

На правах рукописи

Ботян Евгений Юрьевич



**ОБОСНОВАНИЕ РЕГЛАМЕНТА ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПОДВЕСОК
КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ С УЧЕТОМ
ОСЛОЖНЕННЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пушкарев Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты:

Шишлянников Дмитрий Игоревич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», профессор;

Хорошавин Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра горных машин и комплексов, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **17 сентября 2025 г. в 10:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Наиболее энергозатратной операцией при добыче полезного ископаемого является его транспортирование. При ведении горных работ открытым способом наиболее распространенным видом транспорта служат карьерные автосамосвалы, на чью долю в РФ приходится свыше 75% от всей перевезенной горной массы.

Современное состояние горнодобывающей отрасли, как в России, так и во всем остальном мире, характеризуется тенденцией к увеличению объемов добычи полезных ископаемых, в сопряжении с ростом глубины ведения горных работ, что приводит к осложнению горнотехнических условий эксплуатации задействованных при этом карьерных автосамосвалов: увеличиваются уклоны трасс съездов и площадок примыкания, сужается ширина технологической дороги и т.д. Это негативно сказывается на надежности узлов и агрегатов автосамосвалов, среди которых узлом, на долю которого приходится наибольшее число отказов, являются подвески. При этом условия конкретного предприятия могут существенно отличаться от базовых (неосложненных) условий эксплуатации, которые используются для разработки рекомендаций заводом-изготовителем и обоснования ремонтными службами периодичности регламентного ремонта узлов машин, что при функционировании автосамосвалов в осложненных условиях приводит к возникновению отказов подвесок, необходимости проведения аварийных ремонтов без достаточной подготовки, увеличению длительности логистических простоев, и, таким образом, обуславливает актуальность выбранной темы.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы учета негативного влияния осложненных горнотехнических условий эксплуатации горных машин, задействованных при разработке месторождений открытым способом, на эффективность их использования затрагивались в работах А.И. Арсентьева, К.В. Бурмистрова, В.А. Галкина, Н.В. Мельникова, Н.Н. Мельникова, В.В. Ржевского, Е.Ф. Шешко и др. Значительный вклад в решение вопроса повышения надежности карьерных автосамосвалов внесли Л.И. Андреева, К.Ю. Анистратов, И.В. Зырянов, А.А. Кулешов, Ю.И. Лель, М.Г. Потапов, К.Н. Трубецкой, В.Л. Яковлев и др., а

также ряд зарубежных исследователей: Artega F., Kumar U., Soofactaei A., Qing-dong Y. Однако негативное влияние характеристик технологических трасс транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями эксплуатации, на срок службы подвесок карьерных автосамосвалов в трудах этих специалистов не было в достаточной степени учтено. Это требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследования: процесс влияния горнотехнических условий эксплуатации на сокращение срока службы подвесок карьерных автосамосвалов.

Предмет исследования: организация процесса ремонта подвесок карьерных автосамосвалов.

Цель работы – обоснование периодичности регламентных ремонтных работ для подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложнённых горнотехнических условиях, для сокращения логистических простоев.

Идея работы заключается в том, что уменьшение длительности логистических простоев вследствие отказа подвески карьерных автосамосвалов достигается за счет учета зависимости сокращения их срока службы от характеристик технологических трасс транспортирования при обосновании периодичности регламентного ремонта этого узла в осложненных горнотехнических условиях.

Основные задачи исследования:

1. Провести комплексный анализ факторов, приводящих к сокращению срока службы подвесок карьерных автосамосвалов, действовавших на горных предприятиях с осложненными горнотехническими условиями, а также существующих подходов к организации их эксплуатации.
2. Проанализировать технико-эксплуатационные показатели автосамосвалов, эксплуатируемых на карьерах с осложненными горнотехническими условиями.
3. Установить зависимость сокращения срока службы подвесок карьерных автосамосвалов от группы параметров технологических трасс транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями: макропрофиля участков, их геометрии и сочетаний.

4. Разработать алгоритм определения периодичности регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, учитывающий давление в пневмогидроцилиндрах ходовой части при расчете группы параметров технологических трасс транспортирования: макропрофиль участков, их геометрию и сочетания между собой, для сокращения длительности логистических простоев вследствие отказа рассматриваемого узла.

5. Разработать рекомендации по корректировке графиков проведения ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых на предприятиях с осложненными горнотехническими условиями.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость сокращения срока службы подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, в виде линейного полинома, учитывающего выявленную группу параметров технологических трасс транспортирования горной массы: средневзвешенную кривизну, продольный и поперечный уклон участков, их сочетания и макропрофиль.

2. Разработан алгоритм определения периодичности проведения регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, с учетом давления в пневмогидроцилиндрах ходовой части, средневзвешенной величины криволинейности, продольного и поперечного уклона участков трассы транспортирования и их сочетаний для сокращения длительности логистических простоев вследствие отказа рассматриваемого узла.

Соответствие паспорту научной специальности

Тема исследования соответствует п.16 «Техническое обслуживание и ремонт горных машин и оборудования с учетом специфики горно-геологических и горнотехнических условий их эксплуатации» паспорта научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлена группа параметров технологических трасс транспортирования горной массы, обусловленных осложненными горнотехническими условиями эксплуатации, приводящих к сокращению срока службы подвесок карьерных автосамосвалов, задействованных на месторождениях, отрабатываемых открытым способом по углубочной кольцевой системе разработки: средневзвешенная величина криволинейности, продольного и поперечного уклона участков трассы транспортирования, их сочетания и макропрофиль.

2. Разработанный алгоритм и программа его реализации используются для определения периодичности регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов в зависимости от давления в пневмогидроцилиндрах ходовой части, средневзвешенной величины криволинейности, продольного и поперечного уклона участков трассы транспортирования и их сочетаний с целью сокращения длительности логистических простоев и аварийных ремонтных работ, с последующей рекомендацией для корректировки графиков технического обслуживания и ремонта карьерного автотранспорта.

3. Результаты диссертационной работы приняты к использованию ООО «М4Е» при разработке проектных решений по поддержанию установленного уровня надежности карьерных автосамосвалов, что подтверждается актом внедрения от 21.03.2025.

Методология и методы исследования.

При решении поставленных задач использовался комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, аналитические расчеты, компьютерное моделирование, обработку и анализ оцифрованных данных систем удаленного мониторинга технического состояния автосамосвалов, журналов ремонтных служб горных предприятий и результатов производственных наблюдений.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Учет группы параметров технологической трассы транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями: макропрофиля участков, их геометрии и сочетаний

в виде линейного полинома, позволяет установить величину сокращения срока службы подвесок карьерных автосамосвалов, среднего-довое значение которого в рассматриваемых условиях составило от 6 и до 20% в сравнении с базовыми.

2. Применение разработанного алгоритма определения периодичности регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, для диапазона наработки до отказа от $T_{н min}$ до $0,9 T_{н ср}$, позволяет сократить среднюю продолжительность логистических простоев на 45%, а среднее время аварийного ремонта этого узла – на 14%.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается правильной постановкой цели и задач исследования, значительным объемом достоверной статистической информации, качественным и количественным подобием результатов наблюдений с результатами, полученными другими учеными, и корректным применением методов математической статистики при их обработке.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2022), XV Всероссийская 68-ая научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая» (г. Кемерово, 2023), III международная научно-практическая конференция «Транспортная доступность Арктики: сети и системы» (г. Санкт-Петербург, 2024), 14-ая международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее» (г. Тула, 2024), Международная научно-практическая конференция «Транспорт. Взгляд в будущее» (г. Санкт-Петербург, 2024).

Личный вклад автора заключается в анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования, постановке цели и задач исследования, разработке методики исследования, проведении статистической обработки данных, получении зависимости на основании полученных данных, создании алгоритма, подготовке научных публикаций, обосновании выводов и рекомендаций.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 118 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка и 19 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., профессору Пушкареву Александру Евгеньевичу за всестороннюю помощь в ходе подготовки работы, а также к.т.н., доценту Лавренко Сергею Александровичу за ценные научные консультации, наставления и поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор состояния транспортных систем горных предприятий России использующих карьерные автосамосвалы. Выполнен анализ рассматриваемых в научной литературе причин, приводящих к осложнению горнотехнических условий эксплуатации горнотранспортных машин, предлагавшихся методов и средств оценки негативного влияния условий эксплуатации на надежность различных узлов и агрегатов самосвалов. Выполнен обзор методов повышения их надежности. На основе выполненного анализа сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе приведены результаты анализа отдельных проектов по модернизации существующих технологических схем по добыче железной руды, направленного на выявление причин осложнения горнотехнических условий эксплуатации. Обоснован выбор систем удаленного мониторинга технического состояния карьерных автосамосвалов в качестве инструмента для оценки негативного влияния горнотехнических условий эксплуатации на срок службы подвесок. Определен перечень факторов, приводящих к сокращению срока службы подвесок карьерных автосамосвалов, а также предложен способ их количественной оценки. Установлена зависимость параметров технологических трасс транспортирования от реализуемых систем разработки месторождений открытым способом.

В третьей главе установлена зависимость между группой параметров технологических трасс транспортирования и величиной сокращения срока службы подвесок. Установлено распределение числа отказов подвески по ее наработке до отказа, которое было сопоставлено с известными теоретическими законами. Обоснован и выведен критерий рационализации периодичности регламентных ремонтных работ рассматриваемого узла.

В четвертой главе разработан алгоритм определения периодичности регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, а также рекомендации по проведению ремонтных работ карьерных автосамосвалов на его основе. Произведен расчет ожидаемого экономического эффекта от использования предлагаемых решений.

В заключении изложены основные выводы по результатам проведенных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Учет группы параметров технологической трассы транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями: макропрофиля участков, их геометрии и сочетаний в виде линейного полинома, позволяет установить величину сокращения срока службы подвесок карьерных

автосамосвалов, среднегодовое значение которого в рассматриваемых условиях составило от 6 и до 20% в сравнении с базовыми.

В ходе анализа научной литературы, а также существующих проектов по модернизации транспортных систем с карьерными автосамосвалами, среди основных факторов, приводящих к сокращению срока службы подвесок карьерных автосамосвалов, отмечались следующие: режимы работы автосамосвалов, природно-климатические условия, квалификация оператора, соблюдение паспорта погрузки, срок эксплуатации машины, а также группа параметров технологической трассы транспортирования, включающая в себя средневзвешенную величину криволинейности ее участков, их продольный и поперечный уклон, объединенные в параметр геометрии участков, а также их сочетания и макропрофиль.

Экспериментальные наблюдения по установлению влияния группы параметров технологических трасс транспортирования горной массы на срок службы подвесок карьерных автосамосвалов проводились на двух горно-обогатительных комбинатах (ГОК) по добыче железной руды открытым способом: АО «Ковдорский ГОК» и «ЕВРАЗ Качканарский ГОК». На них применяется углубочная кольцевая система разработки (по классификации В.В. Ржевского), что приводит к осложнению горнотехнических условий эксплуатации.

Для исследований было выбрано 9 маршрутов транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами (таблица 1). За период 2020-2023 годов были собраны отчеты по детализации выполняемых на них рейсов и журналы ремонтных служб. В отчетах содержались данные о состоянии карьерных автосамосвалов согласно различным модулям системы удаленного мониторинга, установленной на технику, датчики которых подвергались регулярной поверке. В журналах ремонтных служб, также подвергавшихся регулярной ревизии, фиксировалась наработка до отказа узлов машин, информация о видах простоев и их продолжительности.

Анализ отчетов и журналов показал, что подвески карьерных автосамосвалов являются узлом с наибольшими числом аварийных

отказов (рисунок 1), равном 180 единицам за рассматриваемый период, и вторым по суммарной продолжительности ремонта (рисунок 2).

Таблица 1 – Маршруты транспортирования, количество задействованных на них самосвалов и выполненных ими рейсов за 2020-2023 гг.

ГОК	Номер маршрута	Количество самосвалов, ед.	Количество рейсов на маршруте за исследуемый период, ед.
Качканарский	1	2	91221
	2	4	163276
	3	2	86432
	4	3	115281
	5	6	316843
Ковдорский	6	8	72582
	7	4	201660
	8	5	192475
	9	3	62473

Для оценки влияния группы параметров технологических трасс транспортирования на сокращение срока службы подвесок автосамосвалов предлагается использовать данные систем удаленного мониторинга, согласно трем факторам:

1. Геометрия участков трассы транспортирования $C_{\text{геом}}$, определяемая исходя из суммы следующих слагаемых:

а) средневзвешенный продольный уклон трасы $i_{\text{ср.в.прод.}}$, определяемый по следующему выражению (1):

$$i_{\text{ср.в.прод.}} = \frac{\sum_{k=1}^n i_{k\text{прод.}} l_k}{\sum_{k=1}^n l_k} = \frac{\sum_{k=1}^n (P_{\text{Пер.ср.к}} - P_{\text{З.ср.к}}) K l_k}{\sum_{k=1}^n l_k} \quad (1)$$

где $i_{k\text{прод.}}$ – продольный уклон k -ого участка, ‰; l_k – длина участка, м; n – количество участков трассы; $P_{\text{Пер.ср.}}$ и $P_{\text{З.ср.}}$ – среднее значение давления в передних и задних пневмогидроцилиндрах подвески, МПа; K – переводной коэффициент из МПа в м.

б) средневзвешенный поперечный уклон трассы $i_{\text{ср.в.попер.}}$, определяемый по следующему выражению (2):

$$i_{\text{ср.в.попер.}} = \frac{\sum_{k=1}^n i_{k \text{ попер.}} l_k}{\sum_{k=1}^n l_k} = \frac{\sum_{k=1}^n (P_{\text{пр.ср.}} - P_{\text{л.ср.}}) K l_k}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (2)$$

где $i_{k \text{ попер.}}$ – поперечный уклон участка, ‰; $P_{\text{пр.ср.}}$ и $P_{\text{л.ср.}}$ – среднее значение давления в правых и левых пневмогидроцилиндрах подвески, МПа;

в) средневзвешенная криволинейность трассы $R_{\text{п.тр.}}$, определяемая по следующему выражению (3):

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

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

2. Сочетания участков трассы между собой $C_{\text{соч}}$, определяемые по следующему выражению (4):

$$C_{\text{соч}} = \frac{\sum_{k=1}^n |i_{\text{прод. } k} l_k - i_{\text{прод. } k-1} l_{k-1}|}{\sum_{k=1}^n l_k} = \frac{\sum_{k=1}^n |(P_{\text{пер.ср. } k} - P_{\text{з.ср. } k}) l_k - (P_{\text{пер.ср. } k-1} - P_{\text{з.ср. } k-1}) l_{k-1}|}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (4)$$

где $i_{\text{прод. } k-1}$ – продольный уклон предыдущего участка, ‰; l_{k-1} – длина предыдущего участка, м; $P_{\text{пер.ср. } k-1}$ и $P_{\text{з.ср. } k-1}$ – среднее значение давления в передних и задних пневмогидроцилиндрах подвески на предыдущем участке, МПа.

3. Макропрофиль участков трассы $C_{\text{кач}}$, определяемый по следующему выражению (5):

$$C_{\text{кач}} = \frac{\sum_{k=1}^n h_k l_{\text{откл. } k}}{\sum_{k=1}^n l_k} = \frac{\sum_{k=1}^n \left| \frac{P_{\text{плпик.}} + P_{\text{пппик.}}}{2} - \frac{P_{\text{плср.}} + P_{\text{ппср.}}}{2} \right| K t_{\text{пик. } v}}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (5)$$

где h_k – глубина отклонения, м; $l_{\text{откл. } k}$ – протяженность отклонения, м; $P_{\text{плпик.}}$ и $P_{\text{пппик.}}$ – величина пикового давления в переднем левом и правом пневмогидроцилиндрах подвески,

МПа; $P_{плср.}$ и $P_{пп ср.}$ – 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;

В качестве выходного параметра, позволяющего оценить негативное влияние параметров трасс транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями, предлагается выбрать сокращение срока службы подвесок карьерных автосамосвалов ΔT , ч., как разность между их номинальным $T_{ном}$, ч. и фактическим $T_{ф}$, ч. сроками службы.

Каждый из выявленных факторов проходил проверку согласно критерию согласия Пирсона. Было установлено, что фактор режимов работ автосамосвалов не является значимым, факторы квалификации оператора, соблюдения паспортов погрузки, срока эксплуатации машин не варьировались в достаточной степени в ходе эксперимента. Факторы группы параметров технологических трасс и природно-климатических условий являются значимыми и варьируются в достаточной степени, но ввиду достаточной изученности в существующих научных трудах, в рамках данного исследования фактор природно-климатических условий не рассматривался.

Таким образом, с учетом обработки экспериментальных данных за период 2020-2022 гг. при помощи регрессионного анализа была получена зависимость (6). Ее статистические параметры представлены в таблице 2. Из нее следует, что статистические параметры полученной регрессионной модели значимы согласно проверке по критерию Стьюдента и адекватны по критерию Фишера

$$\Delta T = 5,38 + 5,99C_{геом} + 7,32C_{соч} + 2,69C_{кач} \quad (6)$$

Таблица 2 – Статистические параметры полученной регрессионной модели

Фактор	Значение	Значимость	t- критерий	R ²
Константа	5,38	0,851	0,21	0,91
C _{геом}	5,99	0,824	1,56	
C _{соч}	7,32	0,844	0,29	
C _{кач}	2,69	0,935	0,33	

Полученная зависимость была апробирована на данных о группе параметров трасс транспортирования за 2023 год. Было установлено, что максимальное расхождение расчетного сокращения срока службы с фактически зарегистрированным составило 13%. При помощи зависимости (6) была проведена оценка сокращения срока службы подвесок за 2020-2023 годы в сравнении с базовыми (неосложненными) условиями, которое составило от 6% до 20 %.

2. Применение разработанного алгоритма определения периодичности регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, для диапазона наработки до отказа от $T_{н min}$ до $0,9 T_{н ср.}$, позволяет сократить среднюю продолжительность логистических простоев на 45%, а среднее время аварийного ремонта этого узла – на 14%.

При анализе журналов ремонтно-механических служб рассматриваемых предприятий было установлено, что для диапазона от минимальной наработки $T_{н min}$, ч. до составляющей 90% от средней $0,9 T_{н ср.}$, ч. наработки до отказа подвески среднее время ее аварийного ремонта значительно выше, чем для остальных диапазонов (рисунок 3). Это объясняется тем, что ремонтные службы предприятия устанавливают периодичность регламентных ремонтных работ рассматриваемого узла согласно рекомендациям завода-изготовителя, значение которой больше, чем фактическая наработка до отказа. Это приводит к недостаточной готовности ремонтных служб к возникшему отказу, и, как следствие, к увеличению длительности логистических простоев и времени аварийного ремонта.

Таким образом, за счет уменьшения периодичности регламентных ремонтных работ становится возможным подготовить ремонтную базу необходимую для проведения мероприятий по ремонту рассматриваемого узла, тем самым сократить длительность логистических простоев. Для этого следует разработать алгоритм определения рациональной периодичности регламентных ремонтных работ. Критерий рационализации (с учетом подхода, предлагавшегося ранее А.А. Кулешовым) устанавливался согласно следующему соотношению (7):

$$\frac{(A_{\text{пл}} + A_{\text{геом}})P(T_{\text{меж}}) + A_{\text{ав}}[1 - P(T_{\text{меж}})]}{\int_0^{T_{\text{меж}}} P(t) dt} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $A_{\text{геом}}$, $A_{\text{пл}}$, $A_{\text{ав}}$ – средние затраты на проведение дорожных работ, планового и аварийного ремонтов подвески, руб.; $T_{\text{меж}}$ – межремонтный период подвесок, ч.; $P(T_{\text{меж}})$ – вероятность безотказной работы подвески за межремонтный период $T_{\text{меж}}$.

В случае равенства наработки до отказа подвески и ее межремонтного периода, длительность логистических простоев будет минимальной. Таким образом, математическое ожидание наработки при описанном условии примет следующий вид (8):

$$\int_0^{T_{\text{меж}}} P(t) dt = \int_0^{T_{\text{меж}}} t f(t) dt + T_{\text{меж}} P(T_{\text{меж}}) \quad (8)$$

где $f(t)$ – плотность вероятности функции потока отказов по времени.

При анализе журналов ремонтных служб было установлено, что распределение числа отказов подвески по наработке до отказа для всех рассматриваемых в исследовании машин является наиболее близким к нормальному, что позволяет по известным формулам рассчитать плотность вероятности, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение наработки до отказа подвески.

Для того чтобы выражение по определению рационального межремонтного периода приняло детерминированный вид, следует задать требуемый уровень вероятности безотказной работы подвески $P_{\text{тр}}$ за межремонтный период $T_{\text{меж}}$. С учетом этого, искомое выражение для определения периодичности регламентных ремонтных работ $T_{\text{меж}}$ будет равно (9):

$$T_{\text{меж}} = T_{\text{ном}} - \sqrt{-2\sigma^2 \ln\left(\frac{\left(\frac{A_{\text{пл}} + A_{\text{геом}}}{A_{\text{ав}}} + 1\right) / \left(1 - \frac{A_{\text{пл}} + A_{\text{геом}}}{A_{\text{ав}}}\right) - P_{\text{тр}}}{(T_{\text{ном}} - \Delta T) / N}\right)} \sigma \sqrt{2\pi} \quad (9)$$

где N – число отказов подвески за ее срок службы, ед.; $T_{\text{н ср}}$ и σ – среднеарифметическое и среднеквадратичное значение наработки до отказа подвесок, ч.;

С учетом выражения (9) был разработан искомый алгоритм определения периодичности регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, задействованных в осложнённых горнотехнических условиях эксплуатации (рисунок 4). Разработанный алгоритм был реализован в прикладной программе, написанной на языке Java для ОС Windows.

Оценка применимости разработанного алгоритма производилась для автосамосвалов, маршруты транспортирования которых представлены в таблице 1, в сравнении с фактическими данными за 2023 г., и представлена на рисунке 5. Из него следует, что при использовании разработанного алгоритма средняя продолжительность логистических простоев при аварийном ремонте подвески сократилась на 45 %, а среднее время аварийного ремонта – на 14%, что говорит о его применимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлено новое научно обоснованное технико-технологическое решение по обоснованию регламента технического обслуживания и ремонта подвесок карьерных автосамосвалов в осложненных горнотехнических условиях. Использование результатов исследований вносит существенный вклад в совершенствование процессов технического ремонта карьерных автосамосвалов.

По результатам выполнения диссертационного исследования сделаны следующие выводы:

1. Предложено оценивать каждый из группы параметров технологических трасс транспортирования горной массы, обусловленных осложненными горнотехническими условиями: макропрофиль участков, их геометрию и сочетания, при помощи измерения величины давления в пневмогидроцилиндрах подвески карьерных автосамосвалов, средней скорости движения машины на участке и

кратчайшего расстояния между начальной и конечной точками участка.

2. Установлено, что зависимость сокращения срока службы подвесок карьерных автосамосвалов от группы параметров технологических трасс транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями: макропрофиля участков, их геометрии и сочетаний, описывается линейным полиномом, полученным при помощи регрессионного анализа статистических данных с двух предприятий, производящих отработку месторождений по углубочной кольцевой системе разработки.

3. На основе выявленной зависимости сокращения срока службы подвесок карьерных автосамосвалов от группы параметров технологических трасс транспортирования установлено, что ежегодное сокращение срока службы подвесок за 2020-2023 гг. в сравнении с базовыми (неосложненными) условиями составило от 6% до 20%, при этом максимальное расхождение расчетного сокращения срока службы с фактически зарегистрированным составило 13%.

4. Разработан алгоритм определения периодичности регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, действовавших в осложнённых горнотехнических условиях эксплуатации, в зависимости от давления в их пневмогидроцилиндрах, средневзвешенной величины криволинейности, продольного и поперечного уклона участков трассы транспортирования и их сочетаний для сокращения продолжительность логистических простоев и времени аварийного ремонта этого узла.

5. Разработаны рекомендации по корректировке графиков проведения ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, при помощи обоснования их периодичности с использованием разработанного алгоритма. Для выбранных предприятий, проводящих отработку месторождений твердых полезных ископаемых по углубочной кольцевой системе разработки, их применение позволило сократить ожидаемую среднюю продолжительность логистических простоев на 45%, а среднее время аварийного ремонта рассматриваемого узла – на 14%.

6. Разработана и зарегистрирована компьютерная программа, написанная на языке Java и работающая в ОС Windows в диалоговом режиме, позволяющая определять влияние на периодичность регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, геометрии участков трассы, величины давления в каждом из пневмогидроцилиндрах ходовой части и требуемого уровня безотказности рассматриваемого узла.

7. Полученные результаты использованы в деятельности ООО «М4Е» при разработке проектных решений по поддержанию установленного уровня надежности горных машин, что подтверждается актом внедрения от 21.03.2025.

8. В качестве дальнейшего развития исследований по теме диссертации целесообразно разработать алгоритм определения периодичности регламентных ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, направленный на снижение числа аварийных отказов рассматриваемого узла.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Вишняков, Г.Ю. Оценка современных систем мониторинга карьерных автосамосвалов / Г.Ю. Вишняков, **Е.Ю. Ботян** // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 2(160). – С. 51-57.

2. **Ботян, Е.Ю.** Анализ горнотехнических условий эксплуатации карьерных автосамосвалов, снижающих моторесурс элементов подвесок, на железорудных месторождениях России / **Е.Ю. Ботян**, С.А. Лавренко, И.А. Королев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 152-157.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **Ботян, Е.Ю.** Методика уточненного расчета межремонтного периода элементов подвески карьерных автосамосвалов посредством учета горнотехнических условий их эксплуатации / **Е.Ю. Ботян**, С.А. Лавренко, А.Е. Пушкарев // Горная промышленность. – 2024. – №1. – С. 71-76. DOI 10.30686/1609-9192-2024-1-71-76.

4. **Botyan, E.Y.** Evaluation of Complicated Mining Exploitation Conditions Influence on Service Life of Open Pit Trucks Suspensions with Remote Monitoring Systems / **E.Y. Botyan**, S.A. Lavrenko, A.E. Pushkarev // International Journal of Engineering. – 2024. – No. 37(11). – PP. 2268-2275. – DOI 10.5829/ije.2024.37.11b.12.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023662579 Российская Федерация. Программа для определения показателей эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов в режиме топливной экономичности: № 2023661121: заявл. 01.06.2023; опубл. 08.06.2023/ **Е.Ю. Ботян**, А.Е. Пушкарев, С.А. Лавренко; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

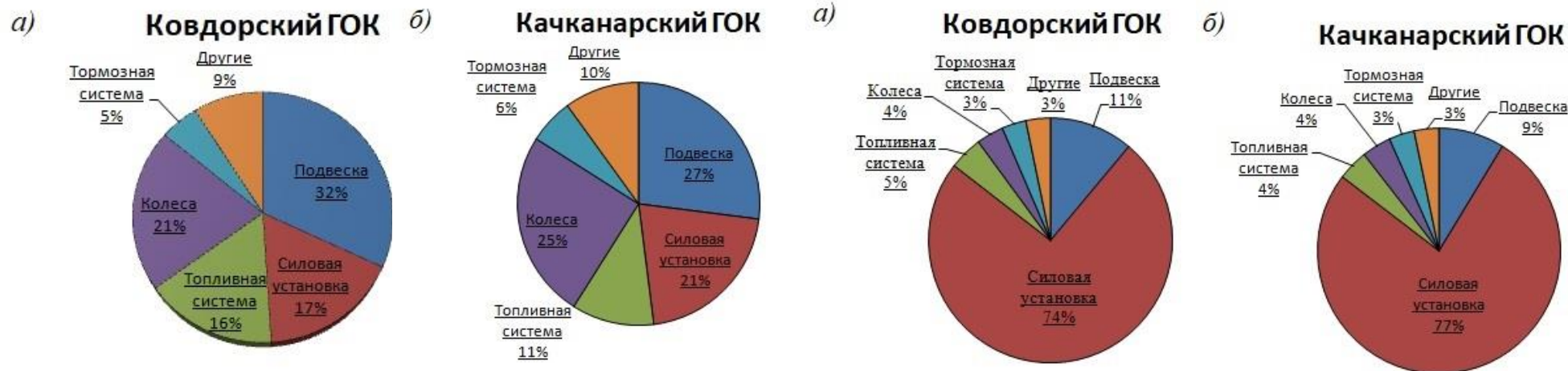


Рисунок 1 – Узлы и агрегаты карьерных автосамосвалов, участвующих в исследовании, с наибольшим числом отказов на:
а) АО «Ковдорский ГОК», б) «ЕВРАЗ Качканарский ГОК»

Рисунок 2 – Узлы и агрегаты карьерных автосамосвалов, участвующих в исследовании, с наибольшей суммарной продолжительностью ремонта на:
а) АО «Ковдорский ГОК», б) «ЕВРАЗ Качканарский ГОК»

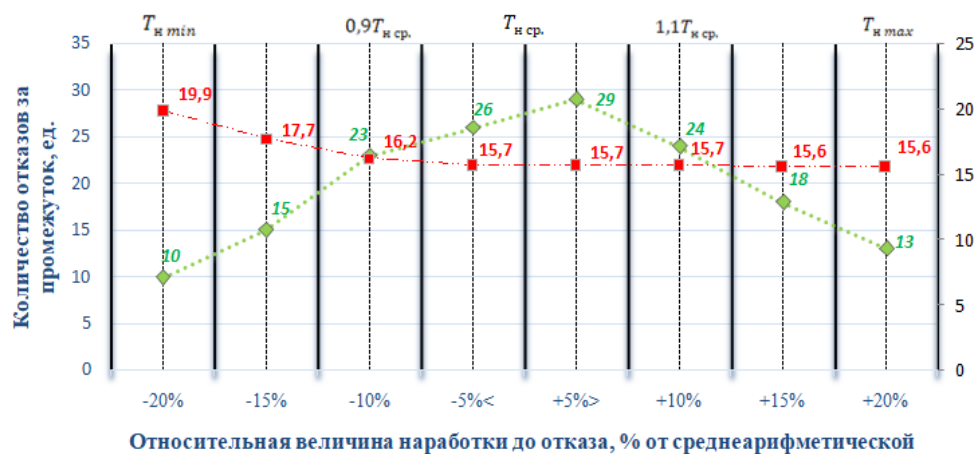


Рисунок 3 – Распределение числа отказов и среднего времени аварийного ремонта подвесок от величины наработки до отказа



Рисунок 5 – Сравнение фактической продолжительности логистических простоев и аварийного ремонта подвесок автосамосвалов, задействованных на выбранных маршрутах, за 2023 г.с рассчитанным при помощи разработанного алгоритма

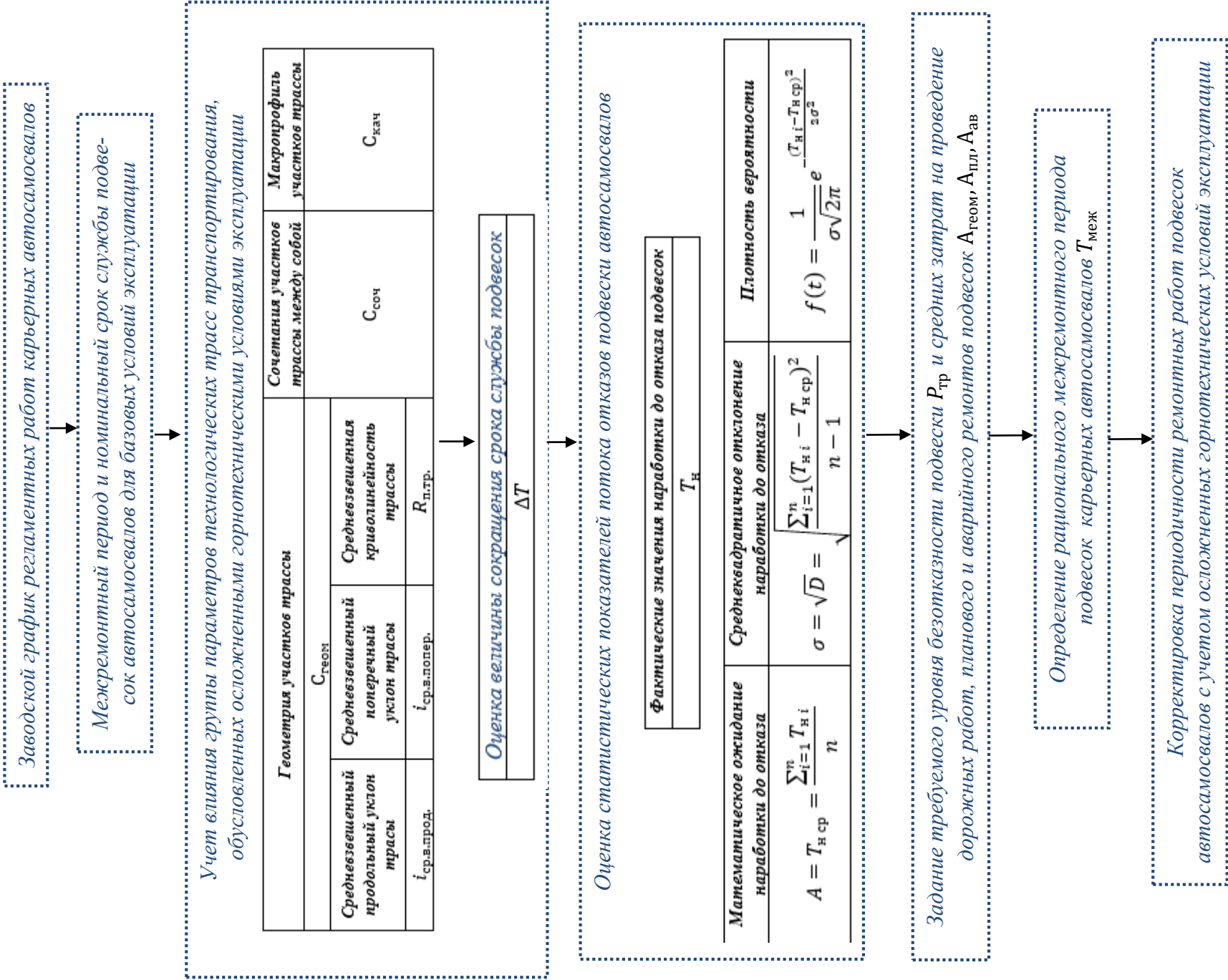


Рисунок 4 – Структура алгоритма определения рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатирующихся в осложненных горнотехнических условиях