DOI: 10.5829/ije.2025.38.04a.03.

17. Kuzin A. A., Filippov V. G. Forecasting landslide displacement values based on geodetic data. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 1176 — 1191. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191.

18. Kuzin A. A., Filippov V. G. Method for determining the plan view coordinates and height of the working benchmark on a landslide with forced inclinations of the pole from the plumb position. *Geodesy and Cartography*. 2024, no. 85(9), pp. 2 — 11. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11.

19. Mustafin M. G., Valkova E. O. Surveying and geomechanical justification for the methods of quarry sides deformations observation. *Ugol'*. 2024, no. 7, pp. 55 — 61. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-55-61.

20. Massel L., Komendantova N., Massel A., Tsvetkova A., Zaikov K., Marinina O. Resilience of socio-ecological and energy systems: Intelligent information technologies for risk assessment of natural and technogenic threats. *Journal of Infrastructure Policy and Development*. 2024, vol. 8, no. 7. DOI: 10.24294/jipd.v8i7.4700.

21. Martirosyan A. V., Ilyushin Y. V. Modeling of the natural objects'temperature field distribution using a supercomputer. *Informatics*. 2022, vol. 9, no. 3, article 62. DOI: 10.3390/informatics9030062.

22. Voronov A. Yu., Voronov Yu. E. Multistage model for shovel-truck system management at open-pit coal mines. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019, no. 5, pp. 8 — 15. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-8-15.

23. Nagovitsyn G. O. Short-term planning of surface mining operations in the MINEFRAME mining and geological information system. *Russian Mining Industry*. 2023, no. 5S, pp. 130 — 134. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-130-134.

24. Bochkaryov Yu. S., Zyryanov I. V. Improving the efficiency of operation quarry dump trucks on placer deposits in the North conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 80 — 90. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_80.

25. Bochkaryov Yu., Ishkov A. The operational reliability of quarry dump trucks BELAZ7540 in the placer deposits. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM*. Sofia. 2020, vol. 20, pp. 325 — 332. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.042.

26. Mariev P. L., Egorov A. N., Vojtov V. T. Features of operation of dump trucks in conditions of deep pits and elevated slopes. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 10, pp. 21 — 32. [In Russ].

27. Andreeva L.I. Assessment of efficiency improvement potentiality in ore pretreatment at Kovdor Mining and Processing Plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 1, pp. 185 — 192. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-185-192.

28. Tarasov P. I., Khazin M. L., Golubev O. V. The evolution of quarry vehicles. *Herald of the Ural state university of railway transport*. 2021, no. 2(50), pp. 67 — 74. [In Russ]. DOI: 10.20291/ 2079-0392-2021-2-67-74.

29. Qing-dong Ya., Xiu-qi Ch., Hong-chao J., Wei W., Wei-da W., Heng W. Design of a deep inference framework for required power forecasting and predictive control on a hybrid electric mining truck. *Energy*. 2022, vol. 238, pp. 121 — 141. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121960.

30. Hristova T., Mitev I., Balev V. Monitoring of geotechnical facilities through DLT solution. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 970, no. 1, article 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012011.

31. Lagunova Y., 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, vol. 709, no. 2, article 022048. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022048.

32. Kumar A., Krishnan V. A. Study on reliability analysis of haul trucks. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2017, vol. 4, no. 3. DOI: 10.17148/IARJSET.2017.4317.

33. Umirzokov A., Mallaboev U., Saidullozoda S., Khabibullozoda 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, vol. 817, no. 1, article 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012036.

34. Maksarov V. V., Minin A. O., Vasilkov D. V. The use of high-frequency wave action as part of the process to ensure the quality of boring surfaces in products made of corrosion-resistant aluminum alloys. *Tsvetnye Metally*. 2025, no. 1, pp. 76—83. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2025.01.11.

35. Qun W., Ruixin Zh., Shuaikang Lv., Yangting W. Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021, vol. 43, pp. 89—99. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100977.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ботян Евгений Юрьевич[1] — канд. техн. наук,
e-mail: botyan_eyu@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3395-935X,
Николайчук Любовь Анатольевна[1] — канд. экон. наук,
доцент, e-mail: nikolaychuk_la@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5013-1787,
Мартемьянова Алена Николаевна[1] — канд. экон. наук,
e-mail: Martemyanova_AN@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0007-2655-6057
Степук Елена Ивановна[1] — канд. экон. наук,
e-mail: Stepuk_EI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0003-3343-0349,
Пушкарев Александр Евгеньевич — докт. техн. наук,
профессор, Санкт-Петербургский архитектурно-строительный
университет, e-mail: pushkarev-agn@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5546-015X14:41,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Николайчук Л.А., e-mail: nikolaychuk_la@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.Y. Botyan[1], Cand. Sci (Eng.),
e-mail: botyan_eyu@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3395-935X,
L.A. Nikolaichuk[1], Cand. Sci (Econ.), Assistant Professor,
e-mail: nikolaychuk_la@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5013-1787,
A.N. Martemyanova[1], Cand. Sci (Econ.),
e-mail: Martemyanova_AN@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0007-2655-6057,
E.I. Stepuk[1], Cand. Sci (Econ.),
e-mail: Stepuk_EI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0003-3343-0349,
A.E. Pushkarev, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
190005, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: pushkarev-agn@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5546-015X14:41,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: L.A. Nikolaichuk, e-mail: nikolaychuk_la@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 30.07.2025; получена после рецензии 23.10.2025; принята к печати 17.11.2025.
Received by the editors 30.07.2025; received after the review 23.10.2025; accepted for printing 17.11.2025.